

Libros de **Cátedra**

Cultivo en hidroponía

José Beltrano y Daniel O. Gimenez (coordinadores)

n
naturales

FACULTAD DE
CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

CULTIVO EN HIDROPONÍA

José Beltrano
Daniel O. Gimenez
(coordinadores)

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales



Dedicatoria

A la Universidad Nacional de La Plata que a través de su Editorial nos ha permitido plasmar este trabajo. A los alumnos de la ex Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Plata, a los alumnos de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata, a los alumnos de la Universidad Nacional de La Plata. A los autores y a todos aquellos que de alguna manera colaboraron en la concreción de esta obra, a través de ideas para mejorarla, o a través de palabras para motivarnos a llevarla adelante. A los Maestros Profesores de nuestra Casa grande, la Facultad de Ciencias Agrarias, y nuestra casa de todos los días, el INFIVE, que nos indicaron el camino de la docencia, de la investigación y la divulgación de conocimientos para la comunidad toda. Para los que nos mostraron el camino del libre pensamiento y la posibilidad de expresarlo y a los que nos señalaron los caminos del crecimiento a través del del trabajo diario. A nuestros amigos y nuestros compañeros del INFIVE, a nuestros hijos y nuestras familias todas.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de La Plata que a través de su Editorial nos ha permitido plasmar este trabajo. Al Profesor Jorge W. Lanfranco por redactar el prólogo con tanta calidez y originalidad, gracias por su atención. A los autores por el esfuerzo realizado y la vocación docente vertida en la redacción de esta obra. A la Facultad de Ciencias Agrarias, nuestro ámbito de trabajo, al INFIVE, donde día a día muchos de los autores llevan adelante sus actividades.

Epígrafe

*Nunca consideres el estudio como una
obligación sino como una oportunidad
para penetrar en el bello y maravilloso
mundo del saber.*
ALBERT EINSTEIN.

Índice

PRÓLOGO	8
RESUMEN	9
 Capítulo 1	
Introducción al cultivo hidropónico	10
<i>José Beltrano</i>	
 Capítulo 2	
El agua en la planta	34
<i>Marcela Ruscitti</i>	
 Capítulo 3	
Economía del carbono	45
<i>Daniel O. Giménez</i>	
 Capítulo 4	
Los nutrientes minerales	62
<i>Alejandra Carbone</i>	
 Capítulo 5	
Soluciones nutritivas I en cultivos hidropónicos	73
<i>Ricardo Andreau , Daniel Giménez y José Beltrano</i>	
 Capítulo 6	
Soluciones nutritivas II en cultivos hidropónicos	91
<i>Ricardo Andreau , Daniel Giménez y José Beltrano</i>	
 Capítulo 7	
Sanidad Vegetal. Plagas en cultivos hidropónicos	109
<i>Araceli L. Vasicek</i>	

Capítulo 8

Enfermedades de especies hortícolas cultivadas en hidroponía _____ 128

Blanca Lía Ronco y Marcela F. Ruscitti

Capítulo 9

El clima en los invernaderos y los cultivos hidropónicos _____ 139

Susana B. Martínez y Mariana Garbi

Capítulo 10

Bioproductividad en sistemas de producción en hidroponía _____ 165

José Beltrano

LOS AUTORES _____ 178

Prólogo

Estimados lectores

Que honor tener la oportunidad de presentar este libro! Pero a medida que reflexionaba sobre lo que podría expresar se me generaba un conflicto de paradigmas en mi formación profesional, dedicada a la Edafología desde hace más de 40 años y que ahora comparto con Uds.

Cómo hace un edafólogo para presentar un libro cuyo objetivo es trabajar sin suelo?

Entonces recurrí a uno de mis consejos preferidos que doy a los estudiantes: un buen Ingeniero Agrónomo o Forestal es aquel que conoce las necesidades del cultivo: luz, agua, nutrientes, temperatura y un buen sostén. Obviamente el suelo participa eficazmente en forma directa o como administrador de las condiciones del ambiente. Y la hidroponia? también.

Pero analizado con más detalle, mas internamente el suelo se comporta como un sistema trifásico y ofrece difusión de fluidos por cambio de presiones parciales para los gases en los poros de mayor tamaño y de potenciales para los líquidos en los poros medios. Y la hidroponia? los sustratos que utiliza; también.

Sigo con mi conflicto. Las raíces modelan el suelo friable extrayendo los nutrientes de una solución nutritiva o solución externa. Y la hidroponia?..es una enorme solución externa.

Lo que si parece exclusivo de los suelos es su papel como sostén. Pero la hidroponia? también lo resuelve mediante diferentes estrategias.

Ahora más seguro que finalmente nos une propiciar el crecimiento y desarrollo de las plantas y que las diferencias son solo jurisdiccionales; abro el libro y disfruto de un texto con rigor científico, bien escrito, claro y preciso; que tiende un hermoso puente de conocimiento al público en general.

Los autores han logrado generar una obra en la que se comprenden los procesos para luego proceder, permitiendo que el lector entienda científicamente lo que opera, propiciando el acceso al conocimiento.

El desarrollo de la ciencia consolida y perfecciona la técnica; este libro nos enseña como la hidroponía acompañó al desarrollo del hombre y como la proyecta al futuro, donde el mundo superpoblado, podría requerir de alimentos aún en ambientes tóxicos, contaminados, infestados con plagas o degradados y con una vulnerable seguridad alimentaria.

Solo me resta invitarlos a compartirlo.

Jorge Washington Lanfranco

Resumen

El cultivo en hidroponía, es una modalidad en el manejo de plantas, que permite su cultivo sin suelo. Mediante esta técnica se producen plantas principalmente de tipo herbáceo, aprovechando sitios o áreas no convencionales, sin perder de vista las necesidades de las plantas, como luz, temperatura, agua y nutrientes. En el sistema hidropónico los elementos minerales esenciales son aportados por la solución nutritiva. El rendimiento de los cultivos hidropónicos pueden duplicar o más los de los cultivos en suelo. La disponibilidad de agua y nutrientes, los niveles de radiación y temperatura del ambiente, la densidad de siembra o disposición de las plantas en el sistema hidropónico, la acción de patógenos o plagas, etc., incidirán fuertemente en el rendimiento del cultivo. El modernismo permitió la introducción de los avances de la informática para el control y ejecución de actividades, que han hecho de la automatización del cultivo hidropónico una realidad. Un cultivo hidropónico realizado en un área confinada y climatizada, es un sistema altamente repetible, en consecuencia se ha constituido en una herramienta valiosa para la investigación y la enseñanza. Hoy la hidroponía se vislumbra como una solución a la creciente disminución de las zonas agrícolas, producto de la contaminación, la desertización, el cambio climático y el crecimiento desproporcionado de las ciudades. Además, de ser una de las más fascinantes ramas de la ciencia agronómica. El suministro de energía o de agua, el transporte, la gestión de los residuos o los propios sistemas constructivos deberán cambiar para acercarse a un modelo más sostenible, para dar forma a lo que se ha dado en llamar “ciudades inteligentes” y las granjas verticales (“Vertical Farm”). La idea del huerto hidropónico familiar, el huerto hidropónico urbano, las Vertical farm, son ideas muy innovadoras y conducen a un sistema diferente, en un paisaje en el que cada uno de los participantes deberá contemplar desde una óptica sistémica, este nuevo paisaje, luego la producción de alimentos y la sustentabilidad del sistema deberán estar bajo evaluación permanente.

CAPÍTULO 1

Introducción al cultivo hidropónico

José Beltrano

¿Qué es la hidroponía?

Hidroponía, es un conjunto de técnicas que permite el cultivo de plantas en un medio libre de suelo. La hidroponía permite en estructuras simples o complejas producir plantas principalmente de tipo herbáceo aprovechando sitios o áreas como azoteas, suelos infértiles, terrenos escabrosos, invernaderos climatizados o no, etc. A partir de este concepto se desarrollaron técnicas que se apoyan en sustratos (medios que sostienen a la planta), o en sistemas con aportes de soluciones de nutrientes estáticos o circulantes, sin perder de vistas las necesidades de la planta como la temperatura, humedad, agua y nutrientes. La palabra hidroponía deriva del griego HIDRO (agua) y PONOS (labor o trabajo) lo cual significa literalmente trabajo en agua. Sin embargo, en la actualidad se utiliza para referirse al cultivo sin suelo. La hidroponía es una herramienta que permite el cultivo de plantas sin suelo, es decir sin tierra. Un cultivo hidropónico es un sistema aislado del suelo, utilizado para cultivar plantas cuyo crecimiento es posible gracias al suministro adecuado de los requerimientos hídrico-nutricionales, a través del agua y solución nutritiva. Con la técnica de cultivo sin suelo es posible obtener hortalizas de excelente calidad y sanidad, permitiendo un uso más eficiente del agua y los nutrientes. Basados en la experiencia, los rendimientos por unidad de área cultivada son altos debido a una mayor densidad, mayor productividad por planta y eficiencia en el uso de los recursos agua, luz y nutrientes. No es una metodología moderna para el cultivo de plantas, sino una técnica ancestral; en la antigüedad hubo culturas y civilizaciones que utilizaron esta metodología como medio de subsistencia. Generalmente asociamos esta forma de cultivo con grandes invernaderos para el cultivo de plantas y el empleo de la más compleja tecnología; sin embargo, los orígenes de la hidroponía fueron muy simples en su implementación. El desarrollo actual de la técnica de los cultivos hidropónicos, está basada en la utilización de mínimo espacio, mínimo consumo de agua y máxima producción y calidad.

La evolución y la hidroponía

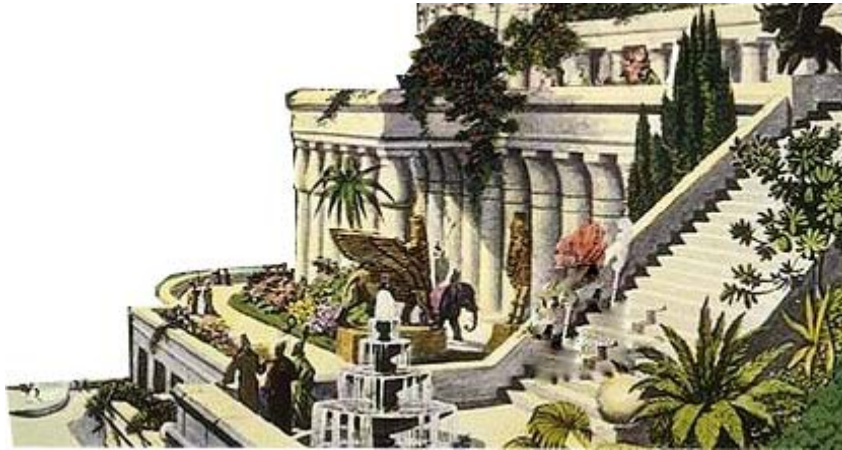
El cultivo de plantas en un medio acuoso es anterior al cultivo plantas en tierra firme. Hace aproximadamente unos 4600 millones de años se formó la Tierra, las condiciones eran extremas, con temperaturas muy elevadas debido a la radiación proveniente del espacio exterior. En ese momento la atmósfera de este planeta en formación estaba saturada de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y vapor de agua entre otros componentes, y con un espesor insuficiente como para frenar los choques de meteoritos y de la radiación UV. Esta atmósfera reductora, carecía de oxígeno libre; el oxígeno existente estaba combinado con hidrógeno, metales y otros elementos químicos. Hace unos 4000 millones de años al bajar la temperatura del planeta, el vapor de agua se condensó y precipitó en forma de lluvias torrenciales, que al acumularse dieron origen a grandes masas de agua con sustancias disueltas. Mil millones de años más tarde, la Tierra ya albergaba seres vivos. Las constantes descargas eléctricas y el medio acuoso fueron la fuente de energía para que los elementos que se encontraban en ese océano primigenio se combinaran por medio de reacciones físicas y químicas, generándose algunas moléculas orgánicas, que luego fueron la base para la formación de otras más complejas, esenciales para la vida como fueron los hidratos de carbono, las proteínas, las grasas y los ácidos nucleicos como el ARN y el ADN. En este océano primitivo la acumulación y combinación de estas moléculas orgánicas, formaron sistemas más complejos que incorporaban moléculas que provenían del medio circundante. Oparín denominó a esos aglomerados como protobiontes, o coacervados, eran un agregado de moléculas unidas por fuerzas electrostáticas, que constituían un sistema similar a un ser vivo, ya que intercambiaban materia y energía en forma continua con el medio líquido que los rodeaba. Posteriormente, estos sistemas relativamente complejos, adquirieron la capacidad de crecer y reproducirse, y constituyeron los primeros organismos unicelulares. A partir de ese momento se asiste a una verdadera explosión evolutiva de la vida en la Tierra. Los primeros organismos eucariotas (con núcleo) aparecieron hace unos 1500 millones de años y los primeros pluricelulares hace unos 670 millones de años. En ese trayecto surge un proceso al que le debemos las condiciones actuales del planeta, la fotosíntesis. Proceso que ha sido esencial para el desarrollo de la mayor parte de la vida que predomina en la Tierra. Gracias a la fotosíntesis, el oxígeno comenzó a acumularse en la atmósfera, y en las capas altas se fue transformando en ozono, el cual tiene la capacidad de filtrar los rayos ultravioletas, nocivos para los seres vivos. Este sistema hidropónico natural en el que crecieron estos vegetales, en nuestros océanos primitivos, data aproximadamente de 570 millones de años, en el período Cámbrico de la Era Paleozoica. Con la proliferación de estos organismos fotosintéticos, la atmósfera primitiva reductora, se fue transformando en una atmósfera oxigénica (oxidante), con abundante oxígeno. Los primeros organismos pluricelulares aparecieron hace mas de 650 millones de años, y las plantas evolucionaron en paralelo con los animales. Cuando la capa de ozono alcanzó un espesor adecuado, los animales y vegetales pudieron abandonar la

protección que proporcionaba el medio acuático y el paso siguiente fue colonizar la tierra firme. Los anfibios por su parte, se originaron hace 300 millones de años, los mamíferos aparecieron hace un poco más de 75 millones y las aves surgieron hace 30 millones de años, finalmente el hombre hace su aparición y comienza a evolucionar hasta su forma actual hace entre 50 y 20 millones de años.

Historia de la hidroponía

La Hidroponía es una metodología que permite el cultivo de plantas sin tierra. Se inicia con el crecimiento de plantas en los océanos primigenios y otras grandes masas de agua, y data aproximadamente desde el tiempo que la tierra fue creada. El cultivo hidropónico es anterior al cultivo en tierra. Como herramienta de cultivo manejado por el hombre, muchos creen que empezó en la antigua Babilonia, en los famosos Jardines Colgantes que se conocen como una de las Siete Maravillas del Mundo Antiguo, en lo que probablemente fuera uno de los primeros intentos exitosos de cultivar plantas sin suelo. Además, existen referencias que esta técnica fue utilizada en la antigua China, India, Egipto, también la cultura Maya la utilizaba, y existen notas que fue utilizada por algunas tribus asentadas en el lago Titicaca; desarrollándose mucho más tarde a niveles muy elevados, en países con limitaciones serias de suelo y agua. Como la posible primera experiencia de cultivo hidropónico, hacia el año 600 A. C., el Rey Nabucodonosor II (Rey de los Caldeos), quiso hacer un regalo a su esposa Amytis, que añoraba el paisaje montañoso y verde del norte de Media (Oriente Medio) de donde procedía. Para demostrar su amor por ella Nabucodonosor II mandó a construir nada menos que los conocidos como Jardines Colgantes de Babilonia, aunque nunca se imaginó que estaba construyendo una de las Siete Maravillas del Mundo Antiguo. Esta espectacular obra de la ingeniería, de la arquitectura y del paisajismo, sería considerada muchos siglos más tarde como el primer cultivo hidropónico hecho por el hombre del que la humanidad tenga algún conocimiento. Los jardines colgantes fueron construidos entre el año 605 a. C. y el 562 a. C., en la ciudad de Babilonia, actual Irak, a orillas del río Éufrates y perduraron hasta el año 126 a. C., cuando la ciudad fue invadida y destruida. La antigua Babilonia, fue una ciudad de la Mesopotamia inferior o Baja Mesopotamia, estaba localizada a orilla del río Éufrates, mostraba el más extraordinario jardín en terrazas de piedra colocadas en forma escalonada, en las que se plantaron árboles, flores y arbustos, los que eran regados a través de una especie de noria que llevaba el agua desde un pozo o del río, hasta el lugar más alto del jardín, y por gravedad se regaba el resto de las terrazas. Aunque se han desarrollado diversos modelos arquitectónicos de su construcción, la realidad es que no se conoce con precisión el sistema utilizado. Los Jardines Colgantes no "colgaban" realmente. El nombre de "colgantes" proviene de una traducción del griego kremastos o del término en latín pensilis, que significa no exactamente "colgar" pero si "sobresalir", como en el caso de una terraza o de un balcón. El

geógrafo griego Estrabón, escribió sobre los jardines y comentó: “constan de terrazas abovedadas ahuecadas y llenas de tierra para permitir el cultivo de plantas de gran tamaño, alzadas unas sobre otras, que descansan sobre pilares cúbicos. Los pilares, las bóvedas, y las terrazas están construidas con ladrillo cocido”.



Los jardines estaban junto al palacio del Rey, próximos al río. En las terrazas se plantaron árboles traídos de lejanos países y rosales que florecían todo el año. La construcción se dividía en varios niveles o terrazas y en la última, se encontraba el depósito de agua. El agua era elevada desde el Éufrates, posiblemente por norias, ocultas o disimuladas dentro de la estructura de las terrazas. Existen referencias que indican que se acarreó tierra fértil de los huertos de Bagdad, a orillas del Tigris y que un inmenso depósito de agua extraída del Éufrates mantenía la frescura y humedad del suelo. Nada queda ya de estos jardines.



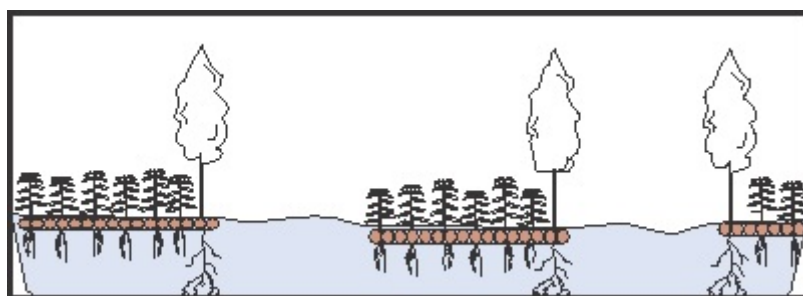
Hasta el lugar que ocupó Babilonia fue ignorado por muchos años. Grupos de investigación hoy han determinado el sitio preciso de su emplazamiento. Otras referencias indican que los aztecas fueron la primera civilización, en territorio americano, en usar la agricultura hidropónica como sistema de producción y de supervivencia, a través de los denominados Jardines Flotantes. Los aztecas de Centroamérica, fueron forzados a ubicarse hacia la orilla pantanosa del Lago Tenochtitlán, localizado en el gran valle central de lo que es actualmente México, y estas poblaciones maltratadas por sus vecinos más poderosos, que les negaron tierra cultivable, sobrevivieron desarrollando innovadoras modalidades de cultivo de plantas en medios líquido como fue la superficie del lago Tenochtitlán.

Como consecuencia de la falta de tierra, decidieron cultivar plantas con los materiales que tenían a mano; en lo que debe haber sido un largo proceso de prueba y error, construyeron balsas de cañas y/o palos, dragaban tierra del fondo del lago y la colocaban en las balsas. Debido a que la tierra venía del fondo del lago, era rica en restos orgánicos y nutrientes, sobre la que se cultivaban flores y verduras, en la superficie de lagos y lagunas del Valle de México. Estas balsas, llamadas Chinampas, permitían cosechas abundantes de verduras y flores. En algunas oportunidades se unían varias balsas para formar islas flotantes de varios metros de largo. Esta técnica mediante el uso de las Chinampas ocupó gran parte de lo que era el lago de Xochimilco.



En algunos casos, la balsa era atravesada con estacaones de sauce para que sus raíces crecieran hasta la tierra firme, para su anclaje en el fondo del lago o laguna y la superficie flotante era sembrada con frutas, hortalizas y flores. Se trataba de una técnica cuyo máximo

desarrollo se consiguió en el siglo XVI. Al llegar los conquistadores al Nuevo Mundo, la vista de estas islas los asombró, el paisaje de árboles, flores y otros vegetales aparentemente suspendidos en el agua los dejaba perplejos. William Prescott, el historiador que escribió las crónicas de la destrucción del imperio azteca por los españoles, describió las Chinampas como "Asombrosas Islas de Verduras, que se mueven como las balsas sobre el agua". Las Chinampas continuaron siendo usadas en el lago hasta el siglo XIX, aunque en menor número.



De igual forma, los Jardines Flotantes de China, son considerados ejemplos hidropónicos, al igual que las formas de cultivo que se emplearon en Cachemira. Se afirma también, que existen jeroglíficos egipcios, de cientos de años AC que describen el cultivo de plantas en agua a lo largo del Nilo a través de un primitivo esquema hidropónico. Actualmente, más del 70% de la vegetación existente en el planeta es hidropónica, ya que un elevado porcentaje crece naturalmente en los océanos y otros cuerpos de agua. En síntesis, el cultivo de plantas sin suelo, puede ser desarrollado de la manera más simple y económica, hasta la más compleja y costosa.

La nutrición de los vegetales y los cultivos hidropónicos

En la medida en que el hombre comienza a participar de estos sistemas de cultivo de plantas para pasar de cultivos circunstanciales de supervivencia o demostrativos a cultivos comerciales, el sistema se va complejizando. Además, el grado de conocimiento necesario para llevar adelante el cultivo con éxito, es mayor. Veamos en un resumen el desarrollo de la nutrición vegetal y los cultivos hidropónicos a través del tiempo: Aristóteles (384-322 A. C.) y Teofrasto (327-287 A. C.) iniciaron los primeros experimentos de nutrición vegetal. Más tarde, Dioscórides realizó estudios botánicos en épocas anteriores al siglo 1. Varios siglos después, Leonardo Da Vinci, (1452-1519), el genio más grande del renacimiento, fue atraído a investigar sobre la anatomía y los componentes de las plantas. Pero el intento científico documentado más antiguo para descubrir los componentes y los nutrientes de las plantas fue en 1600 cuando el belga Jan Baptista Van Helmont (1557-1644), mostró en un experimento que las plantas obtienen sustancias del suelo y del agua. Él plantó un retoño de sauce de 5 libras (2,26

kg) en un recipiente que contenía 200 libras (90 kg) de tierra seca la cual fue cubierta para mantenerla aislada del polvo, después de 5 años de riego regular con agua de lluvia encontró que el retoño del sauce había aumentado su peso a 160 libras (72,5 kg), mientras la tierra perdió menos de 2 onzas (56 gr). Su conclusión, fue que las plantas obtienen sustancias del agua para su crecimiento, despreció la disminución del suelo y no detectó que las plantas también requieren dióxido de carbono y oxígeno del aire. El primer trabajo científico publicado sobre crecimiento de plantas sin suelo fue, de sir Francis Bacon en *Sylva sylvarum* (1627), a partir del cual, esta técnica se comenzó a utilizar en investigación. Más tarde, el naturalista, geólogo y anticuario, John Woodward (1665-1728), profesor de la Universidad de Cambridge, hacia 1699, cultivó plantas de menta, en agua que contenían varios tipos de tierra disuelta; es decir, Woodward sin saberlo, había desarrollado la primera solución nutritiva, y observó que las plantas crecían peor en agua destilada que en agua con suelo o agua sucia y encontró que el mayor crecimiento ocurrió en agua con la mayor cantidad de "buena" tierra. Puesto que se sabían poco de química, él no pudo identificar los elementos específicos que causaban el crecimiento. Concluyó, por tanto, que el crecimiento de las plantas era el resultado de ciertas sustancias y minerales, contenidos en el "agua enriquecida" con tierra. En 1804, Nicolás De Saussure (1767-1845), científico Suizo, publicó los resultados de sus investigaciones, indicando que las plantas están compuestas de minerales y elementos químicos obtenidos del agua, tierra y aire. En 1842 se publicó una lista de nueve elementos considerados esenciales para el crecimiento de las plantas.

Esto fue verificado por Jean Baptiste Boussingault (1851), un científico francés que en sus experimentos con medios de crecimiento inertes, alimentó plantas con soluciones acuosas de combinaciones de elementos puros. Estableció que las plantas contienen nitrógeno y otros elementos minerales, y obtienen todos los nutrientes requeridos de los elementos de la tierra; pudo entonces identificar los elementos minerales y las proporciones necesarias para perfeccionar el crecimiento de la planta y lo que fue un descubrimiento aún mayor, publicó numerosas tablas sobre la composición de las cosechas, y calculó la cantidad de varios elementos removidos por hectárea. El origen de las soluciones nutritivas tiene sus antecedentes históricos en cultivos en agua desarrollados por el irlandés Robert Boyle en el año 1665. Otros avances significativos a la hidroponía fueron desarrollados en el s.XIX por autores como Sprengel, Liebig, Sachs y Knop. Carl. S. Sprengel (1787-1859) y A. F. Wiegman (1771-1853), profundizaron las investigaciones, sobre la nutrición de las plantas, al publicar los resultados de sus investigaciones definen los 15 elementos químicos necesarios para el desarrollo de vegetales y comprobaron que aunque un suelo tuviese los minerales necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas, el sistema podía ser improductivo, si faltaba algún elemento esencial, o si este se encontraba presente en muy baja cantidad. Simultáneamente, Justus Von Liebig (1803-1873), investigador alemán, desarrolló su ley del mínimo y afirmó que el suelo aportaba compuestos solubles e inorgánicos para el crecimiento de las plantas. Posteriormente, fisiólogos europeos avanzaron en el conocimiento y

demonstraron que las plantas podían cultivarse en un medio inerte humedecido con una solución acuosa que contuviese los minerales requeridos para las plantas. De los descubrimientos y avances en los años 1859 a 1865 la técnica fue perfeccionada por dos científicos alemanes, Julius Von Sachs (1860) y W. Knop (1861); Knop ha sido llamado "El Padre de la Cultura del Agua." En 1860 el profesor Julius Von Sachs publicó la primera fórmula estándar para una solución de nutrientes que podría disolverse en agua y en la que podrían crecer plantas con éxito. Esto marcó el fin de la larga búsqueda del origen de los nutrientes vitales para las plantas, dando origen a la "Nutricultura". Técnicas similares se utilizan actualmente en estudios de laboratorios de fisiología y nutrición de plantas. El término "hidroponía" fue acuñado 1929, donde William F. Gericke, profesor de la Universidad de California, Davis, define el proceso como "agua que trabaja". Gericke publicó sus trabajos en 1940 como una técnica casi comercial y aparentemente acuñó la palabra de hidropónico para designarlos. En 1948 Withrow y Withrow, de la Universidad de Purdue, y describen lo que llamaron nutriculture: como una serie de soluciones nutritivas para el cultivo de plantas sobre sólidos inertes como soportes para las plantas. Investigaciones posteriores sobre nutrición de plantas demostraron que el crecimiento normal de las plantas puede ser logrado sumergiendo las raíces en una solución que contenga sales de nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, calcio y magnesio, que junto al carbono, hidrógeno y oxígeno que la planta toma del aire componen los que se conocen comúnmente como macronutrientes o elementos mayores. Con el refinamiento de las técnicas de laboratorio, se descubrieron otros ocho elementos requeridos por las plantas en cantidades relativamente pequeñas, denominados micronutrientes o elementos menores. Estos incluyen al hierro, cloro, manganeso, molibdeno, boro, zinc, cobre y nickel. En años siguientes, numerosos investigadores desarrollaron fórmulas básicas diversas para el estudio de la nutrición de las plantas. Algunos de los que trabajaron en esto fueron Tollens (1882), Totttingham (1914), Shive (1915), Hoagland (1919), Deutschmann (1932), Trelease (1933), Arnon (1938) y Robbins (1946). Muchas de sus fórmulas todavía se usan en investigaciones de laboratorio sobre nutrición y fisiología de las plantas. En resumen la hidroponía es un método de cultivar plantas sin la necesidad de suelo agrícola proveyéndole a la planta los nutrientes esenciales o necesarios, para que esta lleve a cabo completamente su ciclo de vida, a través de lo que se conoce como una Solución Nutritiva y/o un medio, bajo condiciones controladas. Según el Prof. Perez-Melian (1977), una solución nutritiva es una solución acuosa que contiene oxígeno y todos los nutrientes disueltos. Los nutrientes pueden ser aportados por sales o fertilizantes comerciales. Los iones en solución guardan una relación que está marcada por factores de tipo químico y fisiológico, en función de las necesidades nutritivas de un determinado cultivo.

Se puede hacer una distinción entre sistemas los hidropónicos:

1. Cultivos sin sustrato, donde se realiza el cultivo sin sustrato (técnica de la solución nutritiva recirculante (NFT), aeroponía), donde "los nutrientes están disueltos en agua los cuales son llevados en contacto con las raíces directamente. En este sistema el agua es

aireada o se permite que las raíces y la solución estén en contacto con el aire. En esta técnica se provee soporte a la planta mediante enganches o cables metálicos. Algunos ejemplos de este tipo de sistema hidropónico son “NFT o Nutrient Film Technique”, “Tanque nutritivo”, “Mist System” entre otros.

2. **Cultivo en agregado** (Aggregate Culture), donde los nutrientes están disueltos en agua los cuales son transportados hasta las raíces. En este sistema las raíces están creciendo en un medio sólido inerte capaz de retener suficiente humedad, pero que drene el exceso y que permita una aireación adecuada. Algunos medios sólidos utilizados en este tipo de sistemas son perlita, vermiculita, arena, arcilla expandida, gravilla, musgo, cascarilla de arroz, turba, etc. Para los sistemas de cultivo hidropónico es de importancia que la solución nutritiva contenga todos los elementos necesarios y en la composición correcta. La composición correcta depende del cultivo y de su fenología.

Ventajas de los cultivos hidropónicos:

Cultivos libres de parásitos, bacterias, hongos y contaminación.

Reducción de costos de producción.

Independencia de los fenómenos meteorológicos.

Permite producir cosechas en contra estación

Menos espacio y capital para una mayor producción.

Ahorro de agua, que se puede reciclar.

Ahorro de fertilizantes e insecticidas.

Se evita la maquinaria agrícola (tractores, rastras, etcétera).

Limpieza e higiene en el manejo del cultivo.

Mayor precocidad de los cultivos.

Alto porcentaje de automatización.

Mejor y mayor calidad del producto.

Altos rendimientos por unidad de superficie

Aceleramiento en el proceso de cultivo

Posibilidad de cosechar repetidamente la misma especie de planta al año

Ahorro en el consumo del agua

Productos libres de químicos no nutrientes.

La hidroponía permite atender necesidades alimenticias sin pensar en grandes emprendimientos, ya que podemos lograr cultivos hidropónicos en casa, en el jardín o en la azotea ya sean hortalizas, flores y hasta pequeños arbustos o frutillas, permitiendo obtener los productos para una alimentación saludable y con una buena forma de terapia ya que ayuda a bajar los altos niveles de estrés. Una de las ventajas que tiene la hidroponía sobre el cultivo en tierra es que permite una mayor concentración de plantas por metro cuadrado. Esto es muy

notorio cuando cultivamos plantas como por ejemplo fresas y lechugas, así como también al cultivar forraje hidropónico. Existe un control sobre la nutrición vegetal gracias al uso de soluciones nutritivas; permitiendo obtener un fruto estandarizado, de mejor tamaño y calidad. En muchos casos, el tiempo de desarrollo de la planta se acorta, como por ejemplo, en las lechugas, donde en tierra su ciclo antes del consumo es de aprox. 3.5 meses, cuando en hidroponía, en la técnica hidropónica de raíz flotante las podemos cultivar en tan solo 1.5 meses a partir de su germinación. Un cultivo hidropónico consume una cantidad mucho menor de agua que un cultivo en tierra, ya que en el cultivo en tierra el 80 % del riego se infiltra a las capas inferiores del terreno y otro porcentaje del riego se evapora; mientras que en un cultivo hidropónico se evita totalmente la infiltración del agua así como gran parte de la evapotranspiración, ya que el cultivo se realiza en general en locales cerrados, con humedad relativa elevada. Al cultivar por hidroponía, se obtienen cultivos con mejor sanidad y calidad. Es por esto que es tan importante trabajar sobre un sustrato desinfectado, ya que la hidroponía nos da la oportunidad de trabajar sobre un medio estéril, lo cual es valorado por los consumidores. El producto hidropónico se coloca muy bien en cualquier mercado gracias a sus características distintas como color, sabor y tamaño, además de mayor vida en anaquel. Este sistema tiene aun un mercado virgen en Argentina.

Desventajas del cultivo hidropónico sobre los cultivos en tierra

La hidroponía cuenta con algunas desventajas que son casi imperceptibles como el costo inicial el cual resulta algo elevado, y la idea que se requiere un conocimiento mayor para llevar adelante la producción, sin embargo esto es discutible, ya que cualquier persona lo puede hacer ya sea un ama de casa, un niño o un físico matemáticos.

El pasado

Hidroponía se define como la ciencia de cultivo de plantas en solución nutritiva o con uso de un medio inerte, como arena gruesa, turba, vermiculita o aserrín al que se agrega una solución nutritiva que contiene todos los elementos esenciales requeridos por las plantas para su normal crecimiento y desarrollo. Puesto que muchos métodos hidropónicos emplean algún tipo de medio que contiene material orgánico como turba o aserrín, son a menudo llamados "cultivos sin suelo", mientras que aquellos con la cultura del agua serían los verdaderamente hidropónicos. Hoy, la hidroponía es el término que describe las distintas formas en las que pueden cultivarse plantas sin suelo. Estos métodos, incluyen el cultivo de plantas en recipientes llenos de solución y cualquier otro medio distintos a la tierra. - incluso la arena gruesa, vermiculita y otros medios más exóticos, como piedras aplastadas o ladrillos,

fragmentos de bloques de carbonilla, entre otros. Hay varias excelentes razones para reemplazar la tierra por un medio estéril, se eliminan plagas y enfermedades contenidas en la tierra y la labor que involucra el cuidado de las plantas se ve notablemente reducida. Una característica importante al cultivar plantas en un medio sin tierra es que permite tener más plantas en una cantidad limitada de espacio, las cosechas serán más uniformes y seguras, los frutos serán más precoces y producirán rendimientos mayores, el agua y los fertilizantes pueden volver a utilizarse, además, el cultivo en hidroponía permite ejercer un mayor control sobre las plantas, con resultados más uniformes y seguros. Una de las dificultades principales con este método está asociado al suministro de oxígeno en la solución nutritiva. Las plantas pueden agotar el oxígeno disuelto en la solución, y por esta razón es indispensable un suministro continuo a la solución a través de algún método de aireación. Después de un periodo incierto en el que promotores poco escrupulosos intentaron cobrar por la idea vendiendo de puerta en puerta equipos inútiles y materiales poco adecuados, una investigación más práctica fue llevada a cabo y se estableció la hidroponía con base científica legítima para el cultivo de hortalizas, con el consecuente reconocimiento de sus dos ventajas principales: cosechas de alto rendimiento y calidad y de utilidad especial en regiones no cultivables del mundo. El primer triunfo comercial de los cultivos hidropónicos ocurrió cuando Pan American Airways decidió establecer un centro de cultivos hidropónicos en la distante Isla Wake en medio del Océano Pacífico para proporcionar suministros regulares de verduras frescas a los pasajeros y tripulaciones de la aerolínea. Al final de los años cuarenta, Robert B. y Alice P. Withrow trabajaban en la Universidad de Purdue desarrollaron un método hidropónico más práctico. Ellos usaron arena gruesa inerte como medio de sostén, inundando y drenando alternativamente la arena en un recipiente, dieron aire a la solución nutritiva y a las raíces. Este método se conoció después como el método de la arena gruesa o grava para hidroponía, a veces también llamado Nutricultura. La primera de varias grandes granjas hidropónicas se construyó en la Isla de Ascensión en el Atlántico Sur. Las técnicas desarrolladas en Ascensión se usaron más tarde en varias instalaciones en las islas del Pacífico como Iwo Jima y Okinawa. En la Isla de la Estela, un atolón en el oeste de Océano Pacífico de Hawái, sitios en los que normalmente no es posible producir cosechas debido a la naturaleza estéril del terreno. La fuerza aérea de EEUU construyó pequeñas "camas de crecimiento" que se transformaban en áreas cultivables. Además, generó una sección especial de hidroponía que produjo más de 4.000 toneladas de productos frescos durante 1952. También establecieron las instalaciones hidropónicas más grandes del mundo, un proyecto de 22 hectáreas en Chofu, Japón. Después de la Segunda Guerra Mundial, se construyeron varias instalaciones comerciales en los Estados Unidos, la mayoría de éstas se localizaron en Florida. El uso comercial de la hidroponía, creció y se extendió a lo largo del mundo en los años cincuenta a países como Italia, España, Francia, Inglaterra, Alemania, Suecia, la URSS e Israel. Uno de los muchos problemas encontrados por los pioneros de la hidroponía fue causado por el hormigón usado para las camas de crecimiento. La cal y otros elementos afectaban la solución nutritiva, además, la estructura de

metal también fue afectada por los elementos en la solución. En muchos de estos viveros se utilizó tubería galvanizada y los depósitos metálicos, no sólo se vieron corroídos muy rápidamente sino que elementos tóxicos para las plantas se añadían a la solución nutritiva. A pesar de estos problemas el interés en la cultura hidropónica continuaba por varias razones: Primero no se necesitaba tierra, y una gran cantidad de plantas se podían cultivar en un área pequeña. Segundo al alimentar las plantas apropiadamente se lograba una producción óptima. Con la mayoría de las verduras se aceleró el crecimiento y, como regla, la calidad era mejor que la obtenida en verduras cultivadas en tierra. Los productos hidropónicos tenían vida comercial mayor, así como mayor calidad de almacenaje. En el Lejano Oriente empresas norteamericanas tienen la producción de vegetales, para alimentar al personal de perforación en el desierto de varias compañías petroleras en la India Oriental, el Medio Este, las zonas arenosas de la Península árabe y el Desierto del Sahara; en áreas estériles, fuera de la Costa venezolana, en Aruba y Curazao, y en Kuwait los métodos sin suelo han encontrado inestimable valor para asegurar a los trabajadores alimento limpio, fresco y saludable. En los Estados Unidos, existen cultivos hidropónicos comerciales extensos que producen grandes cantidades de alimentos, especialmente en Illinois, Ohio, California, Arizona, Indiana, Missouri y Florida. Además de los grandes sistemas comerciales construidos entre 1945 y los años sesenta, se hizo mucho trabajo en unidades pequeñas para los apartamentos, casas, y patios, para cultivar flores y verduras, muchos de éstos no eran un éxito completo debido a factores como sustratos inadecuados, uso de materiales impropios, técnicas inadecuadas y poco o ningún control medioambiental, además de un escaso conocimiento de los operadores. Existía la convicción creciente que la perfección de este método de producción de alimentos era completamente esencial por la baja producción de los suelos y el aumento constante de la población mundial. Estudios recientes han indicado que hay más de un millón de unidades hidropónicas caseras que operan en los Estados Unidos para la producción de alimentos. Rusia, Francia, Canadá, Sudáfrica, Holanda, Japón, Australia y Alemania están entre otros países donde la hidroponía está recibiendo la atención que merece. Adicionalmente al trabajo realizado para desarrollar sistemas hidropónicos para la producción de verduras, un trabajo similar se ha dirigido a desarrollar un sistema para producir alimento para ganado y aves. Los investigadores determinaron que los granos de cereal podrían cultivarse muy rápidamente de esta manera. Usando granos como cebada, ellos demostraron que 5 kg de semilla pueden convertirse en 35 kg de alimento verde en 7-10 días. Cuando se utilizó como suplemento a las raciones normales, este alimento verde era extremadamente beneficioso para todos tipos de animales. En animales productores de leche, aumentaron la producción. En las porciones de alimento, la conversión fue mejor y se lograron ganancias a menor costo por kg de grano. El sistema desarrollado hasta este punto era capaz de producir de forma consistente; sin embargo, varios problemas se presentaron. Los primeros sistemas tenían poco o ningún control medioambiental, y sin el control de temperatura o humedad había una fluctuación constante en la proporción de crecimiento de hongos, eran un problema constante. Además, se

demonstró que el uso de semilla desinfectada con un porcentaje de germinación alto era absolutamente esencial para lograr una buena cosecha.

La expansión de los cultivos hidropónicos

El real auge o interés sobre la aplicación práctica comercial de este sistema de cultivo sin suelo, no llegó hasta cerca de 1925, cuando la industria de los invernaderos comenzó a desarrollarse. El uso continuo del suelo en los invernaderos y la necesidad de cambiar la tierra con frecuencia para evitar los problemas de estructura, toxicidad, salinización, enfermedades, etc.; hizo que los investigadores comenzaran a valorar el uso potencial del cultivo en medios artificiales, para remplazar los de cultivo en los suelos convencionales. Múltiples experiencias permitieron asumir que se podía prescindir del suelo y se comenzó a vislumbrar el gran potencial que esta herramienta representaba para la agricultura, lo que posteriormente condujo su expansión a nivel comercial. Uno de los investigadores que más influyó en este campo, fue William Frederick Gericke, quien a estos sistemas de nutricultura los llamó "hidroponía" al unir las raíces griegas *hydro* (agua) y *ponos* (trabajo), fue el primero en sugerir que los cultivos en solución se utilizasen para la producción agrícola y llevó a cabo experimentos a gran escala. Su trabajo es considerado la base para todas las formas de cultivo hidropónico, aunque se limitó principalmente al cultivo en medio líquido sin el uso de sustrato para el crecimiento de las raíces. Cultivó con éxito tomates, lechugas y verduras de raíces y tubérculos como remolachas, rábanos, zanahorias y papas, también frutas, plantas ornamentales y flores. El profesor Gericke, utilizaba tanques grandes en los que colocaban mallas finas de alambre, que sostenía las raíces de las plantas y les permitía llegar a la solución de nutriente, las plantas eran sostenidas por un sistema de hilos y tutores, tal como se observa en la actualidad en invernáculos comerciales. Gericke causó sensación al hacer crecer tomates y otras plantas en soluciones minerales y que alcanzaron tamaños iguales o mayores que los cultivados en tierra. En la Universidad de California, logró plantas de tomates de hasta 7 metros de altura, aunque demostraba que su sistema era un poco prematuro para utilizarlo comercialmente. Los informes sobre estos trabajos y las afirmaciones de Gericke, que la hidroponía revolucionaría la agricultura, provocaron un alud de peticiones de información adicional. Fueron muchos los inconvenientes que encontraron los "cultivadores de hidroponía" con el sistema de Gericke, ya que exigía conocimiento técnico e ingeniosidad o audacia de parte del operador. Gericke escribió el libro, *Complete Guide to Soilless Gardening* (Guía Completa del Cultivo sin Suelo). Más tarde, Dennis R. Hoagland y Daniel I. Arnon (Fisiólogos) escribieron un boletín sobre agricultura en 1938 y desarrollaron varias fórmulas para soluciones de nutrientes. Algunas como la de Hoagland se utilizan aun en la actualidad.

La hidroponía y la producción de alimentos en gran escala

Antes de 1930, la mayoría del trabajo hecho sobre cultivos sin suelo se orientó a laboratorios para fines experimentales. Nutricultura, quimicultura, y acuicultura eran otros términos usados para describir la cultura del cultivo sin suelo. Entre 1925 y 1935 tuvo lugar un desarrollo modificando las técnicas de laboratorio de nutricultura a la producción de cosechas a gran escala. En definitiva, los experimentos realizados por Gericke lograron un gran impacto y fueron profusamente difundido por la prensa, como "El Descubrimiento del Siglo", lo que motivó un gran interés de los norteamericanos por tener cultivos similares en sus casas y fincas; sin embargo, este sistema exigía conocimiento técnico, que la mayoría de los usuarios no poseían. Estos primeros sistemas o experimentos tenían poco o ningún control sobre el medio ambiente, en consecuencia había una fluctuación constante en la magnitud del crecimiento, y la presencia de hongos patógenos era común que ocurriese. No obstante estos y otros inconvenientes, se continuó trabajando para perfeccionar un sistema que podría producir alimentos de manera continua. Se debería proponer un nuevo sistema en el que la practicidad y simplicidad deberían ser las características predominantes. En 1936, Gericke y J. R. Travernetti publicaron sus experimentos de cultivos de tomates en solución nutritiva, lo que motivó el interés por parte de empresas comerciales, científicas y agrónomos de otras universidades e instituciones. Desde ese momento, empezaron a surgir unidades hidropónicas a gran escala que se extendieron por Estados Unidos, Europa, Israel, Japón, India, México, etc. Finalmente, uno de los primeros éxitos verificable de la hidroponía ocurrió durante la segunda guerra mundial cuando las tropas estadounidenses que estaban en el Pacífico, en islas donde no había posibilidades de obtención de hortalizas y era extremadamente caro y riesgoso transportar las hortalizas desde el continente, pusieron en práctica cultivar hortalizas sin suelo, por métodos hidropónicos a gran escala para proveer de verduras frescas a sus tropas. La técnica de Gericke, con algunas modificaciones, fue utilizada por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos para proveer de verduras frescas, a las tropas acantonadas en islas coralinas del Pacífico, hacia 1945. El Ministerio Británico de Agricultura también se interesó por la hidroponía y la utilizó en su campaña "Grow-More-Food" (Cultivar Más Comida), entre 1939 y 1945, en plena II Guerra Mundial. El Ministerio, en 1945 estableció una plantación hidropónica en la base militar del desierto de Habbaniya en Irak, y en la isla de Bahrein en el Golfo Pérsico. La hidroponía también ha sido empleada por muchas compañías petroleras y mineras que trabajan en lugares remotos e inhóspitos, en donde la agricultura tradicional no permitiría garantizar la producción de vegetales y hortalizas para su personal. Se conocen emprendimientos de esta naturaleza en Lejano Oriente, en la India Oriental, el Medio Oriente, las zonas arenosas de la Península árabe y el Desierto del Sahara. En 1946, Sholto Douglas llevó la hidroponía a la India y con investigadores locales realizó los primeros experimentos en la Granja Agrícolas de Kalimpong, en el Distrito de Darjeeling (Bengala), sin embargo, en principio, resultó un sistema complejo para el grado técnico de los usuarios. En la década del 80, la NASA realizó

investigaciones extensivas para su CELSS (acrónimo en inglés -Controlled Ecological Life Support System- Sistema de Soporte de Vida Ecológica Controlada, con la dirección del Profesor Frank Salisbury). El Ejército Norteamericano, después de la II Guerra Mundial, continuó cultivando verduras hidropónicas en muchas de sus bases militares durante más de 20 años y aún hoy, emplea esta técnica en muchos lugares del mundo. A partir de 1950 el incremento de las plantaciones hidropónicas se extendió por todo el mundo y en especial ha servido para ampliar y habilitar áreas en las que la agricultura tradicional era difícil de practicar (zonas desérticas, contaminadas, con poca disponibilidad de agua, etc.). Se destacan plantaciones en países como Japón, Holanda, Francia, Inglaterra, Nueva Zelanda, Australia, Alemania, Italia, España, Suecia, Rusia, Sudáfrica e Israel. La posibilidad de cosechar plantas sin tierra fue considerada en la segunda mitad del siglo pasado; y en la actualidad es uno de los sistemas más empleados en países del primer mundo. En Europa, los productos hidropónicos son los más aceptados por ser 100 por ciento orgánicos. Con esta técnica, que no ataca ni altera el medio ambiente, se pueden cultivar verduras, frutas, flores, plantas aromáticas y ornamentales de excelente calidad y en espacios reducidos.

El difícil manejo de los nutrientes

La absorción de nutrientes es un factor importante en el cultivo de plantas de cualquier tipo. Las raíces deben absorber lo que la planta necesita para crecer sana y de un tamaño conveniente. Cuando se cultiva en suelo, las raíces crecen continuamente, para buscar los nutrientes, el agua y el aire en el suelo. En esto invierte una cantidad considerable de la energía. En el cultivo hidropónico, las raíces están continuamente en contacto con las cantidades apropiadas de nutrientes, ya que se plantan en un medio de crecimiento muy adecuado. El exceso de energía la planta la utiliza para desarrollar las partes superiores, incluyendo las flores y los frutos.

Cosecha

Una de las principales ventajas de la hidroponía sobre la agricultura tradicional es la capacidad de obtener un mayor rendimiento. Según algunos autores, la hidroponía resulta en una cosecha que es de dos a 10 veces el de las mismas plantas que se cultivan tradicionalmente. Este aumento del rendimiento se produce en menor tiempo y en menor espacio que en la agricultura tradicional.

Control de Malezas, plagas y enfermedades

La hidroponía elimina la posibilidad del suelo infestado con plagas. Dado que no utiliza el suelo, no hay lugar para que las malezas compitan con el cultivo. Desafortunadamente, puede ser rápida la propagación de enfermedades de plantas en los sistemas hidropónicos. Dado que las plantas o el cultivo está conectado por el sistema de suministro de agua y nutrientes, una planta enferma introducida en el sistema puede propagar rápidamente su problema a todas las demás.

El presente

Esta técnica ha alcanzado un alto grado de sofisticación en países desarrollados. Los nuevos materiales permitieron, por ejemplo, el desarrollo a escala comercial de la agricultura protegida (cultivos en invernadero); el modernismo permitió la introducción de los más recientes avances de la electrónica, la informática (hardware y software) para el control y ejecución de actividades y de las nuevas tecnologías en comunicaciones e información geográfica, que han hecho de la automatización del cultivo hidropónico una realidad y una tendencia cada vez más generalizada con los consecuentes beneficios económicos y de manejo. El conocimiento de las necesidades y las exigencias de los cultivos teniendo en cuenta su uso por el hombre, hace que esta herramienta se transforme en un elemento con un cierto grado de complejidad, para su manejo con eficiencia. La relación entre la fenología de los cultivos y su nutrición es compleja, hay muchas cosas por mejorar, la nutrición vegetal es y debe ser cada vez más precisa. Además, el hecho que, el avance tecnológico, ha permitido la instalación de invernaderos para plantaciones hidropónicas en los lugares más remotos del planeta, hace que en cada lugar (latitud, longitud, entorno, etc.) para asegurar el éxito de la actividad se deben realizar los correspondientes ajustes. Aunque, debemos tener presentes que al ser más eficientes los métodos de ventilación y circulación del aire, se ha logrado un mayor control de la temperatura, lo que conduce a la obtención de más y mejores cosechas. El adelanto en el conocimiento tanto básico (necesidades fisiológicas, nutrientes esenciales, fenología del cultivo, genética, etc.) como aplicado (densidad del cultivo, fechas de siembra y plantación, arquitectura de las plantas, etc.) han sido los impulsores para incrementar el área bajo exploración y explotación de los cultivos hidropónicos. La adaptación de muchos lugares del mundo para realizar construcciones destinadas a sistemas de cultivos hidropónicos, impuso la necesidad de conocer en profundidad como controlar el microclima del invernadero a través de modernos equipos y software adecuados, con considerables incrementos en la producción mundial de hortalizas, verduras y flores. Los sistemas hidropónicos ideados por el hombre, nacen ante algunas necesidades o deseos muy especiales. Como fue comentado, los Jardines Colgantes de Babilonia son una respuesta de amor a la esposa de Nabucodonosor, mientras

los cultivos flotantes en los lagos aztecas, en las Chinamcas, surge como una necesidad de supervivencia ante el ataque a las poblaciones vecinas a los lagos de Tecnochtlan, hoy la hidroponía se vislumbra como una solución a la creciente disminución de las zonas agrícolas producto de la contaminación, la desertización, el cambio climático, el crecimiento desproporcionado de las ciudades y áreas urbanas; y el continuo aumento poblacional. Es por ello que la inventiva responde a otras necesidades y hoy algunos supermercados en Estados Unidos y Japón, tienen plantaciones hidropónicas en sus techos, y sus clientes tienen la posibilidad de escoger directamente las hortalizas que llevarán. En otros casos, el modernismo nos permite alguna sofisticación o exageración de aparente excentricismo y en ese caso nos encontramos con Bell, Book & Candle, un pequeño restaurante en medio del West Village, en Manhattan que se diferencia de los demás por tener un huerto enorme en la azotea del edificio. Su chef John Mooney sólo cocina productos orgánicos de su propia huerta. Los vegetales utilizados son frescos y obtenidos a partir de cultivos hidropónicos. La ciudad de Nueva York albergará el mayor techo de Estados Unidos con una huerta urbana, ubicada en la azotea del antiguo almacén de la Armada en el sector neoyorkino de Brooklyn. El autor de esta iniciativa, Bright Farms, es una novedosa compañía que se dedicará a cultivar frutas y verduras en las azoteas de los edificios para disminuir así la enorme huella de carbono que implica el transporte de los alimentos desde las zonas rurales hacia los supermercados céntricos. Se espera que este jardín urbano, de más de 3 mil metros cuadrados, produzca un millón de libras anuales de vegetales cultivados con la técnica hidropónica, incluyendo tomates, lechugas y otras hortalizas. De esta forma Nueva York, que ha apoyado la agricultura urbana desde hace años, se convertirá en pionero de la iniciativa de huertas urbanas para surtir a los supermercados. Hoy, la hidroponía es vista como una de las más fascinantes ramas de la ciencia agronómica y es responsable de la alimentación y de la generación de ingresos para millones de personas alrededor del mundo. Con los avances en los procesos de desalinización del agua marina, están desarrollándose extensos complejos hidropónicos en islas y regiones costeras en los más diversos lugares del planeta.

Con el desarrollo del plástico, la hidroponía dio otro paso adelante. Si hay un factor al que podría acreditársele el éxito de la industria hidropónica de hoy, ese factor es el plástico. Como ya se mencionó, uno de los problemas encontrado en todos los sistemas era la constante contaminación de la solución. Con el advenimiento de la fibra de vidrio y los plásticos, los tipos diferentes de vinilo, los polietilenos y muchos otros, este problema fue virtualmente eliminado. Los plásticos libraron a los cultivadores de construcciones costosas y pesadas como las "camas de concreto" y los tanques usados anteriormente. Una premisa básica para tener presente sobre la hidroponía es su simplicidad. Además del progreso logrado con el uso del plástico y el definitivo aumento de la producción por a las mezclas nutrientes mejoradas, otro factor de gran importancia para el futuro es el desarrollo económico y uso de hardware para el control ambiental de los invernaderos. Además de un mejor y mayor control medioambiental, el uso de nuevos materiales como polietileno, películas de polivinilo, y láminas de fibra de vidrio

translúcidos introdujeron métodos completamente nuevos de construcción de invernaderos a bajo costo. Éstos dieron una amplia gama de opciones al constructor para cubrir unidades de diferentes longitudes y han desarrollado nuevas formas, tamaños, y configuraciones. La combinación del control medioambiental y los sistemas hidropónicos mejorados han sido los principales responsables del crecimiento de la industria durante los últimos veinte años, y no hay duda que la hidroponía tendrá gran importancia en la alimentación del mundo en el futuro. La hidroponía se ha vuelto una realidad para cultivar en invernaderos en todos los climas. Grandes instalaciones hidropónicas existen a lo largo del mundo para el cultivo de flores y verduras. Los tomates y pepinos han demostrado ser las cosechas más exitosas. Las coles, rabanitos y porotos también han funcionado muy bien. Con hidroponía no hay necesidad de tierra y la eficiencia en el uso del agua es muy superior al de un cultivo convencional. Los productores hidropónicos del futuro usarán el techo de edificios para instalar sistemas comerciales. Sin embargo, los invernaderos de azoteas se usan solamente para la producción de verduras. Hoy, la hidroponía es una rama establecida de la ciencia agronómica, que ayuda a la alimentación de millones de personas; estas unidades pueden encontrarse en los desiertos de Israel, Líbano y Kuwait, en las islas de Ceylan, las Filipinas, en las azoteas de Calcuta y en los pueblos desérticos de Bengala Oriental. En las Islas Canarias, hay cientos de hectáreas cubiertas con polietileno que alojan tomates cultivados hidropónicamente. La cobertura plástica ayuda a reducir la pérdida de agua de las plantas por transpiración y las protege de tormentas súbitas. Estructuras como estas pueden usarse también en áreas como el Caribe y Hawaii. La mitad del tomate en la Isla de Vancouver y un quinto del de Moscú son producidos hidropónicamente. Los parques zoológicos grandes mantienen sus animales saludables con alimentos hidropónicos, y muchos caballos de raza se mantienen con forraje producido de esta manera. Los cultivadores comerciales están usando esta técnica para producir alimento a gran escala de Israel a India, y de Armenia al Sahara. En las regiones áridas del mundo, como México y el Medio Este, donde el suministro de agua fresca está limitado, están desarrollándose complejos hidropónicos combinados con unidades de desalinización para usar agua del mar como una fuente alternativa. Los complejos se localizan cerca del océano y las plantas son cultivadas en arena de playa. En otras áreas del mundo, como el Medio Este, hay poca tierra apta para cultivar debido al desarrollo de la industria del petróleo y el flujo subsecuente de riqueza, la construcción de instalaciones hidropónicas grandes para cultivar y alimentar a la población en estas naciones resulta muy valiosa.

Los cultivos hidropónicos y el urbanismo

Los cultivos hidropónicos se incrementaron, ya que al prescindir del suelo incorporaron a la producción grandes áreas urbanas de espacios reducidos (techos, patios, etc.); la

producción por unidad de área es mayor, más limpia y generalmente más sana; las plantas crecen y se desarrollan en un período de tiempo menor, son de mejor calidad y se conservan más atractivas por más tiempo en el estante. El sistema permite cosechar lechugas cada 21 días usando lámparas de alta intensidad de descarga que simulan la luz solar directa. Las técnicas de cultivo sin suelo (CSS) son hoy utilizadas a gran escala en los circuitos comerciales de producción de plantas. Por estas razones, se planteó el desafío de convertir a la hidroponía en un sistema simple y económico que permitiera cultivar con éxito hortalizas, verduras y otras plantas. En los últimos años, el área mundial destinada a la producción hidropónica se ha incrementado considerablemente. Se estima más de 50.000 hectáreas se dedican a la producción hidropónica en el mundo. El sistema mayormente utilizado es el sistema de riego por goteo (90%) empleando como sustrato lana de roca (60%) y sustratos inorgánicos (20%) y orgánicos (10%). Sistemas en agua NFT (Nutrient Film Technique) (7%) y raíz flotante (3%). Los cultivos hidropónicos más rentables son tomate, frutilla, lechuga, espinaca, y flores para corte. Con el común denominador de hidroponía, se hace referencia al sistema que muestra un contacto directo de la raíz con la solución nutritiva prescindiendo de cualquier sustrato. Se ha desarrollado numerosos sistemas de cultivo con soluciones más o menos ingeniosas que permiten que la raíz se aparte en mayor o menor medida de situaciones estresantes. El método hidropónico utiliza cualquier recipiente previamente desinfectado con agua clorada: desde macetas, tubos de PVC enteros o partidos por la mitad, cajas de madera recubiertos con pinturas especiales o láminas plásticas, hasta invernaderos. Dentro del envase se depositan sustratos como grava, arena, piedra pómez, aserrín, arcillas expansivas, carbones, cascarilla de arroz o perlita, estos servirán de apoyo a la planta, o no se coloca nada en los cultivos a raíz flotante. El método es sencillo: se inserta la semilla en un medio que le aporte humedad, se riega con solución nutritiva hasta que la semilla germine y emerja la plántula, luego se trasplanta a su lugar definitivo. Con esta técnica se consiguen vegetales de mejor color, tamaño y valores nutritivos. Al no depender del clima, el producto puede estar en el mercado en cualquier época del año, lo cual es una gran ventaja frente a los cultivados de manera tradicional al aire libre. El precio de los productos hidropónicos generalmente es más elevado por su calidad visual como aspecto comercial (se la observa con muy buen color y limpieza). Esta actividad es una alternativa que permite cultivar en todos los medios y espacios; lo esencial es entregar a la planta a través de la solución (líquido) lo que esta necesita para su adecuada nutrición y controlar la luz y la temperatura.

El futuro

La Hidroponía Popular involucra un cúmulo de conocimientos y desarrollos científicos que se han codificado en un lenguaje sencillo y de fácil comprensión por cualquier persona que desconozca la técnica y que le permite iniciar una experiencia en cualquier espacio soleado de

su vivienda o en sus alrededores, cultivando así hortalizas, verduras o flores de corte. El futuro de las grandes ciudades es actualmente uno de los temas de debate. Se dice que en el año 2050 el 80% de la población mundial residirá en centros urbanos, lo que pone en duda el modelo de crecimiento actual, que no está pensado para satisfacer las nuevas necesidades de la población. El suministro de energía o de agua, el transporte, la gestión de los residuos o los propios sistemas constructivos deberán cambiar para acercarse a un modelo más sostenible, para dar forma a lo que se ha dado en llamar “ciudades inteligentes”. Uno de los problemas que se plantean en las grandes ciudades o centros distantes de los lugares de producción, es el suministro de verduras y hortalizas frescas, hecho que ha abierto nuevos horizontes a estos sistemas de cultivo sin suelo. Los visionarios de la economía ya han hecho sus apuestas y han empezado a difundir un nuevo modelo de cultivo: las granjas verticales (“Vertical Farm”). Éstas “Vertical Farm” consisten en cultivar los vegetales en edificios, en lugar de hacerlo en los campos o en los invernaderos. Esto permite evitar el transporte de alimentos a largas distancias, hecho que consume grandes cantidades de energía fósil. Uno de los expertos que ha dado a conocer esta tecnología es el Dr. Dickson Despommier, de la Universidad de Columbia en Nueva York, principal difusor del concepto de la tecnología “Vertical Farm”. El objetivo es cultivar hortalizas en edificios, o zonas de edificios, adecuados para ello. El cultivo hidropónico (o cultivo sin suelo), es decir cultivar plantas sobre un medio de cultivo o sustrato que sirve de soporte a las raíces y donde se proporciona a las plantas, a través del agua de riego, los elementos nutritivos que necesitan. Por otro lado, como las plantas necesitan luz para la fotosíntesis, ésta se puede aportar mediante iluminación artificial, en la medida que no se disponga de la luz natural suficiente, a través de energías limpias (aerogeneradores, placas solares, etc.). Esta idea (Vertical farm) de cultivo urbano de hortalizas, está bajo estudio o revisión permanente, en numerosas Universidades del mundo. Los estudios son llevados a cabo por equipos multidisciplinarios, con especial participación de agrónomos, ecólogos, fisiólogos y economistas. La incorporación del concepto de ciudad inteligente, la idea de esta nueva modalidad de provisión de alimentos para las nuevas urbes superpobladas, comienza a ser una realidad. Esta herramienta permite el suministro de verduras desde área próximas o muy próximas, aunque no convencionales (patios, terrazas, paredes, etc) a los grandes centros de consumo (hogares, mercados). Las ideas del huerto hidropónico familiar, el huerto hidropónico urbano, la Vertical farm, son sin dudas ideas muy innovadoras y conducen a un sistema de vida diferente, en un paisaje en el que cada uno de los actores comenzará a desarrollar un rol preponderante. Esto es, cada uno de los participantes deberá contemplar desde una óptica sistémica, este nuevo paisaje, luego la producción de alimentos y la sustentabilidad del sistema deberán estar bajo evaluación permanente. Los cultivos hidropónicos también se emplean para la producción de forraje principalmente, para aves y animales herbívoros de granjas. La hidroponía se introdujo a la industria del cultivo de flores, como una alternativa para el manejo de problemas sanitarios, en especial los causados por *Fusarium oxysporum*. Hoy el cultivo hidropónico de clavel, rosas, alstroemerias y muchas otras

especies florícolas es muy común. En Holanda y otros países con alto grado de desarrollo en cultivos intensivos las técnicas de CSS han avanzado, desarrollando industrias conexas y numerosas tecnologías relacionadas con el desarrollo de medios de cultivo como la perlita, la vermiculita, turba, arena y otros medios apropiados. La NASA la ha utilizado desde hace aproximadamente 30 años para alimentar a los astronautas. Hoy en día las naves espaciales viajan seis meses o un año. Los tripulantes durante ese tiempo comen productos vegetales cultivados en el espacio. La NASA ha producido con esta tecnología (Controlled Ecological Life Support System) desde hace mucho tiempo, desarrollando esta tecnología, para la base proyectada en Marte.

El invernadero del futuro

El método aplicado para el 'cultivo hidropónico' y entre sus mayores innovaciones, se encuentra la sustitución del suelo agrícola por soluciones minerales que contribuyen al desarrollo de una cosecha más optimizada y rentable porque dura todo el año. En la práctica, las raíces reciben una solución nutritiva equilibrada disuelta en agua con todos los elementos químicos esenciales para el desarrollo de las plantas. Es una técnica que facilita la planificación del cultivo de los productos porque mantienen a las hortalizas más tiempo en su fase de producción. Este sistema incorpora cuerdas –denominadas tutores– cuya misión es la de sujetar verticalmente y en suspensión las plantas de cultivo. No se trata de un sistema de cultivo vertical. Entre las principales ventajas que aporta el sistema hidropónico figura la capacidad que ofrece esta técnica de conservar las propiedades asociadas al sabor, textura, color y olor de las futuras hortalizas, que logran mantenerse completamente intactas. A esta prestación se une la posibilidad de llevar a cabo el cultivo de las hortalizas en instalaciones cerradas y monitoreadas a través de un sistema informatizado. Además, el sistema hidropónico permite también poder reutilizar drenajes que nos son vertidas en el entorno natural. A este beneficio podemos añadir la posibilidad de poder controlar enfermedades y plagas de las plantas; para ello podemos contrarrestar mejor la acción nociva de hongos y bacterias. En esta línea, el sistema facilita el control biológico con el uso de pequeños insectos depredadores que eliminan los pulgones y gusanos, cuya presencia es muy nociva para la calidad del producto final. La hidroponía de precisión es una ciencia y un arte que ha tomado relevancia en los últimos 50 años. Esta herramienta se ha consolidado como una de las alternativas agrícolas más promisorias. Será la manera de producción de alimentos en la Era Espacial y de los Viajes Interplanetarios, pero también es la herramienta para transformar los paisajes más inhóspitos del planeta en áreas de esparcimiento y con alta capacidad de producción. Los cultivos hidropónicos continuarán siendo un medio seguro y previsible para la producción de alimentos en los submarinos atómicos, en las estaciones de investigación y monitoreo localizadas en alta mar; continuará desarrollándose para garantizar la sobrevivencia de los seres humanos en el

espacio al suministrarle alimento, oxígeno, atrapar del dióxido de carbono, filtrar el agua residual de las naves espaciales y lograr perpetuar la vida más allá de nuestro planeta. La hidroponía acompañada de las decisiones políticas adecuadas, podría convertirse en una herramienta fundamental para luchar contra la pobreza, el hambre y la desnutrición en las áreas o países menos desarrollados del planeta. Existen planes en Instituciones de bien público en que la hidroponía juega un papel importante no solo en lo que hace a la producción de alimentos, sino además en la motivación de grupos marginados socialmente o con capacidades diferentes. La hidroponía es una alternativa a tener en cuenta para incorporar a la producción extensas y crecientes áreas desérticas, contaminadas e inundadas o inundables, producto de la mala utilización de los recursos naturales en nuestro planeta. El crecimiento de las plantas cultivadas en hidroponía es superior al de las plantas en las condiciones convencionales de cultivo, esto hace que la obtención de plantines o plántulas de diversas especies cultivadas en vivero tengan una respuesta muy favorable a los cultivos hidropónicos, se ha demostrado que el crecimiento de especies semileñosas y leñosas es entre tres a cuatro veces mayor en las plántulas cultivadas mediante el sistema hidropónico, comparadas con las desarrolladas en el sistema tradicional. Un cultivo hidropónico realizado en un área confinada y climatizada nos permite asumirlo como un sistema altamente repetible en sus condiciones experimentales, en consecuencia se ha constituido en una de las herramientas más valiosas para la investigación y la enseñanza de la biología, la fisiología vegetal, la ecología y la botánica, para estudiantes en escuelas, laboratorios y universidades en todo el mundo. Además, será el sistema preferido por todas aquellas personas que tienen como hobby el cultivo casero de plantas ornamentales y hortalizas. Finalmente un capítulo a recordar es que en trabajos de investigación, un cultivo hidropónico le permite al operador exponer las plantas cultivadas a las condiciones experimentales más extremas y cambiantes en cortos tiempos y le permite cuantificar cada alternativa. En consecuencia, es una herramienta ampliamente utilizada por la ingeniería genética, ya que encontrará en los cultivos hidropónicos el medio más adecuado para evaluar la bioseguridad de las plantas sometidas a modificaciones genéticas (OMG), antes de ser liberadas para su cultivo en campo abierto y obviamente en condiciones altamente cambiantes.

¿Cuáles son los mitos más comunes de la hidroponía y el cultivo de plantas?

Con la hidroponía las plantas producen una mayor cantidad de frutos.

Este es un dicho muy común, donde la mayoría de las personas que está por iniciar un proyecto de hidroponía supone que con la hidroponía la planta producirá más frutos; sin embargo esto no es verdad.

No todas las plantas se pueden cultivar en hidroponía, especialmente los árboles.

La hidroponía tiene un principio simple. Colocar a la planta en un ambiente inerte y a partir de ahí, nosotros controlar su nutrición. Este principio parte del cultivo en tierra, que es el medio en el que todas las plantas se desarrollan, por lo que si se puede dar en tierra, se puede dar en hidroponía.

La técnica hidropónica de raíz flotante solamente sirve para lechugas.

Es real que en la mayoría de los casos, vemos utilizar la técnica hidropónica de raíz flotante exclusivamente con lechugas; sin embargo dicha técnica puede funcionar con la mayoría de las plantas que su desarrollo sea superficial. Esto significa que la técnica puede funcionar con plantas como el melón, el pepino, etc. y no es apta para plantas como por ejemplo la papa, la cebolla, zanahoria.

Tengo que ser biólogo, químico o agrónomo para poder cultivar por hidroponía.

La hidroponía surge para facilitar el cultivo de plantas de una manera más rápida y controlable, hoy está al alcance de todo aquel que tenga un espacio que reciba luz directa, sin importar su profesión aunque si importa su dedicación.

Tener en cuenta los pro y los contra antes de decidir entre la agricultura tradicional o hidroponía.

Las plantas que crecen en hidroponía representan una gran parte de las frutas, verduras y flores frescas que consumen todos los días. La hidroponía significa que se cultivan sin suelo, es decir utilizando otro sustrato o una solución de agua y nutrientes, así como con luces para su crecimiento. Su cuota importante de participación en el mercado es un claro indicador de que la hidroponía se ha establecido bien en el mundo moderno como una alternativa a la agricultura tradicional.

Conocimiento y puesta en marcha

Para aquellos que no están familiarizados con la hidroponía, el proceso puede parecer extraño y difícil de entender. Los interesados en él pueden aprender con relativa facilidad, ya que no es más que una forma diferente del crecimiento tradicional. Es necesario saber acerca de las necesidades específicas de nutrientes de las plantas para tener éxito con un sistema de cultivo hidropónico. Mientras que la agricultura tradicional tiende a ser más condescendiente con aquellos que no conocen las necesidades específicas de las plantas, para tener éxito con el cultivo hidropónico se requiere el conocimiento de cómo funciona el sistema y lo que las plantas necesitan.

Bibliografía

- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. 2008. Fundamentos de Fisiología Vegetal. 651 pág. McGraw-Hill-Interamericana de España. 2da. Edición.
- Canovas, F.; Díaz, J.R. 1993. Cultivos Sin suelo. Curso Superior de Especialización. Ed. Instituto de Estudios Almerienses. Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. Almería.
- Canovas, F.; Magna, J.J.; Boukhalfa, A. Cultivos sin suelo. Hidroponía. En Técnicas de producción de frutas y hortalizas en los cultivos protegidos del Sureste español. Ed. Instituto de la Caja Rural de Almería. Almería.
- Cultivos sin suelo II. 1999. Dirección General de Investigación y Formación Agraria de la ExJunta de Andalucía. 2da edición actualizada.
- Durany Ulises, C. (1982). Hidroponia-Cultivo de plantas sin tierra. 4th de. Barcelona. Spain, Ed. Sintesis. S.A. (p. 106)
- Epstein, E. (1972). Mineral nutrition of plants; principles and perspectives. New York: Wiley.
- Golberg, A. D. (2008). El agua. De la molécula a la biósfera. 231 pág. Alberto Daniel Golberg y Alicia Graciela Kin 1ra ed. Santa Rosa: Base 1.
- Guzmán Díaz, G. A. (2004 mayo). "Hidroponía en casa: una actividad familiar". San José, C. R. MAG. 25 pp. [en línea]. Consultado el 20 de septiembre de 2014 en http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/Hidroponia.pdf
- Howard, M. Resh, P. (1997). Cultivos Hidropónicos. Nuevas técnicas de producción. Cuarta edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. Barcelona. Mexico.
- La Huerta Hidropónica Popular. Manual Técnico y Curso audiovisual. 2004. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 4ta edición ampliada y revisada.
- Montaldi, E.R.(1995). Principios de Fisiología Vegetal. 298 pág. Ediciones Sur.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2006). Plant physiology. 3ra.Ed 758 pág. Sinauer Associates, Inc. Publisher.

CAPÍTULO 2

El agua en la planta

Marcela Ruscitti

Introducción

El agua juega un rol muy importante en la vida de los seres vivos y, en consecuencia también, de las plantas. La fotosíntesis, uno de los principales procesos fisiológicos de los vegetales, requiere que las plantas tomen CO_2 del aire a través de los estomas y simultáneamente pierdan agua por transpiración, llevándolas a un estado de deshidratación. La deshidratación de las plantas puede causar un estrés hídrico, que según su intensidad y duración, puede repercutir en el crecimiento y en el rendimiento, e incluso producir la muerte. De todos los recursos que la planta necesita para crecer, el agua es el más abundante y muy frecuentemente el más limitante.

El agua es el componente mayoritario de las plantas, puede representar entre un 60 y 90% del peso fresco, según el tejido que se considere. En las plantas el agua cumple funciones de sostén, permite el crecimiento de las células, facilita el enfriamiento de las hojas, es el vehículo para el traslado de nutrientes por el xilema y de fotoasimilados por el floema y principalmente es el medio en el que se desarrollan todas las reacciones químicas.

A pesar del alto contenido de agua que tienen los tejidos vegetales, las moléculas de agua permanecen en la planta, a veces sólo minutos. El agua fluye continuamente desde el suelo o la solución nutritiva, a través de la planta hasta perderse en la atmósfera. Cuando una planta sintetiza 1 Kg de materia seca pasan por ella desde 20 litros de agua, como en el ananá hasta 600 litros como en varias especies de Bromus.

Esta circulación de agua a través de la planta depende del agua disponible, de las características morfológicas y fisiológicas de la especie vegetal y de las condiciones ambientales, en particular la temperatura, el viento y la humedad relativa. El estado hídrico de una planta entonces va a variar permanentemente a lo largo del día y de los días, en función de la cantidad de agua que absorbe por la raíz y la que pierde por transpiración a través de sus hojas. Es posible que en un suelo con buen contenido de agua o en un sistema hidropónico, el balance hídrico de la planta sea negativo porque la pérdida de agua por transpiración excede la absorción desde las raíces. Este balance podrá revertirse cuando disminuya la transpiración y el agua absorbida sea mayor.

La cantidad de agua que la planta puede absorber depende de varios factores como las características físico-químicas del suelo, la distribución de las raíces en el perfil del suelo, la morfología de ese sistema radical y de las estrategias que pueda desarrollar la planta para extraer agua, como el ajuste osmótico. El agua que se pierde por transpiración también va a depender de muchos aspectos como la temperatura y humedad del aire, la velocidad del viento, la irradiancia, el contenido hídrico del suelo, las características morfológicas de la planta (número de estomas, ubicación de los mismos, presencia de pelos, etc) y también las estrategias que desarrolle la planta para evitar la pérdida de agua como, por ejemplo, el enrollamiento o abscisión de las hojas. En un sistema hidropónico, algunas de estas variables se modifican, principalmente en lo que se refiere a la absorción, dado que el agua está siempre disponible en estos sistemas.

El conocimiento de estas consideraciones es de gran importancia y nos permite comprender el balance hídrico de las plantas para hacer un uso racional y eficiente de este recurso cada vez más escaso.

Estructura de la molécula de agua, sus propiedades

La vida está íntimamente asociada al agua, muy especialmente en su estado líquido, la importancia para los seres vivos es consecuencia de sus propiedades físicas y químicas.

El agua es un disolvente para sustancias como sales inorgánicas, azúcares y aniones orgánicos, y constituye el medio en el que tienen lugar todas las reacciones bioquímicas. El agua, en su forma líquida, permite la difusión y el flujo masivo de solutos, y por esta razón es esencial para el transporte y la distribución de nutrientes y metabolitos en toda la planta.

También es importante en las vacuolas de las células vegetales, ya que ejerce presión sobre el protoplasma y la pared celular, manteniendo así la turgencia en hojas, raíces y otros órganos de la planta. En general, la deshidratación de los tejidos, por debajo de un nivel crítico se traduce en cambios irreversibles en la estructura y, finalmente, en la muerte de la planta.

El agua es tan familiar que puede sorprender la afirmación de que es una sustancia anómala, ya que posee propiedades únicas e inusuales para una molécula tan simple. A temperatura ambiente, se encuentra en estado líquido, siendo que por su peso molecular (18 g) debería ser un gas; tendría que convertirse en gas a -80°C en lugar de 100°C y congelar a -100°C , en vez de 0°C . La densidad del agua varía también en forma peculiar, en función de la temperatura; cuando un trozo de hielo se funde, el líquido aumenta su densidad hasta los 4°C y por encima de esta temperatura vuelve a disminuir. Este comportamiento es causado por el aumento de volumen (10%) cuando congela, por lo cual disminuye su densidad.

Estas propiedades tan peculiares de la molécula de agua tienen su origen en su estructura molecular, cuando los átomos de hidrógeno y oxígeno se combinan por enlaces covalentes

para formar agua, se comparten 4 electrones, de tal manera que la molécula se torna estable y muy poco reactiva. La molécula es eléctricamente neutra, considerada como un todo, pero la disposición asimétrica de los electrones hace que un extremo esté cargado positivamente con respecto al otro, entonces el agua se comporta como un dipolo.

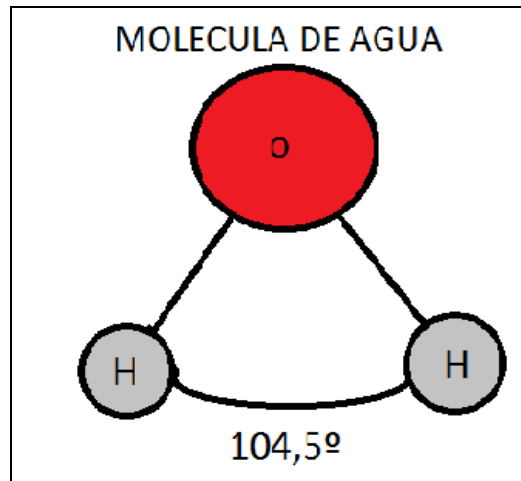


Figura 1: molécula de agua

Muchas de las propiedades del agua se explican mediante el concepto de puente de hidrógeno junto al del momento dipolar. Los puentes de hidrógeno se forman cuando el átomo de hidrógeno de la molécula de agua es atraído por fuerzas intensas de átomos electronegativos (los oxígenos de moléculas contiguas), razón por la cual se lo considera como un enlace entre ambos.

El agua está formada por agregados de moléculas unidas por los puentes de hidrógeno, que si bien son débiles, existen en una cantidad tan numerosa que le otorgan a éste líquido una fuerza de cohesión molecular muy elevada. Esta propiedad tiene implicaciones muy importantes en el ascenso del agua por los vasos hasta las hojas de árboles de gran altura, sin que la columna de agua se rompa y así se corte el flujo de agua. La cohesión de las moléculas de agua hace que se necesite una cantidad de energía muy elevada para provocar la evaporación; por este motivo, la transpiración de las hojas tiene un efecto de enfriamiento importante.

Estado hídrico de la planta, concepto de potencial agua

Todos los seres vivos, incluyendo las plantas, requieren continuamente energía para mantener y reparar sus estructuras altamente organizadas. Procesos como acumulación de

solutos, reacciones bioquímicas, transporte a grandes distancias son realizados por un aporte de energía libre a la planta.

Para comprender la relación planta – agua es necesario definir y determinar el estado hídrico en la célula, el órgano o incluso toda la planta.

El estado hídrico de las plantas se puede estudiar en términos de contenido hídrico, expresado como porcentaje del peso seco:

$$CH = \frac{(PF - PS)}{PS} \times 100$$

CH: contenido hídrico

PF: peso fresco de la muestra

PS: peso seco de la muestra determinado después de mantenerla en estufa a 80°C durante 24 horas

Para evitar los errores que conlleva la variabilidad del peso seco, se expresa el contenido hídrico sobre la base del contenido hídrico a plena turgencia, que pasa a denominarse contenido hídrico relativo (CHR), o el parámetro complementario déficit de saturación hídrica (DSH).

$$CHR = \frac{(PF - PS)}{(PT - PS)} \times 100$$

PT: peso a turgencia plena

$$DSH = 100 - CHR$$

Los conceptos anteriores no permiten determinar el sentido del movimiento del agua desde y hacia las diferentes partes de una planta, ni entre el medio y la planta. La expresión que se utiliza habitualmente para referirse a este intercambio es el potencial químico.

El potencial químico del agua o potencial agua, es una expresión cuantitativa de la energía libre asociada con la planta. En termodinámica, la energía libre representa el potencial o capacidad de un sistema para realizar trabajo útil. El potencial químico es una cantidad relativa, se expresa como la diferencia entre el potencial de una sustancia en un estado dado y el potencial de la misma sustancia en un estado normal. La unidad para expresar el potencial químico es energía por mol de sustancia ($J \text{ mol}^{-1}$). En el caso particular del agua, es el Potencial Agua, que representa la capacidad de realizar trabajo por mol de agua.

El potencial agua, o su capacidad de realizar trabajo, es afectado por cinco factores: concentración, presión, temperatura, gravedad y potencial eléctrico, que pueden actuar aumentándolo o disminuyéndolo. Al ser la molécula de agua neutra, el potencial eléctrico no afecta su potencial químico. Sólo la concentración, presión (o tensión), temperatura y gravedad modifican su valor. Como ya mencionamos, la unidad de potencial agua (Ψ) es energía por mol

de sustancia (J mol^{-1}). Esta unidad no es práctica, por lo cual el potencial agua se expresa en forma de presión (MPa).

El potencial agua, se representa por la letra griega psi (Ψ), es una cantidad relativa al potencial agua del agua pura (Ψ_0) que se toma como referencia y se considera que ejecuta el trabajo útil máximo. $\Psi = \Psi_0 + \text{concentración} + \text{presión} + \text{gravedad} + \text{temperatura}$

Al Ψ_0 se le asignó arbitrariamente el valor de 0 MPa.

Entonces, de acuerdo a lo expuesto, en un sistema particular, el potencial agua total es la suma algebraica de varios componentes:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g$$

siendo Ψ_p , Ψ_s , Ψ_m y Ψ_g componentes debidos a fuerzas de presión osmótica, mátrica y gravitacional, respectivamente.

El componente presión (Ψ_p) representa la diferencia en presión hidrostática con la de referencia, puede ser positivo o negativo. El componente osmótico (Ψ_s) es consecuencia de los solutos disueltos, disminuye la energía libre del agua y es siempre negativo. El potencial mátrico (Ψ_m) es similar al anterior, pero en este caso es consecuencia de las fuerzas en las superficies de los sólidos (coloidales). El componente gravitacional (Ψ_g) es consecuencia de diferencias en energía potencial debidas a la diferencia de altura con el nivel de referencia. Se incluye cuando se considera el movimiento del agua en los árboles cuya altura superen los 10 metros.

$$\Psi_g = \rho_a g h$$

ρ_a : densidad del agua

g : gravedad

h : altura por encima del plano de referencia

El potencial agua caracteriza también el estado del vapor en el aire, siendo función de la humedad relativa y la temperatura:

$$\Psi = \frac{RT}{V} \ln \frac{HR}{100} \quad \text{o} \quad \Psi = 4,608 T \ln \frac{HR}{100}$$

Ψ : potencial agua en MPa

R : constante general de los gases

V : volumen molar del agua

T : temperatura en grados Kelvin

HR : humedad relativa del aire

(Azcón- Bieto y Talón, 2008)

Cuando la HR es del 100%, se aplica en la fórmula respectiva y el $\ln \frac{HR}{100}$ ($100/100 = 1$, \lg de $1=0$), luego el Ψ del aire vale cero. En general, se considera que el potencial agua en las células vegetales viene determinado, fundamentalmente por el potencial osmótico (Ψ_s) y por potencial presión (Ψ_p).

El movimiento del agua a través de una membrana semipermeable, producido por la diferencia de potencial que se genera al agregar un soluto (ψ_s) se llama ósmosis y la presión que se debe realizar para llegar al equilibrio se llama presión osmótica.

La diferencia de potencial agua que se produce entre dos compartimentos provoca el movimiento del agua, siempre el agua se moverá del compartimento con mayor potencial al del menor potencial, así se explica el movimiento del agua desde el suelo hacia las raíces, de las raíces al tallo, luego a las hojas y su pasaje final al aire en forma de vapor.

Muchos procesos fisiológicos como el crecimiento celular, la absorción de nutrientes, la fotosíntesis, la productividad, son fuertemente influenciados por el potencial agua y sus componentes.

Movimiento del agua en la planta, absorción, transporte y transpiración

El movimiento del agua en la planta se produce siguiendo un gradiente de potencial. El agua se mueve desde zonas de mayor potencial a otras de menor potencial hídrico, en las plantas el potencial es más elevado en las raíces, disminuyendo a lo largo del tallo y con los valores más bajos en las hojas. De esta forma se explica cómo el agua se mueve de una célula a otra y también cómo se mueve desde las raíces, a través del tallo y llega a las hojas más altas de los árboles, sin gasto de energía metabólica.

Si bien el pasaje de agua de célula a célula se realiza siguiendo un gradiente de potencial hídrico, como ya se mencionó, la permeabilidad de las membranas celulares cumple un rol importante en dicho movimiento. Antes se creía que el agua difundía a través de la doble capa lipídica y que la permeabilidad de la membrana dependía de los lípidos que la conformaban. Desde hace poco tiempo estos conceptos debieron modificarse con el descubrimiento de ciertas proteínas intrínsecas, tanto en la plasmalema como en el tonoplasto, llamadas “acuaporinas”.

Las acuaporinas son proteínas intrínsecas de las membranas celulares que constan de seis dominios transmembranales, con los extremos N y C terminales hacia el citosol. Generalmente se presentan en tetrámeros, donde cada monómero es un poro independiente. La multiplicidad de isoformas de las acuaporinas y su ubicación en los tejidos, contribuye a determinar las propiedades hidráulicas de los tejidos. Las acuaporinas se expresan en mayor proporción en las raíces, donde media la incorporación de agua desde el suelo o la solución nutritiva. Cuando se estudia el movimiento del agua desde el suelo hacia las raíces y luego a lo largo de toda la planta, se habla del concepto del continuo suelo-planta-atmósfera, es decir, se considera el movimiento del agua desde el suelo hacia las raíces, a través de la planta y hacia el aire, como una serie de procesos estrechamente interrelacionados. A pesar de que este concepto es en

realidad una simplificación excesiva, permite el desarrollo de modelos del movimiento del agua tanto en las células como en comunidades boscosas.

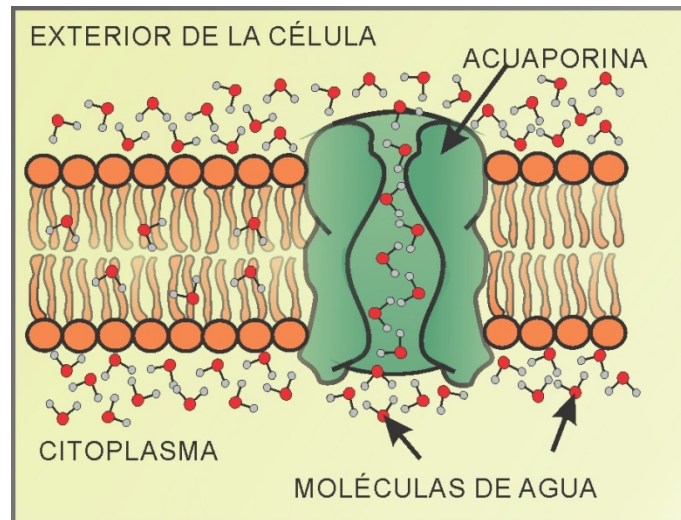


Figura 2: estructura de una acuaporina.

El agua se mueve con facilidad hacia las raíces de la planta siguiendo un gradiente decreciente de potencial hídrico. El íntimo contacto entre la raíz y el suelo es primordial para una efectiva absorción de agua, esto se ve favorecido por el crecimiento de la raíz y la presencia de pelos radicales, que aumentan la superficie de absorción de agua y nutrientes del medio. En una solución nutritiva, el agua y los nutrientes están a disposición de la planta, por este motivo el crecimiento de la raíz no es una estrategia habitual en los cultivos hidropónicos y las raíces de estas plantas presentan menor desarrollo que las que crecen en suelo, en condiciones naturales.

Una vez que el agua ingresa por los pelos radicales, puede moverse por dos vías principales, la apoplástica y la simplástica. La vía apoplástica es aquella que comprende los espacios intercelulares y las paredes de las células y presenta menor resistencia al pasaje de agua. Mientras que en la vía simplástica el agua ingresa a la célula, atravesando la pared celular y la membrana plasmática y se mueve de célula a célula vía plasmodesmos. De esta forma la resistencia al flujo de agua es mayor.

Ya sea por una vía o por otra, para ingresar al cilindro central de la raíz, el agua debe atravesar una membrana celular al encontrarse con las bandas de Caspari, cuyas paredes celulares radiales y transversales están engrosadas, frecuentemente lignificadas e impregnadas de suberina. De esta forma, siguiendo gradientes de potencial, el agua penetra al tejido de conducción.

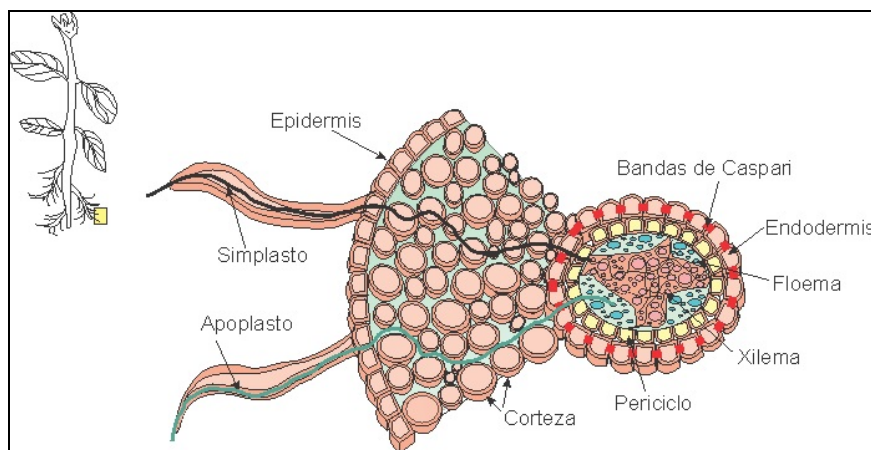


Figura 3: vías de absorción de agua en la raíz.

El suministro de agua por las raíces al tallo puede cambiar según la demanda, por ejemplo, en una planta que está transpirando activamente, la tensión ejercida en el tallo es grande y la resistencia hidráulica de la raíz es baja, y se facilita la absorción de agua con el aumento de la demanda. En cambio, en situaciones donde no se produce transpiración, por ejemplo durante la noche y ante una resistencia hidráulica de la raíz elevada, el suministro de agua que asciende por el tallo será marcadamente menor.

Contrariamente a lo que ocurre en la raíz, en el xilema la resistencia al pasaje del agua es muy baja, dada la anatomía de este tejido. Las células conductoras del xilema tienen una anatomía especializada que permite el transporte de grandes cantidades de agua con una gran eficiencia.

Los vasos leñosos o tráqueas se encuentran en angiospermas y en un pequeño número de gimnospermas. Las traqueidas se encuentran tanto en angiospermas como en gimnospermas. Cada vaso o tráquea está formado por varios elementos o células que al llegar al estado adulto pierden su protopasto, son células alargadas con las paredes secundarias impregnadas de lignina. Esta pared confiere considerable resistencia a la compresión y evita que se colapsen debido a las elevadas tensiones que a menudo experimentan. Las paredes secundarias lignificadas no son tan permeables al agua como las primarias, pero al formarse dejan depresiones, que son sitios delgados y porosos donde las células están separadas solo por las paredes primarias. En las traqueidas, las depresiones se encuentran en los extremos, lo que permite que el agua ascienda de una traqueida a la siguiente, y de esta manera forman filas de células. Los elementos de los vasos poseen placas cribosas en sus extremos, y estas placas presentan aberturas en donde la pared secundaria no se alcanzó a formar y la pared primaria y la lámina media se disuelven. Dichas aberturas permiten un movimiento rápido del agua. Estos elementos se alinean de manera que forman largos tubos llamados vasos que van desde unos pocos centímetros a varios metros. Las traqueidas difieren de los vasos por ser células sin

perforaciones, que presentan pares de puntuaciones areoladas en sus paredes comunes. Son células muertas, alargadas, con los extremos aguzados y una cavidad interior o lumen bastante amplio.

En la mayoría de las plantas, el xilema es el camino más largo para el movimiento del agua, aunque comparado con el pasaje a través de la raíz, es más simple y con una menor resistencia al flujo.

La transpiración es la pérdida de agua en forma de vapor, que se produce en las plantas, a través de los estomas, hacia la atmósfera. Es un proceso de gran importancia para las plantas, porque esta pérdida de agua puede inducir un déficit hídrico y en consecuencia una pérdida económica importante para los cultivos.

El pasaje de líquido a vapor ocurre en las paredes celulares expuestas a los espacios de aire del mesófilo. La pared celular en general está empapada de agua, con un potencial próximo a cero. El aire colindante tiene un potencial más reducido, debido a que se encuentra normalmente no saturado. Esta diferencia de potencial entre el agua líquida de las paredes y la fase de vapor adyacente, provoca la evaporación. El vapor de agua se difunde hacia las cavidades subestomáticas y sale a la atmósfera por los estomas. Entonces podemos decir que la transpiración es la salida de vapor de agua a través de los estomas como resultado de la diferencia de potencial agua entre las hojas y el aire, es un proceso físico e inevitable para la planta.

La apertura y cierre de los estomas es la forma que tienen las plantas de regular la pérdida de agua. A la noche, cuando no hay fotosíntesis y se acumula CO_2 , los estomas se cierran impidiendo la pérdida de agua. A la mañana, con el aumento de la radiación aumenta también la fotosíntesis y la demanda de CO_2 , disminuye la concentración de CO_2 en la cámara subestomática, los estomas se abren y se produce la pérdida de agua por transpiración.

Factores que afectan la transpiración de las plantas:

La carga energética que incide sobre el vegetal: al ser la transpiración un proceso físico de evaporación, la radiación solar que incide sobre la hoja, modifica su temperatura, en consecuencia la humedad relativa y aumenta el gradiente entre la hoja y el aire que la rodea y afecta la intensidad del proceso. A mayor temperatura de la hoja, la pérdida de agua es más elevada.

La humedad relativa del aire (HR): la tendencia del agua a evaporarse es más intensa cuanto mayor es el gradiente de presión de vapor entre las superficies húmedas de las hojas y el aire que la rodea.

El potencial de vapor se calcula conociendo la temperatura y la humedad relativa. Cuando el aire está saturado de humedad su potencial es cero. En esta situación la transpiración es nula. Salvo en aire saturado de humedad, el gradiente de potencial entre las hojas y el aire es muy grande.

Resistencia al flujo de agua desde el suelo hacia la atmósfera: si bien la transpiración es un proceso físico, es regulado por dispositivos biológicos que ofrecen resistencia al flujo del agua

a través de la planta. Estas resistencias se ubican en el suelo, la raíz, el xilema, el mesófilo de las hojas, la cutícula, los estomas y el aire que las rodea. La resistencia del suelo depende de su conductividad hidráulica o impedancia. Cuando la rizosfera agota su contenido de agua útil debe ser reaprovisionada por la de su entorno, para que las raíces no sufran un estrés hídrico. La resistencia de la raíz es una de las más altas al flujo del agua y se debe a los protoplastos de este órgano que deben ser atravesados por el flujo de agua. La resistencia del xilema es muy baja porque es un tejido muerto especializado en la conducción de agua. Su valor es constante y sólo se modifica con el crecimiento del tallo. La resistencia del mesófilo es muy variable y depende de la anatomía de la hoja. Esta resistencia está en relación directa con el área total de la hoja e inversamente proporcional al coeficiente de permeabilidad y el área interna. La resistencia de la cutícula es alta debido a la incrustación con sustancias hidrofóbicas, como la cutina y la lignina. La cutícula puede poseer también adcrustaciones de ceras, en forma de gránulos, placas, bastones o en forma de gotas viscosas semilíquidas. Los estomas ejercen una resistencia muy variable, según su grado de apertura. Cuando están cerrados ejercen una resistencia máxima, aunque no infinita y cuando están abiertos es mínima, pero nunca nula. Esta resistencia es la más importante de la planta y determina la intensidad transpiratoria. La resistencia del aire es la que se le opone a la salida del vapor de agua, es la capa de aire calmo adyacente a la epidermis, la que se denomina capa límite. Cuando el aire está calmo, esta capa posee mayor espesor y se satura rápidamente de vapor de agua, lo que hace casi nulo el gradiente entre la hoja y el exterior. El espesor de la capa de aire calmo varía con la velocidad del viento y el tamaño de las hojas.

Entonces podemos redefinir la transpiración de esta forma:

$$\text{Transpiración} = \frac{\Psi_{\text{hoja}} - \Psi_{\text{aire}}}{\Sigma \text{ resistencias}}$$

Cuando las condiciones ambientales no permiten la transpiración, se produce otro fenómeno llamado gutación, que es la salida de agua líquida con sales a través de los hidatodos, que son terminaciones xilemáticas en las hojas. El agua que penetra en los vasos conductores, desde la raíz, tiende a subir por los mismos si se mantiene una diferencia de potencial agua. La columna ascendente ejerce una presión, llamada presión radical y es responsable del fenómeno de gutación.

Balance hídrico y déficits hídricos ¿cómo afectan el crecimiento de las plantas?

La eficiencia en el uso del agua por parte de las plantas, se expresa como un coeficiente conocido como:

Requerimiento hídrico = agua perdida (Kg) / materia seca formada (Kg)

Los valores más bajos han sido medidos en el ananá (10 a 25) y los más altos en algunas especies de Bromus (900 a 1000).

En condiciones ambientales moderadas, la planta mantiene un grado de turgencia favorable para el metabolismo, sin embargo, a lo largo del día y de los días esta situación suele modificarse.

Los procesos básicos involucrados en el balance hídrico de una planta son la absorción, la conducción y la pérdida de agua. Durante el día el balance hídrico es normalmente negativo y suele restaurarse durante la noche, si hay suficiente agua en el suelo, pero en períodos de sequía, el contenido de agua en la planta no se restablece completamente, entonces el déficit se acumula a través de los días hasta la ocurrencia de una lluvia.

En un sistema hidropónico, no se produce esta situación de déficit hídrico como se produce en el suelo, pero igualmente el balance hídrico de la planta puede ser negativo cuando la pérdida de agua por transpiración supera la absorción por parte de las raíces, aunque las raíces se encuentren sumergidas en la solución nutritiva.

Este balance hídrico negativo produce en las plantas un conjunto de síntomas a nivel morfológico, metabólico y fisiológico. El primer proceso que es afectado es el crecimiento celular y posteriormente la fotosíntesis como consecuencia del cierre estomático. En consecuencia, se produce una disminución de la producción de biomasa y del rendimiento, con gran impacto a nivel agronómico.

En general, las especies difieren en el grado, los mecanismos y el período de tolerancia a este estado hídrico desfavorable. Actualmente es de gran interés conocer estos mecanismos de resistencia que permitirán, por medio de la mejora genética, obtener plantas resistentes a este estrés abiótico. La relación entre las características hídricas de las plantas y los cambios en la expresión génica que caracterizan la adaptación de las plantas al estrés hídrico son aspectos de creciente atención en la investigación actual.

Bibliografía

- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. (2008). Fundamentos de Fisiología Vegetal. 651 pág. McGraw Hill. Interamericana
- Golberg, A. D. (2008). El agua. De la molécula a la biósfera. 231 pág. Alberto Daniel Golberg y Alicia Graciela Kin 1ra ed. Santa Rosa: Base 1.
- Montaldi, E.R.(1995). Principios de Fisiología Vegetal. 298 pág. Ediciones Sur.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2006). Plant physiology. 3ra.Ed 758 pág. Sinauer Associates, Inc. Publisher.

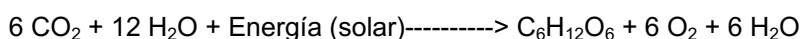
CAPÍTULO 3

Economía del carbono

Daniel O. Giménez

Introducción e Importancia

En la tierra la vida depende de la energía derivada del sol. La Fotosíntesis es el único proceso de importancia biológica que puede transformar esta energía. Los recursos energéticos del planeta son producto de la actividad fotosintética actual (biomasa) o la de tiempos remotos (combustibles fósiles). El término fotosíntesis significa "Síntesis usando luz", es decir que los organismos fotosintéticos usan energía lumínica para sintetizar compuestos orgánicos. La fotosíntesis es la transformación de energía electromagnética en energía química. La energía conservada en estas moléculas orgánicas, constituye el 85%, aproximadamente, de la materia seca de las plantas y se distribuye entre los distintos órganos de las mismas (hojas, tallos, raíces, frutos y órganos de reserva) en forma variable según la especie, el estado ontogénico de la planta y las condiciones ambientales a las que se halla expuesta. Estos productos de la fotosíntesis constituyen la materia prima para "fabricar", tanto tejidos y estructuras funcionales del vegetal, como para ser usada más tarde para el desenvolvimiento de procesos metabólicos en la planta, a partir de la energía obtenida por oxidación total o parcial de éstos fotosintatos en la respiración. Así la fotosíntesis representa el primer eslabón en la cadena alimentaria en la tierra, por proveer la energía necesaria para todos los procesos vitales en los seres autótrofos y la energía necesaria para el crecimiento y desarrollo de los organismos heterótrofos. En forma muy simplificada se puede resumir la reacción global de la fotosíntesis del siguiente modo

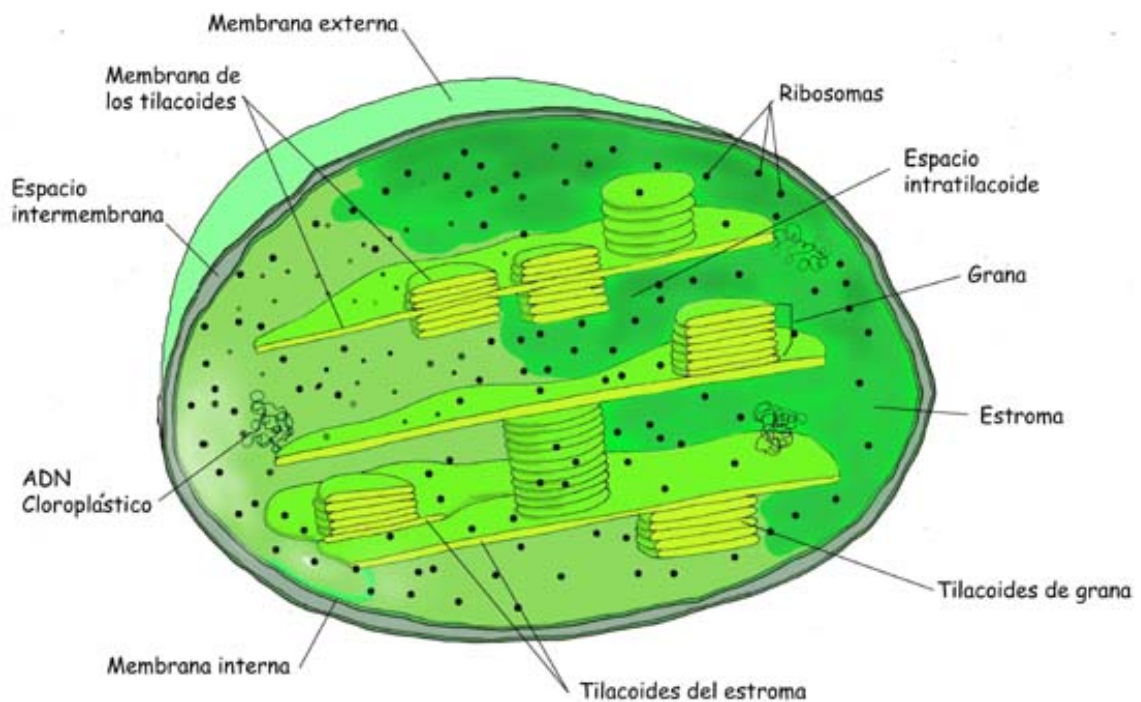


La actividad fotosintética transformó la superficie del Planeta y su atmósfera. La superficie de la tierra y los mares, mantienen la materia viva, el humus de los suelos y los combustibles fósiles, en la atmósfera se consume y consumió el CO_2 y liberó oxígeno, llegando al 21% del volumen de la atmosfera, esta gran cantidad de O_2 permitió la formación de O_3 (ozono) que absorbe la radiación ultravioleta y permite la vida en la superficie de la tierra fuera de los océanos, mares y lagos. Al pasar la atmósfera de

reductora a oxigénica, aparecieron los organismos autótrofos y heterótrofos aeróbicos (consumidores de O_2 para la obtención de ATP), como la célula vegetal y animal. El conocimiento de las bases físicas, químicas y fisiológicas de los procesos fotosintéticos es primordial para el cultivo de plantas a la hora de conocer las variables que condicionan la ganancia, pérdida y distribución de materia seca en un cultivo, con el fin de optimizar estas funciones y en consecuencia la productividad de los sistemas, ya sea que se trate de hortalizas, granos, frutos, tubérculos, fibras, forrajes, madera, etc.

Compartimentalización del proceso

El tejido más activo en la fotosíntesis de plantas superiores es el mesófilo de las hojas, otras partes verdes de la planta como tallos, pecíolos, epidermis de frutos, fotosintetizan, aunque en menor proporción. El mesófilo de las hojas posee un gran número de cloroplastos, los cuales contienen los pigmentos especializados en la absorción de la energía lumínica. Cada cloroplasto está rodeado de una doble unidad de membrana que regula el transporte dentro y fuera de él. Dentro del cloroplasto, se encuentra un material amorfo, con apariencia de gel y profusa actividad enzimática, llamado estroma, que contiene, entre otras, las enzimas que convierten el CO_2 en carbohidratos. Incluido en el estroma, se encuentran las membranas llamadas tilacoides, que contienen los pigmentos clorofilianos, en los cuales la energía de los fotones de luz es usada para producir la oxidación del átomo de oxígeno de la molécula de agua y producir compuesto de alta energía como el ATP y NADPH. En ciertas porciones del cloroplasto, los sacos tilacoidales se superponen formando los grana. Los tilacoides conectan los granas entre sí en toda la extensión del estroma del cloroplasto. Entre las dos membranas de cada tilacoides, existe una cavidad llamada lumen que contiene agua y sales disueltas, que juega un rol especial en la fotosíntesis. Los pigmentos presentes en las membranas tilacoidales, tienen como función ser fotorreceptores de la radiación solar y constan de dos tipos fundamentales de clorofilas: clorofila a y clorofila b. Existen también pigmentos naranja-amarillos llamados carotenoides con formas hidrocarbonadas puras o carotenos y con átomos de O_2 en su molécula o xantofilas. Además, en el estroma del cloroplasto existen moléculas de ADN, ARN, y ribosomas que codifican algunas proteínas.



Etapas del proceso fotosintético

Para una mejor comprensión se puede considerar al proceso fotosintético como la resultante de tres procesos parciales que se interrelacionan, en forma condicionada por factores externos o del ambiente e internos o de la propia planta.

Estos procesos parciales son:

Etapa difusional: Es la difusión del CO_2 desde el ambiente que rodea la hoja hasta el cloroplasto.

Etapa fotoquímica: Caracterizada por la intercepción de luz por parte de los pigmentos fotorreceptores de la hoja y su transformación en energía química bajo la forma de NADPH y ATP.

Etapa bioquímica: Consistente en la utilización de los productos obtenidos en la etapa fotoquímica (o fase lumínica) para la reducción de del CO_2 a hidratos de carbono y otros productos secundarios.

Etapa difusional

La concentración de CO_2 en los cloroplastos de una hoja expuesta a la luz es considerablemente menor que la del aire externo. El movimiento de las moléculas de CO_2 se

produce por difusión a lo largo del gradiente de concentración entre el aire y el cloroplasto. El movimiento de la molécula de CO_2 , desde la atmósfera hasta el estroma del cloroplasto, encuentra una serie de resistencias. La capa límite, tal como se ha visto en el caso de la transpiración, esta resistencia es importante y será función de la velocidad del viento, de la forma y el tamaño de la hoja y de su indumento. El CO_2 debe difundir a través de los estomas o, en mucho menor grado, de la cutícula. La resistencia estomática puede variar en función del grado de apertura del ostiolo, la intensidad de la luz a la que se halla expuesta la hoja, la concentración de CO_2 , el potencial agua de la hoja, etc. Bajo condiciones de sequía, los estomas pueden estar cerrados y esta resistencia puede convertirse en la más importante de la cadena que debe atravesar desde la atmósfera hasta el cloroplasto. Finalmente, la molécula de CO_2 , debe disolverse en el agua que baña las paredes de las células del mesófilo y difundir, ya en fase acuosa, hasta el cloroplasto. Las resistencias de la capa límite y estomáticas a la difusión del CO_2 son conceptualmente equivalentes a sus homólogas para el vapor de agua, si bien difieren en valor absoluto por que el CO_2 , al ser una molécula más pesada que el agua, difunde más lentamente. Esta resistencia difiere de las anteriores por que incluye la solubilización del CO_2 en agua, pudiendo haber cambios en su forma química. En la mayoría de las situaciones fisiológicamente importantes, los efectos de los factores ambientales (velocidad del viento, temperatura, potencial agua de la hoja, intensidad de la luz) sobre la resistencia de la capa límite y, más especialmente, sobre la resistencia estomática, son los que determinan la tasa de este proceso parcial.

Etapas fotoquímica o fase lumínica

En la fotosíntesis, la energía solar es usada por la planta para la oxidación de la molécula de O_2 del agua, con su consecuente liberación de O_2 y formación de NADPH y ATP que se utilizarán para la reducción del carbono del CO_2 en compuestos orgánicos. La compleja serie de reacciones que culminan en la reducción de CO_2 , incluye reacciones en una fase lumínica (dependientes de la luz) y otras en una fase bioquímica. Las primeras ocurren en las membranas internas de los cloroplastos llamadas tilacoides. Los productos finales de estas reacciones lumínicas son un compuesto dador de energía, el ATP y un compuesto con gran poder reductor, el NADPH, usados ambos en la síntesis de azúcares.

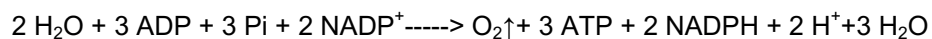
Características de la radiación electromagnética:

La energía radiante se puede considerar como integrada por una serie de partículas o fotones. Cada fotón es un paquete discreto de energía o quantum. La energía de ese paquete

energético o quantum es una función de la longitud de onda ($\lambda = \text{lambd}$ a). Dentro del espectro general de la radiación electromagnética, solamente es efectiva en el proceso fotoquímico de la fotosíntesis la radiación de longitudes de onda entre 400 y 700 nm. Este rango corresponde aproximadamente al de la sensibilidad del ojo humano, o sea la luz visible. Dentro de ese rango los cuanta de luz azul ($\lambda = 450\text{-}490$ nm) tendrán un contenido energético mayor que los de la luz roja ($\lambda = 610\text{-}750$ nm). Un haz de luz puede caracterizarse por su calidad, color o longitudes de onda que lo conforman y por la energía por unidad de área y de tiempo o el número de fotones por unidad de área y de tiempo, lo que es denominado irradiancia. Es conveniente por lo tanto tener una idea de la intensidad de la radiación fotosintéticamente activa a plena luz solar (mediodía de un día de verano, con cielo despejado y para latitudes locales) para usar como punto de referencia. En las condiciones mencionadas la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos (400-700 nm) se acerca a los 2000 μmoles de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($2000\mu\text{Einstein m}^{-2}\text{s}^{-1}$). La radiación que incide sobre una hoja puede ser absorbida, reflejada o transmitida. La mayor reflexión y transmisión es en la zona del verde, combinado con la mayor sensibilidad del ojo humano a radiaciones de esa longitud de onda, hace que se perciban visualmente las hojas de este color.

Características de los pigmentos fotorreceptores

La etapa fotoquímica de la fotosíntesis se caracteriza por la acción regulada y conjunta de dos elementos asociados: los complejos antenas y los centros de reacción. Las antenas son complejos proteicos que contienen gran cantidad de moléculas de clorofila a y b. Su función es captar la luz y conducir la energía de excitación hacia los centros de reacción. Los centros de reacción son complejos proteicos asociados a un par de moléculas especiales de clorofila ubicadas en las membranas tilacoidales y son denominados, por su pico máximo de absorción, como Clorofila a P680, para el centro activo del fotosistema II y de Clorofila a P700, para el centro activo del fotosistema I. Los reactivos y productos involucrados en la etapa fotoquímica pueden representarse:



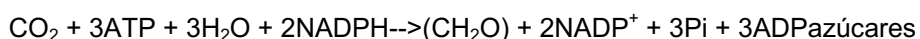
Etapa bioquímica

Esta etapa tiene lugar en el estroma del cloroplasto. El ATP y el NADPH obtenidos en la etapa fotoquímica son utilizados para la reducción del CO_2 a hidratos de carbono y otros compuestos. La fijación del CO_2 en este proceso, se produce a través de una de dos vías

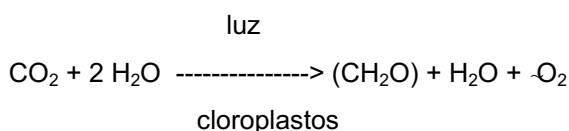
metabólicas distintas, caracterizadas por el número de átomos de carbono del primer compuesto estable:

Fijación de CO₂ en planta de C₃

En las plantas de tipo C₃, el compuesto aceptor del CO₂ es la ribulosa 1,5 bifosfato, cuya carboxilación es catalizada por la Ribulosa 1,5 difosfatocarboxilasa (Rubisco) en el ciclo de Calvin, para dar dos moléculas de 3-fosfoglicerato, la segunda etapa se caracteriza por la reducción de estas a dos moléculas de triosa-fosfato (3-Pi, Gliceroaldeído), con utilización de 2 NADPH y 2 ATP, y la tercera etapa es llamada regenerativa y consiste en la regeneración de la ribulosa 1,5 bifosfato, para lo cual se consume otro ATP. Para reducir un CO₂ se consumen 2 NADPH y 3 ATP. La enzima Rubisco necesita la presencia de luz para ser sintetizada y en oscuridad se desactiva. Es la proteína más abundante en la naturaleza y puede llegar a constituir hasta el 50% de las proteínas de las hojas. Podemos esquematizar esta etapa bioquímica de la fotosíntesis mediante la siguiente reacción



La velocidad de esta reacción depende de la temperatura. La resultante final de las reacciones de las etapas fotoquímicas y bioquímicas de la fotosíntesis, se puede resumir como



La presencia de agua en ambos términos de la ecuación subraya el hecho que la fotosíntesis es un proceso de oxido-reducción, y que el oxígeno desprendido proviene del agua. Es importante reconocer que la luz también puede influenciar directamente la actividad de enzimas involucradas en la etapa bioquímica.

Fijación de CO₂ en planta de C₄

Este proceso está compartimentalizado en una estructura distinta del mesófilo de las hojas llamada de doble anillo o estructura Kranz, y las primeras reacciones metabólicas son a través de la vía de Hatch-Slack. En el citoplasma de las células del mesófilo la enzima Fosfoenolpiruvatocarboxilasa (PEP carboxilasa) toma el CO₃H⁻ y carboxila al ácido Fosfoenolpirúvato dando el Oxalacetato de cuatro carbonos, luego el Oxalacetato es reducido en el cloroplasto ácido málico, que sale del cloroplasto y pasa por los plasmodesmos a la

células de la vaina del haz vascular. En el citoplasma de las células de la vaina, el malato se desdobla en CO_2 y piruvato, el CO_2 entra al Ciclo de Calvin y es tomado por la Rubisco. El piruvato pasa a las células del mesófilo y consumiendo 2 ATP regenera el fosfoenolpiruvato. Para reducir un CO_2 a través de la vía de Hatch-Slack se consumen 2 NADPH y 5 ATP.

Con respecto a la cinética de las enzimas carboxilasas intervinientes en este doble ciclo la PEP carboxilasa tiene mucha más afinidad por el sustrato CO_3H^- que la Rubisco por el CO_2 . La Rubisco de la vaina tiene alta concentración de CO_2 , por lo que no actúa como oxidasa y tiene una mayor asimilación de CO_2 por lo que a estas plantas se las llama de alta eficiencia.

Interacción entre las distintas etapas de la fotosíntesis

La presentación anterior nos permite vislumbrar algunas de las relaciones que pueden existir entre los distintos procesos parciales de la fotosíntesis. La tasa máxima potencial del proceso fotoquímico dependerá, de la cantidad de fotones absorbidos, pero esto será solo si el suministro de ADP, P inorg. Y NADP^+ es adecuado. La principal fuente de estos productos en una célula en la que se lleva a cabo la fotosíntesis es precisamente la etapa bioquímica, y cualquier restricción en la operación de esta última (falta de CO_2 , bajas temperaturas, etc.) afectará que la energía radiante absorbida por el sistema fotoquímico pueda transformarlos en ATP y NADPH. Análogamente, la máxima velocidad potencial del proceso bioquímico, dependerá de la concentración y actividad de las enzimas involucradas en la fijación de CO_2 y su transformación posterior en hexosas. Cualquier limitación en el suministro de CO_2 y/o en productos como ATP y NADPH, reduce la tasa de este proceso, por debajo de su máximo potencial. Limitaciones a las tasas de cualquiera de los otros procesos parciales reducirá el consumo de CO_2 en los sitios de carboxilación lo que llevaría a un aumento en la concentración de CO_2 en la cámara subestomática y a un cierre parcial de estomas que, a su vez, determinaría una reducción en el flujo de CO_2 hacia esos sitios de carboxilación. Estos ejemplos sencillos sirven para apreciar las interrelaciones entre los tres procesos parciales e indicar algunos de los mecanismos de control recíprocos. La existencia de mecanismos que aseguran un funcionamiento armónico de los procesos parciales lleva al reconocimiento de que en un momento determinado un factor externo particular (luz, temperatura, concentración de CO_2 , O_2 , etc.) que tiene su efecto primario en uno de los procesos parciales, puede ser el principal limitante del funcionamiento del proceso total.

Fotorrespiración

Este proceso de fotorrespiración ocurre en células que tienen cloroplasto y metabolismo de tipo C3 y que en presencia de luz, absorbe O_2 y libera CO_2 como en la escotorrespiración, pero

no produce ATP ni poder reductor (NADH o NADPH), se puede perder hasta el 50% del CO₂ fijado por fotosíntesis.

A nivel celular esta compartimentalizado en tres organelas cloroplasto, peroxisoma y mitocondria. El sustrato, como en el ciclo de Calvin, es la ribulosa 1,5 bifosfato, que en presencia de O₂ la enzima Rubisco actúa como oxidasa y da una moléculas de 3-fosfoglicerato (3 átomos de C) y otra de 2- fosfoglicolato (dos átomos de C), esta pierde el Pi y pasa al peroxisoma, donde es oxidado a glioxilato, consumiendo O₂, luego por acción enzimática incorpora un grupo amino y se sintetiza la glicina, que pasa a la mitocondria donde dos moléculas de glicina dan una de serina (3 carbonos), CO₂ y NH₄⁺, como puede apreciarse en la fotorrespiración se consume O₂ y se libera CO₂, además con la serina se recuperan tres C que vuelven al ciclo de Calvin después de su desaminación en el peroxisoma.

Factores ambientales que afectan la fotorrespiración

La luz que activa la enzima Rubisco y provee del sustrato ribulosa 1,5 bifosfato, por lo que, **cuanto mayor intensidad lumínica, mayor es la fotorrespiración.**

Concentración de O₂, es un sustrato del proceso por lo que a medida que aumenta la concentración, aumenta la actividad y no se satura la reacción.

Concentración de CO₂, la enzima Rubisco tiene más afinidad por el CO₂ que por el O₂, en la proporción de ambos en la atmósfera y en el mesófilo de las hojas lleva a un equilibrio entre la actividad como carboxilasa y oxidasa, pero si aumenta el CO₂ como es el caso de las células de la vaina en plantas C4 se comporta como carboxilasa y la fotorrespiración en este tipo de plantas no es detectable.

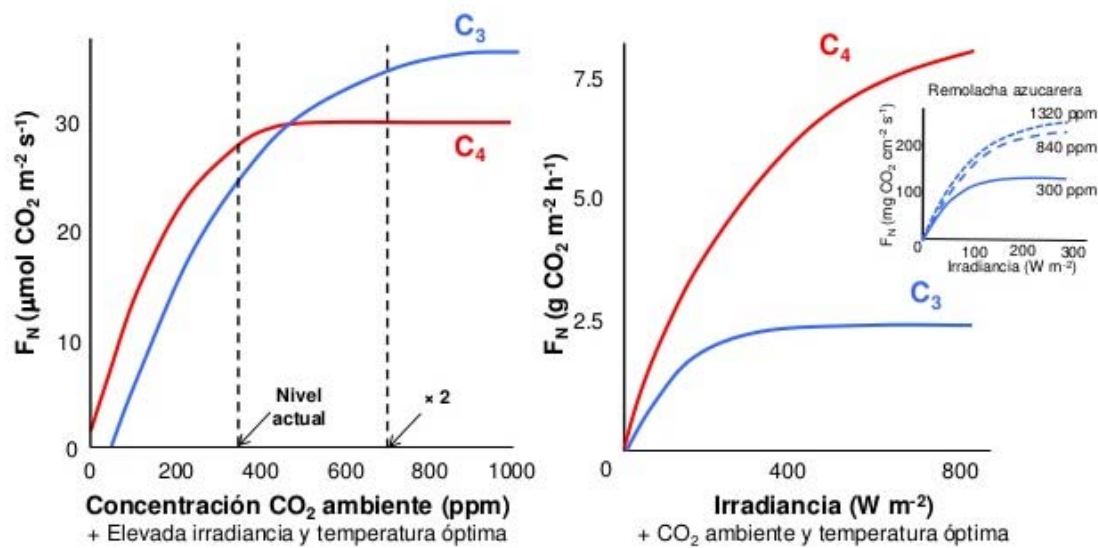
Temperatura de las hojas, este proceso es puramente enzimático por lo que la temperatura lo afecta, a medida que aumenta la temperatura, aumenta la actividad de la enzimas hasta los 44-45°C. La solubilización del O₂ en agua disminuye con la temperatura, pero aún menos soluble en agua es el CO₂ con el aumento de la temperatura, ambos son sustratos de la Rubisco, al aumentar la temperatura, aumenta la proporción a favor del O₂ por lo que disminuye menos la fotorrespiración.

Deficit hídrico, afecta la fotorrespiración por su efecto sobre el cierre estomático, por el cual no hay intercambio gaseoso, y limita los sustratos del proceso, ribulosa 1,5 bifosfato y O₂.

Factores que afectan la fotosíntesis en plantas C3 y C4

Irradiancia, como puede observarse en el gráfico donde se representa el Intercambio Neto de CO₂ (INC) en función de la irradiancia en las plantas C3 de sol, el INC la limitante es la

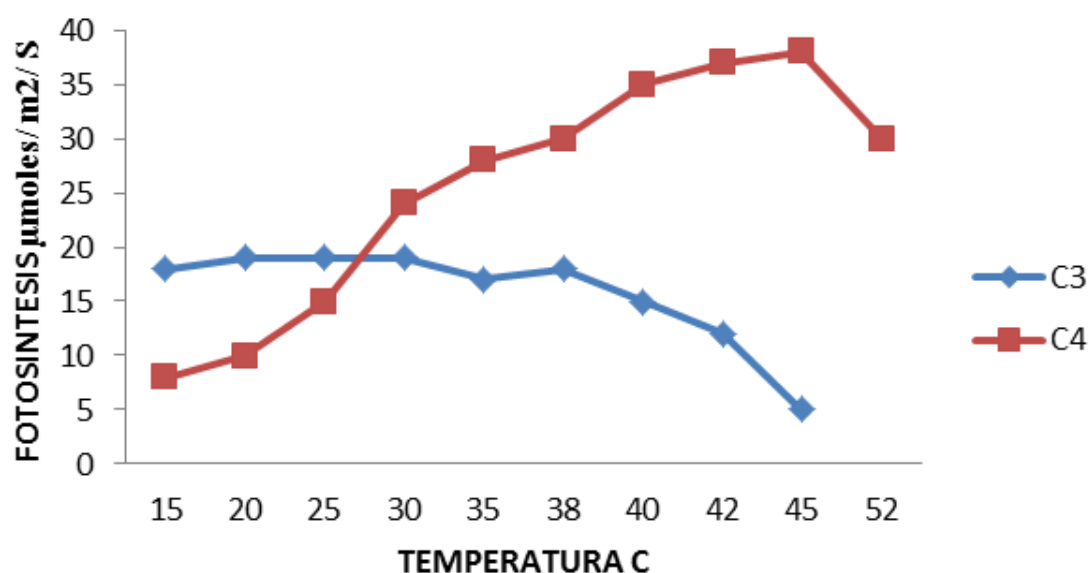
irradiancia hasta que se satura entre $800-1000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, experimentalmente se demostró que la limitante luego de esa intensidad de luz es la concentración de CO_2 , en cambio en las plantas C4 la limitante de la producción es siempre la irradiancia, el motivo de estas diferencias esta en el hecho que, la alta concentración de CO_2 en las células de la vaina, por la liberación del malato, hacen que la enzima Rubisco se comporte solo como carboxilasa, y la fotorrespiración no sea detectable. El Punto de Compensación Lumínico (PCL) es mayor en plantas C4 que C3 dado por el mayor gasto en ATP para mantener el doble ciclo de carboxilación en C4.



Concentración de CO_2 , en el grafico se presenta el INC en función de la concentración de CO_2 con una irradiancia constante de $1000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Se observa que en plantas C3 a medida que aumenta el CO_2 aumenta el INC, el Punto de Compensación de CO_2 (PC- CO_2) se da a 30-70 ppm, mientras que en plantas C4 el PC- CO_2 es de 0-5 ppm y aumenta hasta 400 ppm que es donde se satura. Este comportamiento de las plantas C4 es por la afinidad de la enzima PEP carboxilasa por el sustrato CO_3H^- que le permite absorber todo el CO_2 del medio, luego con el aumento del CO_2 en las células de las vainas se satura a 400 ppm, en la Plantas C3 siempre la limitante es el CO_2 y no se satura y sigue aumentando hasta que se cierran los estomas a 1.500-2.000 ppm de CO_2 . Este comportamiento se debe por una menor afinidad de la Rubisco por el CO_2 y por presentar fotorrespiración.

Concentración de O_2 , solo afecta a las plantas C3 ya que la Rubisco con una mayor concentración de O_2 de 1-2% aumenta el comportamiento como oxidasa. Con una concentración de 0,5-1,0% de O_2 los valores de fotosíntesis aumentan próximos a una planta C4, pero a la concentración ambiental 21% es la mitad.

Temperatura de las hojas, el comportamiento a las temperaturas se deben a las adaptaciones de ambos tipos de especies, las C3 están adaptadas a zonas templadas y las C4 a zonas cálidas, por lo que el plantas C3 la fotosíntesis puede comenzar a -5°C y en Plantas C4 a 10°C y las óptimas pueden ser de 20-25°C en C3 y 40-45°C en C4. Con respecto al INC al aumentar la temperatura aumenta más la fotorrespiración que la respiración y esta mas que la fotosíntesis como se expreso en los factores que afectan a la fotorrespiración, este hecho hace que en plantas C3 a partir de 20-25°C disminuya el INC, cuando se fertiliza con CO₂ por ejemplo 1000 ppm al estar inhibida la fotorrespiración esta disminución no se produce y le INC aumenta hasta un óptimo de 35-40°C. En este caso también a partir de 20 °C aumenta el INC llegando al doble los valores en su óptimo. En las plantas C4 la fertilización con CO₂ el INC no es afectado



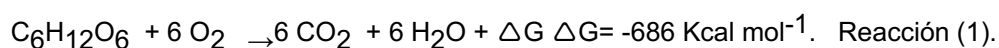
Déficit hídrico, como en la fotorrespiración el INC se encuentra limitado por el cierre estomático.

Escotorrespiración

La respiración que analizaremos en este capítulo es la llamada mitocondrial o respiración “oscura” o “escotorrespiración”.

No todas las células poseen cloroplastos y no siempre la luz está presente, por lo tanto hay partes de la planta que no fotosintetizan (raíces, tubérculos, rizomas, bulbos, ciertos tejidos de la parte aérea de la planta como: yemas, médula, floema, etc.), de manera que hay células que deben obtener energía de otros procesos para conservar las estructuras, crecer o realizar trabajo fisiológico (absorción de iones y transporte de sustancias).

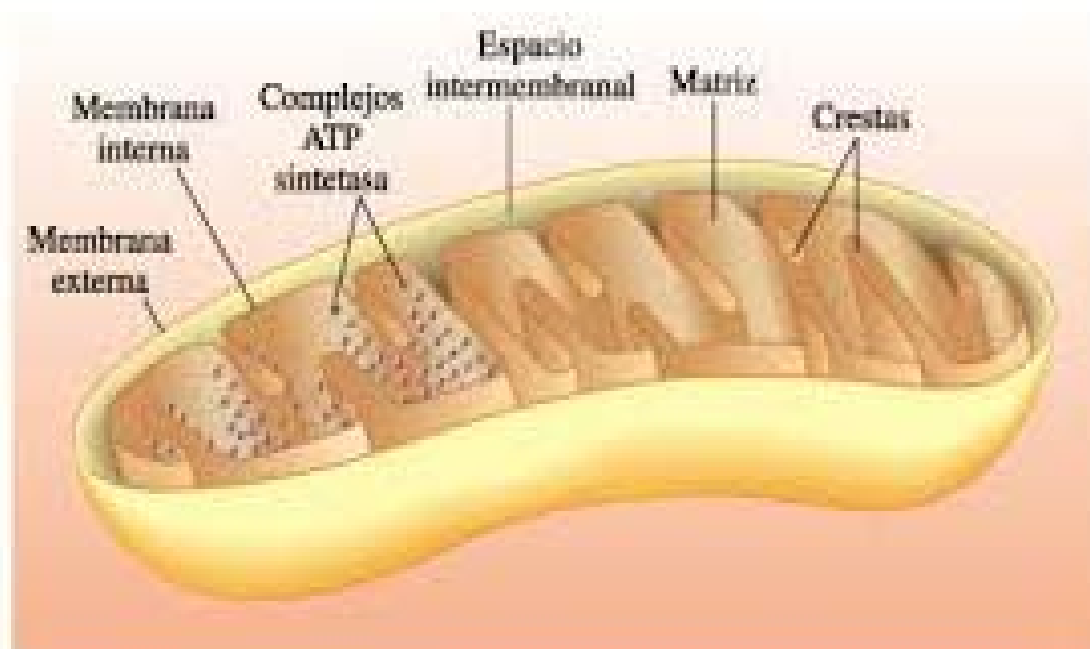
En las plantas, la energía que consume la raíz se sintetizó en las hojas, pero no llega a la raíz en forma de ATP (éste compuesto no sale de la célula) esa energía se transporta por medio de moléculas de azúcares. Todas las células vivas de las plantas respiran continuamente: absorbiendo O₂ del medio y liberando CO₂. El proceso completo de respiración implica una serie de reacciones de oxido-reducción, en las que los sustratos respirados son oxidados a CO₂, y el O₂ absorbido es el aceptor final de los electrones y es reducido formando agua. Los sustratos respirables pueden ser: fructanos, sacarosa, u otros azúcares; lípidos, ácidos orgánicos y en determinadas condiciones hasta proteínas (aminoácidos). La reacción general de la respiración de la glucosa puede representarse como sigue:



Esta ecuación general es igual que la de la combustión, pero a diferencia de esta, solo parte de la energía producida por esta reacción se libera en forma de calor, pero otra parte importante es almacenada en forma de ATP, que es utilizado luego en otros procesos endergónicos de la célula. La combustión ocurre espontáneamente y necesita una energía de activación, la respiración ocurre en numerosas etapas en donde intervienen enzimas que son las que aceleran las reacciones y la permiten realizar a temperatura ambiente en un medio acuoso.

Estructura de la mitocondria

Para entender algunas características de la respiración, es necesario conocer la estructura y propiedades de esta organela. Cada mitocondria está rodeada de una doble unidad de membrana con un extenso sistema de membranas internas. Cada célula vegetal contiene algunos cientos de mitocondrias, lo que depende de la actividad celular. La membrana interna de la mitocondria, es altamente invaginada, penetrando dentro del interior de la matriz. Cada invaginación de la endomembrana, es denominada cresta. En la mayoría de las mitocondrias en células vegetales, estas crestas están bien desarrolladas pero esto varía en función del tipo de célula, la edad y su estado de desarrollo. Las crestas contienen la mayoría de las enzimas que catalizan los pasos del sistema de transporte de electrones que sigue al ciclo de Krebs. Las reacciones que constituyen el ciclo de Krebs ocurren en la matriz de las mitocondrias, entre las crestas. La matriz también contiene ADN, ARN y otros sistemas enzimáticos.

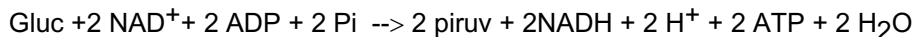


Etapas de la Respiración:

La reacción (1) no deja de ser una representación global muy simplificada, ya que al igual que en la fotosíntesis, el proceso implica una serie de más de 50 reacciones, cada una de ellas catalizada por una enzima específica y diferente, que ocurren en medio acuoso, con un pH cercano a la neutralidad, a temperaturas moderadas. Considerando la gran cantidad de energía obtenida por la oxidación de la glucosa por ejemplo, es necesario pensar que la respiración es un proceso de múltiples pasos, en los cuales la glucosa es oxidada a través de una serie de reacciones que pueden ser subdivididas a su vez según su naturaleza y compartimento en:

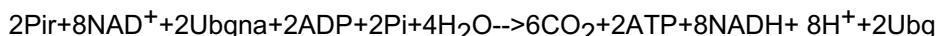
- 1) glicólisis
- 2) ciclo de ácidos tricarboxílicos o ciclo de Krebs
- 3) cadena transportadora de electrones.

La glicólisis es llevada a cabo por un grupo de enzimas solubles localizadas en el citosol. El sustrato más utilizado es la glucosa (de ahí el nombre de glicólisis) que para iniciar su degradación debe estar activada (fosforilada), si no lo está se consume un ATP y se fosforila en el C6, glucosa-6-fosforilada. Si proviene de la hidrólisis del almidón ya esta fosforilada y soporta una oxidación parcial, para producir dos moléculas de piruvato (un compuesto de 3 carbonos), dos ATP y poder reductor almacenado en forma de NADH. En este proceso no hay consumo de O_2 ni liberación de CO_2 . La reacción química se puede representar como sigue:



En la membrana externa de la mitocondria ocurre la oxidación y descarboxilación del piruvato, en estas reacciones se produce CO_2 , NADH y Acetil-CoA. El ciclo de Krebs y la cadena transportadora de electrones, están ambos localizados dentro de la mitocondria. El ciclo de Krebs, se lleva a cabo en la matriz de la mitocondria y brinda una completa oxidación del piruvato, a CO_2 y genera poder reductor y dos ATP por molécula de glucosa.

La reacción que resume este proceso es la siguiente



La cadena transportadora de electrones, se lleva a cabo en las crestas mitocondriales y consiste en proteínas transportadoras de electrones unidas a la membrana interna de la mitocondria. Este sistema transfiere electrones desde el NADH y Ubiquinol producidos durante el ciclo de Krebs y la glicólisis hasta el oxígeno, a través de sucesivos pasos de una oxidoreducción secuencial de compuestos específicos. En la cadena transportadora de electrones se produce un gradiente electroquímico o fuerza protónica provocado por la transferencia de H^+ desde la matriz hasta el espacio intermembranal. Esta diferencia de concentración de H^+ , es utilizado por la ATP sintasa para producir un ATP por el pasaje de dos H^+ a través de su complejo de proteínas. La cadena transportadora de electrones remueve una gran cantidad de energía libre, gran parte de la cual es conservada a través de la conversión de $\text{ADP} + \text{Pi}$ a ATP. Esta última etapa completa la oxidación de la glucosa:



Los esqueletos carbonados intermedios, que no son oxidados completamente a CO_2 , son usados para la síntesis de un gran número de productos esenciales para la vida de las plantas como por ejemplo: aminoácidos (proteínas), nucleótidos (ácidos nucleicos), precursores carbonados para pigmentos porfirínicos (clorofila y citocromos), lípidos, esteroides, carotenoides, pigmentos flavonoides (antocianos), lignina y otros compuestos aromáticos. La escotorrespiración tiene una eficiencia energética del 64 % dado que se sintetizan 36 ATP de los 57 teóricos posibles ($686 \text{ Kcal mol}^{-1} / 12 \text{ Kcal mol}^{-1}$ de la hidrólisis de un ATP), el resto de la energía se disipa como calor.

Factores que afectan la respiración

La respiración no es una reacción aislada, sino un fenómeno donde intervienen:

Procesos Físicos: difusión de O_2 y CO_2

Procesos Químicos: glicólisis, ciclo de Krebs, transporte de electrones, donde se requieren sustratos e intervienen enzimas que pueden estar reguladas.

Procesos Biológicos: transporte de sustancias a través de membranas, apertura y cierre de estomas, etc. Cada uno de estos procesos puede estar afectado directa o indirectamente por factores externos e internos.

Disponibilidad de sustrato: la actividad respiratoria depende de la presencia de una fuente de sustrato y consume azúcares, lípidos, ácidos orgánicos y aminoácidos. La actividad es menor cuando tienen poco almidón o azúcares de reserva y generalmente aumentan cuando se le suministran azúcares. A medida que disminuyen los azúcares, disminuye la actividad y se consumen los lípidos que son degradados por β oxidación, entrando al ciclo de Krebs como Acetil-CoA, luego se consumen las proteínas, entrando los aminoácidos por la glicólisis o por el ciclo de Krebs. En el caso del consumo de proteínas se libera NH_4^+ que es tóxico (desaclopante) por lo cual debe ser neutralizado en forma de asparagina o glutamina.

Influencia del O_2 : es poco afectada por la concentración de O_2 de la atmósfera, es nula en ausencia de O_2 y aumenta hasta $\cong 2\%$ de O_2 ; por encima de este valor se satura. Si bien la atmósfera que rodea la planta tiene 21% de O_2 ciertos tejidos disponen de menor cantidad debido a la resistencia que encuentra el aire en su desplazamiento, como son escasos espacios intercelulares, la epidermis cutinizada y suberificada, los tegumentos serosos, etc. como por ejemplo en yemas, tubérculos, bulbos, semillas, etc. Hay especies adaptadas para la carencia de O_2 como las hidrófitas que tienen tejidos y hasta órganos especializados (parénquimas, aerénquimas) para el intercambio de gases. Los espacios intercelulares también son importantes para la adaptación, así el arroz en sus raíces tiene un gran volumen de espacios intercelulares lo que permite la difusión del O_2 . Otra adaptación de este cultivo es que elimina fácilmente el etanol producido por fermentación.

Influencia de la Temperatura: los tejidos vegetales respiran aunque a tasas muy reducidas a temperaturas bajas, a medida que aumenta la temperatura aumenta la respiración con un Q_{10} que varía entre 2-4. A partir de cierta temperatura que depende de la especie $\cong 38^\circ C$, la desaceleración de la actividad respiratoria está en función del tiempo.

Influencia de la luz: la luz inhibe en forma muy marcada la respiración oscura en células que realizan fotosíntesis, en consecuencia, los órganos verdes iluminados liberan poco de CO_2 si no tiene fotorrespiración. Esto significa que durante el día el ATP que utiliza la célula proviene de la fotosíntesis. En tejidos u órganos que no fotosintetizan la respiración no es afectada. La irradiación necesaria para retardar el proceso es menor a la del punto de compensación.

Influencia del CO_2 : en concentraciones normales de 350 ppm no modifica la respiración, pero su influencia es sobre los mecanismos de apertura y cierre de estomas a 1.500-2.000

ppm. En frutos y muchas semillas el efecto es diferente, la respiración se reduce cuando aumenta al 5% manteniendo al 21% la de O_2 . Esto se observa en frutos climatéricos (peras, manzanas, tomate, etc.). Se usan atmósferas enriquecidas con CO_2 para retardar la maduración y senectud de estos frutos. Los no climatéricos no modifican la respiración aumentando la concentración de CO_2 (frutilla, cítricos, cucurbitáceas etc.).

Desacoplantes: son sustancias que impiden la síntesis de ATP y además aumentan la actividad respiratoria (consumo de sustratos y emisión de CO_2). Pueden actuar mediante dos mecanismos: a) afectando la permeabilidad de las membranas de la mitocondria (permitiendo el pasaje de H^+), como es el caso de los detergentes y b) neutralizando el gradiente de pH que se origina durante la Cadena de transporte de electrones. De esta forma se producen las tres etapas de la respiración, pero no se sintetiza ATP, y como hay una gran disponibilidad de ADP, se acelera todo el proceso. Al estar los mecanismos activados se consumen todos los sustratos disponibles (azúcares, lípidos y proteínas) y la planta muere. Por consumo de aminoácidos se libera NH_4^+ , sustancia que también es desacoplante. Otros desacoplantes que se usan como herbicidas son el Dinitrofenol, Benzonitrilos y Perfluidona.

La respiración se puede expresar por:

- a) unidad de peso fresco,
- b) unidad de peso seco y
- c) por cantidad de proteínas.

La respiración es mínima en semillas y órgano de reserva (tubérculos, bulbos, rizomas) en reposo.

Tejidos, órganos o plantas jóvenes, en pleno crecimiento, experimentan mayores tasas de respiración específica (es decir, expresada por unidad de biomasa) que cuando los mismos tejidos están completamente desarrollados. La alta respiración específica de tejidos y plantas jóvenes responde a la demanda de esqueletos de carbono para crear las nuevas estructuras, y a la alta demanda energética (ATP) para sostener el crecimiento. A medida que la planta se desarrolla y envejece, esta demanda se reduce y la respiración también disminuye.

En tejidos meristemáticos foliares, la respiración puede llegar a consumir hasta un 10% de su biomasa seca durante el período nocturno. La tasa respiratoria por unidad de biomasa de las hojas que se forman a partir del meristema, se reduce hasta llegar a un valor constante una vez que la hoja ha llegado a su estado de maduración completa. Existe gran variabilidad en la tasa de respiración foliar específica entre grupos funcionales de vegetación. Las hojas de especies agrícolas son las que respiran a mayor velocidad, mientras que las hojas de coníferas o plantas que viven en condiciones de luz muy bajas son las que tienen las tasas de

respiración más bajas. Durante la senescencia, la respiración foliar es variable. Por lo general, la respiración disminuye rápidamente al iniciarse la senescencia.

La respiración de frutos jóvenes, durante la fase de crecimiento es alta, aunque disminuye rápidamente antes del proceso de maduración. Ciertos frutos carnosos, como el plátano, manzana, peras, tomate etc., tienen una respuesta respiratoria durante la maduración conocida como climatérica. Al inicio de la maduración de los frutos climatéricos, la respiración aumenta de forma muy rápida, coincidiendo con aumentos en la producción de etileno que estimula la maduración. En los frutos no climatéricos, como es el caso de los cítricos o de la uva, no se observa un aumento respiratorio durante la maduración, la cual es menos sensible a los niveles de etileno.

La tasa de respiración de las raíces depende de la actividad fotosintética de la planta. Cuanto más alta es la tasa de fotosíntesis, mayor es el aporte de carbohidratos a las partes subterráneas de la planta. La respiración de las raíces también depende del estado de desarrollo de la planta. Tras la germinación de la semilla, las raíces deben crecer rápidamente para sostener la planta y absorber los nutrientes necesarios para el crecimiento. Aunque estas dos funciones se mantienen a lo largo de la vida de la planta, la tasa respiratoria disminuye desde los estados iniciales. Hacia el final de la vida de la planta, las raíces dejan de crecer y su tasa respiratoria específica disminuye.

Respiración de crecimiento y de mantenimiento

La ganancia neta de biomasa, no depende solo de la fotosíntesis (ganancia de carbono), sino también de la utilización de los fotoasimilados en respiración (pérdidas de carbono). La respiración utiliza esqueletos carbonados para producir la energía necesaria para mantener y aumentar la biomasa existente. Una planta consume, en procesos respiratorios, entre la mitad y las tres cuartas partes de los carbohidratos producidos por la fotosíntesis por día. Una gran proporción de esta respiración se da en las raíces, ya que éstas respiran entre un 20 y un 40% del total de los fotoasimilados producidos por la planta durante el día.

Al analizar la tasa de crecimiento (aumento de biomasa por unidad de tiempo) de una planta, se observa que cuanto más rápido es el crecimiento, mayor es su respiración. Esta observación permite distinguir dos tipos de respiraciones: 1) la respiración de crecimiento, que refleja los costes de carbono asociados a la producción de energía metabólica (poder reductor y ATP) utilizada durante la biosíntesis y el crecimiento; y 2) la respiración de mantenimiento, que refleja los gastos de energía que se invierten en proceso que no determinan una ganancia neta de biomasa orgánica, como son el recambio de enzimas, el mantenimiento de la estructura de las membranas y la incorporación y transporte de nutrientes inorgánicos y orgánicos. A medida que el crecimiento de la planta aumenta, también aumentan la tasa de

respiración específica y la proporción de respiración de crecimiento respecto de la de mantenimiento. En plantas cuya tasa de crecimiento es cero, toda la respiración estará destinada a procesos de mantenimiento.

Los gastos de mantenimiento son mucho mayores en las raíces debido a que los procesos de absorción de nutrientes son energéticamente costosos. En condiciones normales, las raíces utilizan una tercera parte del carbono que reciben de la parte aérea para sintetizar la energía necesaria para crecer y absorber nutrientes. En condiciones limitantes de nutrientes, las raíces pueden llegar a respirar más del 70% del total de los fotoasimilados que reciben durante el día. Bajo estas condiciones limitantes para el crecimiento, la planta tiende a explorar un mayor volumen de suelo en busca de nutrientes. Una de las estrategias para mejorar la producción de cultivos es seleccionar genotipos que tengan bajo costo de respiración de mantenimiento (por aumento de la eficiencia en el transporte y en la vida media de las proteínas).

En el caso de cultivo en hidroponía como el agua y los nutrientes se encuentran a disposición de las raíces, no limitan su crecimiento y el gasto del sistema radical es mucho menor.

Bibliografía

- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. 2008. Fundamentos de Fisiología Vegetal. 651 pág. McGraw-Hill-Interamericana de España. 2da. Edición.
- Montaldi, E.R.(1995). Principios de Fisiología Vegetal. 298 pág. Ediciones Sur.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2006). Plant physiology. 3ra.Ed 758 pág. Sinauer Associates, Inc. Publisher.

CAPITULO 4

Nutrición mineral

Alejandra Carbone

Introducción

Las plantas a través de su sistema radicular obtienen oxígeno, agua y los nutrientes minerales necesarios para su normal crecimiento y desarrollo. Los nutrientes esenciales son aquellos imprescindibles para la vida del organismo vegetal y cuya función en la célula es tan específica que no pueden ser reemplazados por otros. Están implicados directamente en el metabolismo celular y son imprescindibles en la mayoría de las plantas superiores. Los nutrientes esenciales son requeridos por los vegetales en cantidades variables. En este sentido, podemos indicar que algunos de ellos forman las estructuras cuantitativamente más importantes o activas en el metabolismo, y por lo tanto son requeridos en cantidades relativamente elevadas. Estos se denominan elementos mayores o macronutrientes, los que son requeridos en orden de g/L de solución y en este grupo se encuentra el C, H, O, N, P, K, Ca, Mg y S. Otro grupo de nutrientes esenciales se necesitan en cantidades más reducidas y son denominados elementos menores o micronutrientes. Estos se requieren en orden de mg/L de solución y entre ellos figuran el Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Ni y Cl. La necesidad de menor cantidad no implica que tengan menor importancia, solo que son requeridos en menores cantidades relativas respecto a los macronutrientes.

En el sistema hidropónico los elementos minerales esenciales son aportados por la solución nutritiva, donde se encuentran en forma iónica y como tal son absorbidos por las raíces. Dichos nutrientes están dotados de movimiento en el entorno de la raíz favoreciendo su absorción.

Una de las claves para el éxito del cultivo hidropónico es la composición de la solución nutritiva, ya que la misma deberá contener todos los elementos mencionados en forma adecuada y en las cantidades apropiadas para que cumplan de manera correcta el rol que desempeñan en el metabolismo vegetal. Dichos elementos minerales deben estar disponibles de manera similar a cómo se encuentran en la solución del suelo, siendo importante efectuar el control del pH y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva. La carencia o falta de alguno de los elementos esenciales trae aparejada la aparición de anomalías en el crecimiento, que se manifiesta en síntomas de deficiencia característicos para cada nutriente. La carencia absoluta de algún elemento esencial producirá anormalidades en el crecimiento y desarrollo, que

pueden conducir a la muerte de la planta. La condición de deficiencia de un nutriente mineral de una planta o cultivo, se puede determinar por la concentración de los elementos minerales esenciales en las hojas, mucho antes que el déficit de alguno de ellos se manifieste a través de síntomas visuales. Esta metodología constituye el fundamento del Método del Análisis Foliar, que es empleado para evaluar el grado de fertilidad de un suelo para una especie en particular o simplemente la escasez de algún elemento. Si un elemento mineral esencial se encuentra por debajo del óptimo, afectará la tasa de crecimiento convirtiéndose en un factor limitativo. Cuando son dos o más los elementos que restringen el crecimiento, aquel que se encuentra en menor proporción relativa determinará la tasa de crecimiento. Esta respuesta es conocida como Ley del Mínimo que fue enunciada por Liebig en 1843 y rige también para otros factores que determinan el crecimiento vegetal. Es decir que el crecimiento del vegetal estará determinado por el elemento o factor que se encuentre en menor proporción relativa.

Rol y absorción de los elementos esenciales

Macronutrientes

Nitrógeno (N)

Es el elemento más abundante en las plantas luego del C, H y O. El N forma parte de las proteínas constituyendo el armazón de la estructura subcelular, y de diversos orgánulos como cloroplastos, mitocondrias y peroxisomas dónde ocurren numerosos procesos metabólicos. Además es constituyente de las membranas plasmáticas y de diversos pigmentos y hormonas vegetales. Forma parte constitutiva de los ácidos nucleicos, ARN (ácido ribonucleico) y ADN (ácido desoxiribonucleico). El primero de ellos es quien controla y regula la síntesis y formación de las proteínas, determinando la distribución de los aminoácidos y de esta manera el tipo de proteínas formadas. El ADN es el portador de los genes, quienes se encargan de la transferencia de los caracteres hereditarios a la descendencia del individuo. La importancia del rol ejercido por los compuestos nitrogenados en las plantas indica que cuando su aporte es restringido, aparecen claros síntomas de disminución del crecimiento y la productividad. El N es absorbido en forma de ión NO_3^- fundamentalmente, o como NH_4^+ , aunque también puede ser absorbido directamente como N_2 atmosférico por microorganismos (*Rhizobium*) que forman simbiosis en los nódulos de las raíces de algunas especies de leguminosas. La absorción de N en forma de pequeñas moléculas orgánicas (aminoácidos) es pequeña por las raíces, mientras que por vía foliar dicha absorción es mayor. El NO_3^- una vez absorbido por la planta, es reducido a NH_4^+ en las hojas (tomate) o entre las hojas y las raíces (como en el manzano y trigo). El NH_4^+ formado se une a esqueletos hidrocarbonados para su posterior conversión en aminoácidos. El transporte de NO_3^- al interior de la célula es activo y lo realizan las ATPasas de la membrana plasmática utilizando la energía proveniente de la hidrólisis del ATP. La reducción

del NO_3^- es un proceso que se lleva a cabo en dos etapas, en la primera de ellas es reducido a nitrito (NO_2^-) por la acción de la enzima nitrato reductasa y, en la segunda fase, el NO_2^- es reducido a amonio (NH_4^+) por la enzima nitrito reductasa. Ambas enzimas intervinientes en este proceso son inducibles ante la presencia del sustrato. La primera fase de la reducción se efectúa en el citosol y la segunda en los cloroplastos (proplástidos) de las raíces. La energía que se requiere en este proceso proviene de la respiración celular. El NH_4^+ producido no es acumulable, debido a su toxicidad, por lo que una vez formado, es convertido en grupos NH_2 o CO-NH_2 . Dicha conversión es catalizada por las enzimas glutamina sintetasa en el cloroplasto que une el grupo NH_4^+ al aminoácido glutamato con gasto de ATP. La enzima glutamato sintetasa cataliza la transferencia del grupo NH_2^- de la glutamina al 2-oxo-glutarato produciendo dos moléculas de glutamato. Una de éstas sigue manteniendo el funcionamiento del ciclo y la otra se incorpora a las proteínas, por reacciones catalizadas por enzimas aminotransferasas. El contenido de N en las hojas oscila entre 2,5-6,0 % de la materia seca, variando con la especie, edad de la planta, tipo de tejido y estado nutricional del cultivo. Las plantas tienen escasas reservas móviles de compuestos nitrogenados, de manera que cuando la deficiencia aparece se manifiestan las carencias, frenando el crecimiento del vegetal. Generalmente, las plantas reaccionan a la deficiencia de N con la proteólisis o ruptura de las proteínas para movilizar el N necesario para el metabolismo celular. En consecuencia, se produce la clorosis (amarillamiento) de las hojas por la ruptura y desorganización de los cloroplastos, produciendo la necrosis y posterior muerte de tejidos y algunos órganos vegetales. Ante la deficiencia de N los cloroplastos son los primeros órganos afectados, los que comienzan a degradarse adquiriendo las hojas una coloración amarilla clara asociado a la pérdida de N. Estos síntomas aparecen primero en hojas inferiores y se va extendiendo hacia la zona media y superior. En casos de carencia extrema de N, todas las hojas adquieren coloración amarilla, pudiendo afectar las nervaduras y adquirir partes de las hojas una coloración púrpura. Las raíces también modifican su crecimiento ante la deficiencia de N, ya que se extienden en longitud y son más frágiles y delgadas. En situaciones de toxicidad por exceso de disponibilidad de N en los cultivos hidropónicos, se registran quemaduras en los bordes de las hojas inferiores. La solución nutritiva debe aportar N como mezcla de NH_4^+ y NO_3^- en un equilibrio mixto de cationes y aniones. De esta manera se tiende a reducir el rápido incremento de pH del medio nutritivo que frecuentemente se observa cuando el N se aporta solamente como NO_3^- . La absorción y asimilación de las dos formas de N promueve el equilibrio anión-catión en el interior de la planta favoreciendo el crecimiento vegetal.

Fósforo (P)

El P (como $\text{PO}_4\text{-}3$) es un constituyente fundamental de los ácidos nucleicos (ARN y ADN) y nucleótidos. Interviene en numerosas reacciones metabólicas promoviendo potencial de reducción a través de coenzimas como el NAD (nicotinamida dinucleótido) y NADP (nicotinamida dinucleótido fosfato). El metabolismo celular requiere de $\text{PO}_4\text{-}3$ para la

regeneración de ADP y ATP, que son imprescindibles como fuente de energía que proviene de los procesos de fotosíntesis y respiración. Los fosfolípidos son importantes componentes de las membranas celulares y juegan un rol importante en la absorción de nutrientes. Asimismo, es constituyente de la molécula de ácido fítico, que es el principal reservorio de P en las semillas. El P es absorbido de la solución nutritiva como H_2PO_4^- , siendo excepcionalmente incorporado en forma de HPO_4^{2-} y nunca como PO_4^{3-} . El ión H_2PO_4^- es intercambiado de la solución nutritiva a través de la raíz, cediendo ésta iones OH^- . A diferencia del ión NO_3^- , el H_2PO_4^- no necesita ser reducido en el interior de la célula antes de ser incorporado a compuestos orgánicos. El contenido de P es variable en diferentes especies, pero oscila en las plantas hortícolas entre 0,25-0,9 mg.g⁻¹ de materia seca, siendo el máximo registrado en cultivos de hoja. Este mineral es abundante en órganos y tejidos jóvenes donde participa activamente para su crecimiento, conteniendo altos niveles de ácidos nucleicos. Las elevadas necesidades de P en éstos tejidos obligan, en caso de carencias, a la movilización del mismo desde otras partes de la planta. Este traslado se realiza desde las hojas viejas, donde se visualizarán los primeros síntomas de deficiencias. El diagnóstico foliar muestra decoloraciones irregulares marrones en algunas especies y coloración púrpura en las nervaduras, en el envés de las hojas y pecíolos debido a la acumulación de pigmentos antociánicos. Se reduce significativamente el crecimiento de la planta y si la carencia es severa se observan claros síntomas de enanismo.

Potasio (K)

El K es el único nutriente esencial que no forma ninguna estructura química en la célula vegetal. Cumple un rol fundamental en la economía del agua de la planta, su movilidad dentro de la planta es elevada. Durante la translocación de los iones K se crean cargas positivas que se necesitan neutralizar con cargas negativas de la propia planta. El K es un activador de procesos metabólicos, determinando que las cantidades necesarias a absorber de este ión sean elevadas. La rápida difusión de los iones K dan una elevada movilidad en la estructura subcelular jugando un rol esencial en el proceso fotosintético y en la respiración. La actividad de las proteínas y otros coloides dependen del óptimo nivel de hidratación celular ejerciendo el K un rol preponderante en este proceso. Como es un elemento muy móvil en la planta se encuentran elevadas concentraciones del mismo en las hojas apicales y tejidos meristemáticos. La apertura estomática se debe al aumento de la turgencia de las células oclusivas por el ingreso de H_2O determinado por la disminución del potencial, provocado por la entrada de iones K. En efecto, cuando el estoma se abre, la concentración de los iones K se elevan de 100 a más de 500 mM, aumentando la carga eléctrica de las células restableciéndose el balance por el ingreso del anión Cl^- . Este mecanismo de apertura y cierre de estomas juega un rol fundamental en la economía hídrica vegetal y el K está directamente involucrado en este proceso. Los síntomas característicos de la carencia son observados en las hojas basales, con un amarillamiento en bordes y posterior necrosis conforme avance la carencia. Se observa un

acortamiento de los entrenudos pudiendo llegar a producir defoliación de las hojas viejas como ocurre en pimiento y tomate.

Magnesio (Mg)

El ión Mg se absorbe como tal (Mg^{+2}) desde la solución del suelo y se encuentra en las plantas como elemento estructural de la molécula de clorofila, constituyendo un 10% del Mg existente en las hojas. Es cofactor de las enzimas que intervienen sobre sustratos fosforilados, cumpliendo un rol fundamental en el metabolismo energético. Promueve la absorción y translocación del P en la planta constituyendo un ejemplo de sinergismo. La absorción es con gasto de energía y se da en forma de ión o quelato. La sintomatología de la carencia de Mg se manifiesta en las hojas adultas o basales de la planta. Estas presentan una clorosis internerval que se mueve hacia el borde de la lámina foliar y de las hojas inferiores hacia las superiores. La diferencia con la carencia de K es que en ésta última se mueve a la inversa, es decir desde los bordes de las hojas hacia la zona central.

Azufre (S)

El S forma parte de los aminoácidos esenciales cistina, cisteína y metionina, como también de los compuestos biotina, tiamina y coenzima A. Todos estos metabolitos son imprescindibles en el metabolismo vegetal, ya que actúan como cofactores o coenzimas en numerosos procesos. La absorción se realiza como ión SO_4^{-2} pero debe ser reducido, como los nitratos, antes de ser incorporado a los componentes orgánicos. La absorción es activa de tipo cotransporte y la reducción se realiza fundamentalmente en las hojas⁴. En el proceso de reducción el S de valencia +6 pasa a -2 y se consume energía metabólica (ATP) formando cisteína quien se comporta como precursor de todos los compuestos orgánicos azufrados vegetales. En las plantas superiores la reducción del SO_4^{-2} se produce en los cloroplastos de las hojas y es fuertemente estimulado por la luz. Es en éstos órganos donde se consume la mayor cantidad de S durante las primeras etapas del crecimiento vegetal. Cuando las hojas alcanzan su madurez el SO_4^{-2} que llega es rápidamente reexportado hacia otras zonas en activo crecimiento vía floema en forma de aminoácidos simples. El SO_2 atmosférico puede ser absorbido por vía estomática y se comprobó que su transporte se realiza por vía floemática hacia todos los órganos vegetales. Los síntomas de la carencia de S son muy similares a los del N, ya que las plantas manifiestan una clorosis generalizada, pero a diferencia del N, los síntomas aparecen primero en las hojas jóvenes debido a que es un compuesto con escasa movilidad.

Calcio (Ca)

El calcio (Ca^{+2}) es utilizado en la síntesis de la pared celular, siendo el componente estructural de la laminilla media, que separa las células recién formadas. Participa en la

formación del huso mitótico durante la división celular y es necesario para el normal funcionamiento de las membranas celulares. Este mineral está implicado, como segundo mensajero, en numerosas respuestas de las plantas a señales ambientales y hormonales. Actúa como cofactor de numerosas enzimas, por ej. fosfatasa, ATPasas de cloroplastos y fosfolipasas ejerciendo un rol primordial sobre la elasticidad y elongación de las células jóvenes de la planta. Este elemento se absorbe en forma de ión Ca^{+2} o quelato, sin gasto de energía metabólica. Su contenido oscila entre 1 a 3.5 % de la materia seca. El mínimo valor se encuentra en los cultivos hortícolas y va aumentando con la edad de la planta. La acumulación en los órganos maduros es irreversible dado que éste elemento carece de movilidad. Esto determina que la sintomatología de deficiencia sea observada en los órganos jóvenes y meristemas apicales limitando el crecimiento del vegetal. Estos tejidos jóvenes se muestran necróticos y son un punto de ingreso para el ataque de enfermedades fúngicas y la aparición de fisiopatías típicas como el Blossom end rot (BER) característico en el cultivo de tomate, pimiento, berenjena y algunas cucurbitáceas.

Micronutrientes

Hierro (Fe)

Este elemento se caracteriza por los cambios de oxidación, Fe^{+2} (ferroso) ó Fe^{+3} (férrica). Esta variabilidad hace que el Fe tenga una especial importancia en los sistemas redox, siendo la forma Fe^{+3} la más abundante en las plantas. Este elemento es un componente estructural y funcional de numerosos complejos enzimáticos como citocromos, catalasas, peroxidasas y ferredoxinas. Alrededor del 75% del Fe celular se encuentra asociado con los cloroplastos indicando el rol importante que juega este elemento en el proceso fotosintético. El Fe en solución se encuentra en ambas formas de oxidación. Cuando el medio nutritivo posee pH >6 la forma férrica es la predominante y el elemento se encuentra en forma quelatada. Las plantas pueden reducir los complejos Fe^{+3} en la superficie de las raíces y absorber los iones Fe^{+2} originados. La carencia de hierro en las plantas se manifiesta con clorosis internerval en las hojas jóvenes, debido a que este elemento no se moviliza rápidamente desde las hojas más viejas. En condiciones extremas o severas de carencia la clorosis en la zona apical se intensifica, la división celular se inhibe y consecuentemente se detiene el crecimiento.

Manganeso (Mn)

El manganeso desempeña un rol importante en la fotosíntesis como transportador de electrones entre el agua y el fotosistema II e interviene como activador de numerosas enzimas. Es absorbido como ión Mn^{+2} o en forma quelatada, pudiendo también formar complejos en la rizósfera con ligandos de origen orgánico. Al igual que en el caso del Fe, estos ligandos son de

origen microbiano e incrementan la movilidad del Mn en la superficie de la raíz. Los síntomas de carencia aparecen en la zona media de la planta con clorosis internerval pudiendo llegar a observarse necrosis en caso que la deficiencia sea severa.

Cobre (Cu)

El Cu está asociado a enzimas que intervienen en reacciones redox, oxidándose de forma reversible de Cu^+ a Cu^{+2} . Numerosas proteínas ligadas al Cu participan en la transferencia de electrones durante la fase lumínica de la fotosíntesis, como la plastocianina. La absorción de este mineral se realiza como ión Cu^{+2} o quelatado. La sintomatología de deficiencia está dada por la aparición de hojas de color verde oscuro, seguido de posterior necrosis y torsión de la hoja hacia el envés. Las manchas necróticas aparecen primero en los extremos de las hojas jóvenes que se extienden hacia la base a lo largo de los márgenes foliares. Este elemento posee escasa movilidad en las plantas una vez que fue absorbido.

Zinc (Zn)

Este elemento se encuentra como catión divalente (Zn^{+2}) jugando un rol fundamental en la síntesis de las auxinas. El síntoma característico de su carencia es la reducción del crecimiento, observándose acortamiento de entrenudos y aparición de un patrón de crecimiento en roseta. Se requiere su presencia para la biosíntesis de clorofila siendo frecuente que ante su carencia se observe la aparición de hojas viejas más pequeñas con clorosis internerval. Este elemento posee movilidad intermedia una vez que es absorbido.

Boro (B)

Este elemento se absorbe en forma de ácido bórico y ejerce un rol importante en la síntesis de ácido giberélico (AG) y ácidos nucleicos (ARN y ADN), en las respuestas hormonales y en la funcionalidad de las membranas celulares. Una vez que es absorbido presenta escasa movilidad presentando diversos síntomas de carencia como necrosis negra en las hojas jóvenes y en las yemas terminales. Los tallos pueden ser rígidos y quebradizos y es frecuente la pérdida de la dominancia apical pudiendo observarse plantas muy ramificadas. Los frutos, las raíces carnosas y los tubérculos pueden manifestar necrosis o deformaciones relacionadas con la ruptura de los tejidos internos.

Molibdeno (Mo)

El Mo se encuentra en las plantas como anión en su forma de oxidación más alta Mo(VI), aunque también se presenta como Mo(V) y Mo(IV). Participa en reacciones de transferencia de electrones, por ejemplo en la reducción del nitrato a través de la enzima nitrato reductasa y en la transformación del N gaseoso en amoníaco en organismos fijadores de nitrógeno. Su absorción se realiza como anión molibdato (MoO_4) por mecanismos activos. El primer síntoma

de carencia es una clorosis general internerval y posterior necrosis de las hojas más maduras. En algunas hortalizas, como coliflor o brócoli, las hojas pueden no presentar necrosis pero aparecer curvadas y terminar muriendo (enfermedad conocida como cola de látigo). Se puede ver frenada la formación de la flor o provocar su pérdida prematura. Aunque las plantas requieren sólo pequeñas cantidades de Mo, algunos suelos no tienen los contenidos adecuados. El aporte de pequeñas cantidades de Mo en esos suelos mejora de manera notable el crecimiento de los cultivos.

Cloro (Cl)

Este elemento se absorbe como Cl^{-1} , y se requiere en pequeñas cantidades. Está relacionado con la liberación de O_2 en el proceso fotosintético. Su carencia produce deterioro de los cloroplastos, disminuyendo el crecimiento aéreo y radicular del vegetal.

Níquel (Ni)

La ureasa es la única enzima conocida en las plantas que contenga Ni, aunque los microorganismos fijadores de N requieren de Ni para activar la enzima que reincorpora parte del H gaseoso generado durante la fijación. Las plantas con carencia de Ni acumulan urea en sus hojas y en consecuencia manifiestan necrosis en sus extremos.

Características de la solución nutritiva

Una solución nutritiva es, por definición, una solución acuosa que contiene oxígeno disuelto y todos los nutrientes minerales esenciales, necesarios para el normal crecimiento de las plantas, totalmente disociados. El éxito del cultivo hidropónico está determinado por la constitución de dicha solución nutritiva, la relación existente entre los diferentes iones minerales, la conductividad eléctrica y el pH. Es necesario conocer la calidad del agua a utilizar para la preparación de la solución nutritiva, debiendo chequearse previamente la cantidad de cationes presentes para verificar el grado de dureza de la misma. Las aguas para las preparaciones de las soluciones nutritivas contienen normalmente cantidades apreciables de CO_3HCa , CO_3HMg , SO_4^{-2} y NO_3^{-} , pudiendo encontrarse también con frecuencia pequeñas cantidades de Fe, trazas de Mn, Zn y B. Otro factor importante a tener en cuenta es la alcalinidad del agua, o sea el equilibrio entre CO_3/HCO_3 . Esta relación es importante para determinar la resistencia del agua a la acidificación, ya que será necesario agregar ácido para reducir el pH a valores cercanos a 5,3-5,5 para su uso en hidroponía. Asimismo, hay otros factores que juegan un rol importante y que es imprescindible tenerlos en cuenta. Estos son mencionados a continuación:

Disponibilidad de oxígeno

La disponibilidad de O_2 juega un rol fundamental en la absorción iónica. La restricción de este elemento por estancamiento en los sustratos hidropónicos o la falta de aireación puede producir acumulación de CO_2 en el medio radicular. Los bajos niveles de O_2 en la solución nutritiva disminuye la disponibilidad de Fe en los sistemas NFT, asociándose con acumulaciones de Mn en las hojas de las plantas, inhibiendo además la absorción de iones K y NO_3^- . Esto producirá síntomas de deficiencias que se observarán visualmente. La disponibilidad de O_2 en la solución nutritiva es fundamental para el normal crecimiento y funcionamiento de las raíces. En un medio aeróbico las células pueden respirar y generar energía metabólica (ATP) y en consecuencia poder absorber todos los nutrientes necesarios para su normal crecimiento.

Influencia de la temperatura

Los órganos vegetales que están sumergidos en agua deben vivir en condiciones de temperatura adecuadas ya que incrementos excesivos afectan el metabolismo celular, llegando incluso a la muerte de los mismos. La disponibilidad de oxígeno es fundamental para la vida celular y este compuesto se disuelve mejor en aguas frías que calientes. El aumento de la temperatura incrementa la absorción de iones K y fosfatos, como así también la tasa respiratoria de las raíces que trae aparejado una disminución en la disponibilidad de Fe. A bajas temperaturas el ión NH_4^+ se absorbe más rápidamente que los iones NO_3^- .

Influencia del pH

Tiene un efecto directo sobre la absorción iónica. Las soluciones con $pH \geq 7.5$ producen disminución en la absorción de NO_3^- , independientemente de la concentración de éstos, ejerciendo un efecto similar sobre el ión fosfato. Descensos de pH restringen la absorción de NH_4^+ y aumenta la de NO_3^- . Las soluciones con $pH \leq 4$ disminuye la absorción de K produciendo un desbalance en la polaridad de las membranas celulares de las raíces. Los incrementos de pH en la solución nutritiva producen la precipitación de iones, como el Fe quien ve interrumpida su normal absorción.

Influencia de la interacción entre iones

La relación entre dos nutrientes dependerá de la concentración de cada uno de ellos. Así es como dos elementos pueden ser sinérgicos a bajas concentraciones pero antagónicos a concentraciones elevadas. La interacción entre los nutrientes puede ocurrir durante la absorción, la translocación o en el metabolismo. El caso más conocido de competencia en el mecanismo de absorción es el exceso de K, que puede provocar dificultades para absorber Mg y/o Ca causando sintomatología de deficiencias de estos elementos. El antagonismo durante la

translocación puede ser debida a la precipitación de los iones en los tejidos de almacenamiento de la raíz o en otros sitios de la planta. Un exceso de iones fosfato puede causar la precipitación de fosfato de zinc y de hierro en los elementos de conducción del xilema y traer aparejado una deficiencia de estos elementos en las hojas. Está comprobada la relación existente entre N y P ya que ambos son necesarios para la formación de ácidos nucleicos y fosfoproteínas. La deficiencia interna de alguno de ellos impide la formación de nuevas células, y si ambos son deficientes la aplicación de los dos elementos incrementará el crecimiento más eficientemente que la aplicación individual de cada elemento. Existen evidencias que demuestran que la absorción de un catión de una solución constituida por un solo fertilizante que aporta dicho catión dependerá de la naturaleza del anión acompañante. Por ejemplo, la absorción de K por la raíz, es más rápida en forma de ClK que como SO_4K_2 . Esto se debe a la diferente permeabilidad de los aniones en las membranas celulares. Asimismo, el K proveniente del NO_3K se absorbe más rápidamente que el del KCl . El Ca afecta positivamente la absorción de K cuando entre ellos se mantiene una relación de 30mmol/L de Ca frente a 1mmol/L de K. Cuando la relación Ca/K disminuye, también lo hace la absorción de K. Un exceso en la concentración de K en la solución nutritiva inhibe la absorción de Ca y Mg. Está reportado el antagonismo existente entre Fe/Mn y funciona en ambas direcciones. El Cu compite en la absorción frente al Zn y también se ve afectada ante un exceso de K. Las mutuas interacciones en la absorción se pueden explicar en términos de competencia entre iones de similar carga y tamaño molecular. Exceso de amonio: puede provocar fitotoxicidad, provocando graves quemaduras en hojas. Modifica (disminuye) el pH de la solución. Origina problemas de antagonismo con otros nutrientes. El amonio no debe aportar más de un 5-10% del N total. En invierno, se puede suprimir el amonio, ya que el N del nitrato de calcio es suficiente.

Influencia de la salinidad

Las soluciones nutritivas con elevados contenidos de sales, como los iones sodio y cloruro, influyen de manera directa en la absorción de los nutrientes. El sodio provoca una competencia directa en la absorción de K y el ión cloruro en la de NO_3 . Dichos incrementos salinos originan aumentos en la presión osmótica de la solución, frenando la absorción de agua e iones minerales que generan un desbalance hídrico en la planta. Es por esta razón que se afecta la absorción y el transporte de iones como el Ca y el B.

Influencia de la edad

Está comprobado que el tamaño y desarrollo de la raíz influye en la tasa de absorción de iones. La edad de la planta incrementa el volumen radicular y la absorción de nutrientes es llevada a cabo fundamentalmente por la zona pilífera. Es en ésta zona donde se acumula la

mayor cantidad de iones absorbidos y los mismos disminuyen a medida que nos alejamos hacia el cuello de la raíz.

Influencia de la concentración externa de nutrientes

La absorción de iones es dependiente de la concentración externa de nutrientes. Dicha absorción disminuye cuando la concentración en la zona radicular es baja.

Bibliografía

- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. 2008. Fundamentos de Fisiología Vegetal. 651 pág. McGraw-Hill-Interamericana de España. 2da. Edición.
- Epstein, E. (1972). Mineral nutrition of plants; principles and perspectives. New York: Wiley.
- Golberg, A. D. (2008). El agua. De la molécula a la biósfera. 231 pág. Alberto Daniel Golberg y Alicia Graciela Kin 1ra ed. Santa Rosa: Base 1.
- Howard, M. Resh, P. (1997). Cultivos Hidropónicos. Nuevas técnicas de producción. Cuarta edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. Barcelona. Mexico.
- Montaldi, E.R.(1995). Principios de Fisiología Vegetal. 298 pág. Ediciones Sur.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2006). Plant physiology. 3ra.Ed 758 pág. Sinauer Associates, Inc. Publisher.



CAPÍTULO 5

Soluciones nutritivas I

Ricardo Andreau, Daniel Giménez y José Beltrano

Introducción

Las técnicas de cultivo sin suelo (CSS) se desarrollaron y promocionaron como una actividad de interés en los invernaderos. La horticultura intensiva se ha incrementado de una manera excepcional en los últimos 40 años. En la década del 80, los cultivos en invernaderos (cultivos bajo cubiertas plásticas, con estructuras de madera) comienzan a tener presencia importante en la región del cinturón hortícola de La Plata, con diversas experiencias, que ofrecieron resultados muy positivos y que movilizaron al sector hortícola de la región. Sobre esta base, la evolución del sector hortícola, no solo modificó la fisonomía de la región, sino que además produjo un cambio social, debido al cambio en la calidad y cantidad de mano de obra para esta nueva situación. En la actualidad, la superficie mundial de cultivos sin suelo bajo diferentes tipos de coberturas, alcanza las 40.000 hectáreas. Holanda es el país con mayor superficie cubierta dispone, con aproximadamente 5.000 hectáreas, España con 2.500, Bélgica y el Reino Unido poseen 2.000, Japón 1.500, al igual que China, Francia 1.000, Israel 750, Canadá 500, Estados Unidos 250 hectáreas. El cultivo de las distintas especies cultivadas puede llevarse a cabo en muy diferentes condiciones. Las variaciones estarán determinadas por la especie, el cultivar, (la genética del material a multiplicar) y las condiciones del medio. Las plantas cultivadas sin suelo se dividen en dos categorías: aquellas cultivadas en agua (hidroponía) por ejemplo balsas o técnica del film nutritivo (NFT) y el cultivo en sustrato por ejemplo turba, fibra de coco, vermiculita, perlita, arena o lana de roca. El cultivo intensivo está sujeto a cambios permanentes orientados a mejorar la cantidad y calidad de las cosechas, esto se consigue mediante la incorporación de equipos que permiten incrementar el control sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos. La protección del ambiente y la conservación de los recursos naturales conducen hacia el aumento de la eficiencia hídrica del cultivo intensivo en el invernadero. Esto debe abordarse en forma integral desde el conocimiento de las necesidades del cultivo, el control de los factores ambientales hasta niveles que no conduzcan a una reducción de los rendimientos ni de la calidad de la producción. Los sistemas de CSS pueden clasificarse dependiendo el medio en que se desarrollen las raíces en

Cultivos en solución o hidropónicos

Sistema de solución estática

En esta categoría se incluyen los tanques o recipientes profundos de solución nutritiva, en los que están sumergidas las raíces. En general el sistema adolece de falta de oxígeno y no es operativo con altas temperaturas por el bajo nivel que el oxígeno alcanza bajo estas condiciones. La oxigenación se puede obtener por raíces formadas por encima de la solución y que trasladan oxígenos a las raíces sumergidas, que son morfológicamente diferentes y especializadas en la absorción de agua y nutrientes o se hace llegar a la raíz por aireación forzada (burbujeo de la solución) por medio de un compresor o una bomba de aire.

Sistema con solución recirculante

La solución nutritiva puede circular de forma continua o intermitente. Se utiliza en los sistemas de canales profundos o semiprofundos, el aporte de oxígeno no es necesario, ya que la solución se encuentra en movimiento. El sistema más conocido es el denominado NTF, desarrollado por Cooper en los años 1970. El oxígeno es aportado por la solución y por el aire que rodea a gran parte de las raíces, que se dificulta con el aumento de la temperatura, ya que el consumo se duplica con el aumento de 10°C, mientras que la disolución del oxígeno en la solución baja de 9,6 a 7,8 mg/L para 20 y 30°C respectivamente.

Cultivos en aire o aeropónicos

También utiliza solución circulante, pero en los que la raíz se encuentra directamente en el aire. El problema en este caso no es la hipoxia, sino que la raíz tenga el agua fácilmente disponible. La mayoría de los sistemas aeropónicos utilizan un recinto aislado en el que caen las raíces de las plantas y líneas de microaspersores alineados estratégicamente se encargan de mantener húmeda la raíz, mediante descargas de solución nutritiva de corta duración y frecuencia variable según las condiciones ambientales. La solución sobrante es recogida y conducida al tanque de reserva.

Características de cada uno de los métodos presentados:

- NFT: el cultivo se realiza en tubos o canalones fabricados a estos fines o adaptados para ello. Es importante que el material utilizado, no aporte elementos tóxicos para las plantas.
- Densidad del cultivo: Lechuga 8 a 24 pl/m²
- Pendiente del canal 1,5%
- Caudal de la película de solución por canal: 2 a 6 l/min
- CE (conductividad eléctrica de la solución)

- Invierno 0,4 a 0,6 meq/100 gr
- Verano 1 a 1,6 meq/100 gr
- pH
- 5,5 a 6,1

Algunos problemas que pueden surgir

Las altas temperaturas inducen la floración y se pierde calidad comercial.

Concentración de Oxígeno: A medida que la temperatura aumenta, la disponibilidad de O_2 disuelto disminuye significativamente, motivo por el cual se deben aplicar algunas de las técnicas mencionadas: burbujeo o bien algún tipo de agitación o alternancia de riegos y suspensión de riego, a fin de incrementar la disponibilidad de O_2 para las raíces. Límite inferior $3mgO_2/L$. Para solucionar este problema, las alternativas son, o bien a través de burbujeo mediante bombas, o alternar riegos y descanso (15 minutos riego, 15 minutos descanso). Si las condiciones ambientales lo exigen pueden ser riego 30 minutos, descanso 30 minutos.

Cultivos en sustratos

Dentro de los cultivos en sustrato podemos diferenciar dos grupos:

- Alta Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y por ende más estables ante variaciones de pH y CE de la solución nutritiva (turba, fibra de coco, vermiculita)
- Baja CIC, que son muy sensibles a los cambios de pH y CE (perlita, arena, lana de roca) meq/100 gr).

Sistemas que funcionan con inundación periódica del sustrato por subirrigación y que se recoge el sobrante o percolado.

Sistemas que utilizan un sustrato con baja retención de agua y elevada aireación (grava, etc.) de modo que requiere de riegos muy frecuentes con solución nutritiva.

Sistemas convencionales, con sustratos que tiene una alta capacidad de retención de agua (perlita, lana de roca, etc.) que requiere riegos puntuales según las exigencias del cultivo, con el fin de lograr la mejor relación agua/aire.

Fertirrigación:

La fertirrigación de los CSS es uno de las principales determinantes de la producción y debe conseguir mantener el equilibrio del sistema rizosfera-planta-atmósfera. Esto se puede realizar de manera manual o a través del uso de ordenadores que pueden ser desde sencillo y fáciles

de manejar a muy complejo y que necesitan una intensa capacitación para su manejo. El objetivo es siempre el de conjugar un aporte hídrico preciso y dinámico capaz de compensar la demanda del cultivo en función de las condiciones ambientales, evitando restricciones hídricas o en general situaciones de estrés. Esto es factible cuando se puede actuar sobre aquellos factores que inciden en la evapotranspiración del cultivo: radiación, déficit de presión de vapor, renovación del aire, concentración de CO₂, temperatura, etc. Los sistemas que pueden coordinar el desarrollo del cultivo y las variables mencionadas, hacen al sistema muy dinámico, como para cubrir las necesidades hídricas y nutricionales del cultivo, durante todo el día, todos los días. Si el invernadero no tiene calefacción/refrigeración, las plantas deben adaptarse a las condiciones del medioambiente. Se ha comprobado que la temperatura nocturna en el exterior e interior de un invernadero cubierto con lámina de polietileno, es muy similar (Montero J.I. et al. 1986). Verlodt H. (1990) establece el umbral de las temperaturas mínimas nocturnas entre 15-18,5°C, por debajo de las cuales se sugiere que habría que incorporar calor para cultivos como tomate, pimiento, pepino y melón. Mientras que von Zabeltitz. sugiere los 12°C como límite para calefaccionar. Las especies termófilas, cuando la temperatura desciende por debajo de los 10-12°C reducen su crecimiento debido a:

Reducción de la absorción de agua y nutrientes por disminución de la actividad respiratoria, quien provee de ATP, poder reductor (NADH) y esqueletos carbonados para el crecimiento del sistema radicular, aumento de la viscosidad de la solución, aumento de la resistencia de las membranas, disminución del crecimiento de la raíz, disminución de la fotosíntesis, disminución del traslado y distribución de asimilados

Cambios anatómicos y morfológicos, como desarrollo de hojas más anchas y cortas, reducción de la longitud del peciolo. aumento del grosor de las hojas y del peso foliar específico

Cultivo sin suelo (CSS), componentes.

Cualquier sistema de CSS que se desarrolle, va a estar definido por componentes básicos, que son las unidades elementales de cultivo (macetas, canalones, piletones, balsas, etc).

- El sustrato
- El equipamiento adecuado de riego con solución nutritiva (automatismo-ordenadores, equipo de riego-fertirriego, etc)
- La tecnología y conocimiento necesario para el correcto manejo

Para conseguir un resultado satisfactorio del cultivo, es necesaria la correcta conjunción de los elementos antes mencionados.

El Sustrato.

El sustrato es material sólido distinto del suelo natural que colocado en un contenedor en forma pura o en mezcla permite el anclaje del sistema radicular, está formado por tres fases:

- Fase sólida, constituida por las partículas del sustrato propiamente dicha;
- Fase líquida, constituida por el agua o solución que contiene sustancias disueltas
- Fase gaseosa, que es el aire en los poros del sustrato.

De la fase líquida depende la disponibilidad de agua para las plantas y es el soporte y transporte de los nutrientes. Un sustrato se puede definir por una serie de características físicas, químicas y biológicas, que determinan su comportamiento como medio de cultivo. De un sustrato se espera que sea el medio de cultivo ideal, mediante el cual obtengamos el máximo rendimiento potencial de un cultivo. Entre los factores corrientes que determinan el comportamiento del sustrato, se pueden mencionar: el manejo del riego, condiciones climáticas, material vegetal a cultivar (semillas, plantines, estacas, etc). Lo ideal sería tener un sustrato para cada condición y cultivo o para cada combinación de factores participantes. Por lo tanto el objetivo es establecer cuál será el sustrato que tenga las características medias que no condicionen el éxito del cultivo. En la elección del sustrato, el precio, la uniformidad y la disponibilidad continua son también criterios muy fuertes al momento de elegir.

En función de los parámetros analizados, podemos presentar algunas características generales como aquellas que de alguna manera representan a un sustrato ideal.

Características del sustrato ideal

El mejor medio de cultivo depende de numerosos factores como son el tipo de material vegetal con el que se trabaja (semillas, plantas, estacas, etc.), especie vegetal, condiciones climáticas, sistemas y programas de riego y fertilización, aspectos económicos, etc. La tasa de movimiento del agua y del aire a través del sustrato es determinada, en gran medida, por el tamaño de los poros. Los macroporos facilitan una rápida percolación del agua y el movimiento del aire, en tanto que los microporos dificultan el movimiento del aire y retienen gran cantidad de agua por capilaridad; por consiguiente, los microporos son muy importantes en lo que se refiere a la retención del agua, y los macroporos son de gran valor en lo que se refiere a la aireación y al drenaje interno del sustrato. La porosidad del sustrato tiene importancia porque constituye el medio por el cual el agua penetra y pasa a través de él para abastecer a la raíces y finalmente drenar; y también es el espacio donde las raíces de las plantas tienen una atmósfera es decir, constituye la fuente de donde obtienen el aire. Para obtener buenos resultados durante la germinación, el enraizamiento y el crecimiento de las plantas, se requieren las siguientes características del medio de cultivo o sustrato:

¿Qué características debe de tener un buen sustrato?

Desde los inicios de la hidroponía, los sustratos eran considerados como materiales de gran importancia, pero estos debían de reunir una mezcla de características favorables para nuestro cultivo. Sin embargo, no siempre un sustrato reúne todas las características deseables; por ello es que podemos recurrir a realizar mezclas de los mismos, buscando que unos aporten lo que les falta a otros.

Propiedades generales que debe de reunir un buen sustrato:

- **Porosidad:** es el volumen total del medio no ocupado por las partículas sólidas, y por tanto, lo estará por aire o agua en una cierta proporción. El nivel de capacidad de aireación óptimo varía entre un 20% y un 30%, esto se define como la proporción del volumen de oxígeno que se encuentra disponible en el sustrato, después de que éste se haya saturado de agua y haya terminado de drenar. Es importante elegir un sustrato con estructura estable, muy poroso ya que de esta forma evitaremos el peligro de la falta de oxígeno en la zona radicular. La retención de humedad por el sustrato, determina la posibilidad de que la planta tenga disponibles los nutrientes para que pueda realizar sus procesos metabólicos (fotosíntesis, transpiración, respiración y procesos reproductivos), va a depender de su granulometría (tamaño de las partículas) y porosidad (espacio que hay entre las partículas). Mientras más elevada sea la capacidad de retención de agua del sustrato, menos frecuentes serán los riegos.
- **La capilaridad:** consiste en que el sustrato tenga la capacidad de adsorber y distribuir en todas las direcciones la solución nutritiva a través de los microporos. Es esencial cuando se utiliza un sistema de riego por goteo, en el cual se necesita que el agua se distribuya horizontalmente a partir del punto de goteo. Cuando el sustrato tiene baja capilaridad, la solución nutritiva se mueve verticalmente a través del perfil del mismo, drena rápidamente, dejando zonas secas en las cuales no se puede desarrollar las raíces. Cuando el sustrato tiene una buena capilaridad, el agua es adsorbida en todas direcciones, haciendo que las raíces de las plantas encuentren una humedad homogénea en todo el recipiente.
- **Estabilidad física:** la compactación y descomposición del sustrato puede causar una reducción en el espacio poroso y en la capacidad de aireación a lo largo del cultivo. Es por ello que la estabilidad de las propiedades físicas es de vital importancia en cultivos de larga duración.

- **Peso:** el peso del sustrato determina la resistencia del montaje hidropónico, es recomendable que este sea liviano para poder tener un fácil manejo, algunos de los sustratos más livianos utilizados en la hidroponia son: perlita, vermiculita, lana de roca, fibra de coco, entre otros. En el otro extremo se encuentra la arena y las gravas.
- **Disponibilidad:** esta es una condición lógica, pero a veces no se toma en cuenta. Al seleccionar el sustrato debemos de cerciorarnos que esté disponible en el medio comercial.
- **Bajo costo:** generalmente este factor determina, incluso antes que otras condiciones, el sustrato a utilizar por eso es recomendable que se realice una cotización sin sacrificar la calidad de tu producto.

En general y en resumen, las propiedades de los sustratos a tener en cuenta

Propiedades Físicas

- Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible para el cultivo, con el objetivo que la planta extraiga fácilmente el agua para sus funciones vitales.
- La porosidad debería ser de aproximadamente el 25%. Suficiente suministro de aire. La falta de oxígeno a nivel del sustrato provoca disminución del crecimiento radical, provocando un oscurecimiento y necrosis del tejido radical y aparición de microorganismos patógenos en el medio.
- Uniformidad del tamaño de las partículas que mantenga constantes las propiedades antes mencionadas.
- Baja densidad aparente.
- Estructura estable que impida la contracción o hinchazón del medio.

Propiedades químicas:

- Capacidad de intercambio catiónico variable, dependiendo de que la fertirrigación se aplique permanentemente o de modo intermitente. Una característica general de los sustratos más comunes es su capacidad de intercambio catiónico, es la capacidad que tiene un suelo o sustrato para retener y liberar iones positivos, merced a su contenido en arcillas y materia orgánica. Es un indicador del potencial del sustrato

para retener e intercambiar nutrientes vegetales. Por lo tanto, la CIC del sustrato afecta directamente a la cantidad y frecuencia de aplicación de fertilizantes.

- Elevada capacidad tampón para mantener constante el pH.
- Baja salinidad.
- Mínima velocidad de descomposición.

Otras propiedades:

- Bajo costo.
- Libre de semillas de malezas, nematodos y de otras plagas y patógenos y sustancias fitotóxicas.
- Fácil disponibilidad en el mercado.
- Estabilidad frente a la desinfección.
- Resistencia a cambios físicos, químicos o ambientales.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de diferentes sustratos:

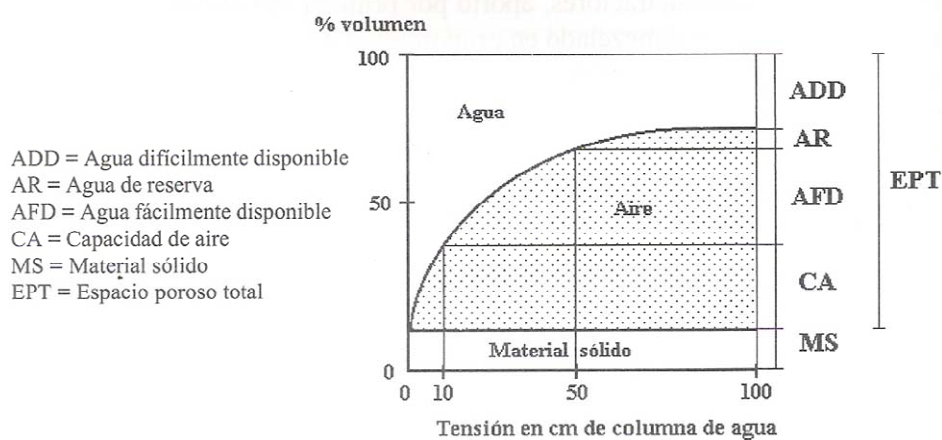
MATERIAL	Meq.L ⁻¹ (CIC)
TIERRA ARCILLO LIMOSA	200-300
TURBA NEGRA	200-400
TURBA RUBIA	100-200
CORTEZA DE PINO	80-120
PERLITA	5-10
ARENA	0

Influencia del tamaño de las partículas en la porosidad y retención de agua.

TAMAÑO DE PARTÍCULAS (mm)	POROSIDAD TOTAL (%)	AGUA RETENIDA CC (%)
0-1	66,4	52,2
1-2,5	78,3	28,5
2,5-4	83,3	18,6
4-8	85,4	17,5
8-10	86,7	18,5
> 10	86,7	19,4

Según las características del sustrato, como se puede observar en las tablas presentadas, también se modifican sus propiedades, entre ellas es de interés conocer la curva de retención de agua o curva de tensión. La curva de retención de agua del suelo, relaciona el contenido de agua del suelo con la succión o tensión con que está retenida. Expresa la relación entre el contenido de humedad y su potencial, su valor depende de los factores relacionados con la porosidad del suelo.

Curva de tensión



SUSTRATO	EPT (%)
TURBA NEGRA	83-88
TURBA RUBIA	85-97
CORTEZA DE PINO	85-93
PERLITA	94-98
VERMICULITA	95-96
ARENA	43-48
SUELO	33-57

¿Existe el sustrato ideal?

El mejor sustrato depende del tipo de material vegetal a implantar (semilla, estaca, plantín, etc.), especie cultivada, condiciones climáticas, tamaño y forma del contenedor, programas de riego, fertilización

Que criterios utilizamos para elegir un sustrato?

El suministro y la homogeneidad, la finalidad de la producción, el costo, las propiedades físicas y químicas, la experiencia local en su utilización

Tipos de sustratos

Sustratos químicamente inertes.

Arena granítica o silícea, grava, roca volcánica, perlita, arcilla expandida, lana de roca, etc.

Sustratos químicamente activos.

Turbas rubias y negras, corteza de pino, vermiculita, materiales ligno-celulósicos, etc.

Las diferencias entre ambos sustratos vienen determinadas por la capacidad de intercambio catiónico o la capacidad de almacenamiento de nutrientes por parte del sustrato. Los sustratos químicamente inertes actúan como soporte de la planta, no interviniendo en el proceso de adsorción y fijación de los nutrientes, por lo que han de ser suministrados mediante la solución fertilizante. Los sustratos químicamente activos sirven de soporte a la planta pero a su vez actúan como depósito de reserva de los nutrientes aportados mediante la fertilización, almacenándolos o cediéndolos según las exigencias del vegetal.

Según el origen de los materiales.

Materiales orgánicos.

- De origen natural. Se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica (turbas).
- De síntesis. Son polímeros orgánicos no biodegradables, que se obtienen mediante síntesis química (espuma de poliuretano, poliestireno expandido, etc.).
- Subproductos y residuos de diferentes actividades agrícolas, industriales y urbanas. La mayoría de los materiales de este grupo deben experimentar un proceso de compostaje, para su adecuación como sustratos (cascarillas de arroz, pajas de cereales, fibra de coco, orujo de uva, cortezas de árboles, serrín y virutas de la madera, residuos sólidos urbanos, lodos de depuración de aguas residuales, etc.).

Materiales inorgánicos o minerales.

De origen natural. Se obtienen a partir de rocas o minerales de origen diverso, modificándose muchas veces de modo ligero, mediante tratamientos físicos sencillos. No son biodegradables (arena, grava, tierra volcánica, etc.).

Transformados o tratados. A partir de rocas o minerales, mediante tratamientos físicos, más o menos complejos, que modifican notablemente las características de los materiales de partida (perlita, lana de roca, vermiculita, arcilla expandida, etc.).

Residuos y subproductos industriales. Comprende los materiales procedentes de muy distintas actividades industriales (escorias de horno alto, estériles del carbón, etc.).

Sustratos naturales

Agua: es común su empleo como portador de nutrientes,

Grava: suelen utilizarse las que poseen un diámetro entre 5 y 15 mm. Destacan las gravas de cuarzo, la piedra pómez y las que contienen menos de un 10% en carbonato cálcico. Su densidad aparente es de 1.500-1.800 kg/m³. Poseen una buena estabilidad estructural, su capacidad de retención del agua es baja si bien su porosidad es elevada (más del 40% del volumen). Su uso como sustrato puede durar varios años. Algunos tipos de gravas, como las de piedra pómez o de arena de río, deben lavarse antes de utilizarse.

Arena: las que proporcionan los mejores resultados son las arenas de río. Su granulometría más adecuada oscila entre 0,5 y 2 mm de diámetro. Su densidad aparente es similar a la grava. Su capacidad de retención del agua es media (20 % del peso y más del 35 % del volumen); su capacidad de aireación disminuye con el tiempo a causa de la compactación; su capacidad de intercambio catiónico es nula. Es relativamente frecuente que su contenido en caliza alcance el 8-10 %. Algunos tipos de arena deben lavarse previamente. Su pH varía entre 4 y 8. Su durabilidad es elevada. Es bastante frecuente su mezcla con turba, como sustrato de enraizamiento y de cultivo en contenedores. Ventajas de la arena como sustrato: gran resistencia mecánica, fácil de desinfectar, elevada aireación y muy buen drenaje, es inerte químicamente. Como desventaja se puede mencionar el peso elevado

Tierras volcánicas, son materiales de origen volcánico que se utilizan sin someterlos a ningún tipo de tratamiento, proceso o manipulación. Están compuestos de sílice, alúmina y óxidos de hierro. También contiene calcio, magnesio, fósforo y algunos oligoelementos. Las granulometrías son muy variables al igual que sus propiedades físicas. El pH de las tierras volcánicas es ligeramente ácido con tendencias a la neutralidad. La C.I.C. es tan baja que debe considerarse como nulo. Destaca su buena aireación, la inercia química y la estabilidad de su estructura. Tiene una baja capacidad de retención de agua, el material es poco homogéneo y de difícil manejo por el peso.

Turbas, son materiales de origen vegetal, de propiedades físicas y químicas variables en función de su origen. Se pueden clasificar en dos grupos: turbas rubias y negras. Las turbas rubias tienen un mayor contenido en materia orgánica y están menos descompuestas, las turbas negras están más mineralizadas teniendo un menor contenido en materia orgánica. Es más frecuente el uso de turbas rubias en cultivo sin suelo, debido a que las negras tienen una aireación deficiente y unos contenidos elevados en sales solubles. Las turbias rubias tiene un buen nivel de retención de agua y de aireación, pero muy variable en cuanto a su composición ya que depende de su origen. Las turbas son restos vegetales en proceso de fosilización. Se obtienen de las turberas. La turba es un magnífico sustrato para las plantas ornamentales. Es el sustrato más utilizado por los semilleros. La inestabilidad de su estructura y su alta capacidad de intercambio catiónico interfiere en la nutrición vegetal, presentan un pH que oscila entre 3,5 y 8,5. Ventajas de las turbas: excelentes propiedades físicas, químicas y biológicas. Desventajas: degradación rápida, reducida aireación, difícil rehúmedación, alta fijación de sodio, son muy utilizadas en plantas ornamentales en maceta.

Propiedades de las turbas (Fernández et al. 1998)		
Propiedades	Turbas rubias	Turbas negras
Densidad aparente (gr/cm ³)	0,06 - 0,1	0,3 - 0,5
Densidad real (gr/cm ³)	1,35	1,65 - 1,85
Espacio poroso (%)	94 o más	80 - 84
Capacidad de absorción de agua (gr/100 gr m.s.)	1.049	287
Aire (% volumen)	29	7,6
Agua fácilmente disponible (% volumen)	33,5	24
Agua de reserva (% volumen)	6,5	4,7
Agua difícilmente disponible (% volumen)	25,3	47,7
C.I.C. (meq/100 gr)	110 - 130	250 o más

Corteza de pino: Se pueden emplear cortezas de diversas especies vegetales, aunque la más empleada es la de pino, que procede básicamente de la industria maderera. Al ser un material de origen natural posee una gran variabilidad. Las cortezas se emplean en estado fresco (material

crudo) o compostadas. Las cortezas crudas pueden provocar problemas de deficiencia de nitrógeno y de fitotoxicidad. Las propiedades físicas dependen del tamaño de sus partículas, y se recomienda que el 20-40% de dichas partículas sean con un tamaño inferior a los 0,8 mm. Es un sustrato ligero, con una densidad aparente de 0,1 a 0,45 g/cm³. La porosidad total es superior al 80-85%, la capacidad de retención de agua es de baja a media, siendo su capacidad de aireación muy elevada. El pH varía de medianamente ácido a neutro. La CIC es de 55 meq/100 g.

Fibra de coco: este producto se obtiene del coco. Tiene una capacidad de retención de agua de hasta 3 o 4 veces su peso, un pH ligeramente ácido (6,3-6,5) y una densidad aparente de 200 kg/m³. Su porosidad es bastante buena y debe ser lavada antes de su uso debido al alto contenido de sales que posee.

Sustratos artificiales

Lana de roca, es un material obtenido a partir de la fundición industrial a más de 1600°C de una mezcla de rocas basálticas, calcáreas y carbón de coque. Finalmente al producto obtenido se le da una estructura fibrosa, se prensa, endurece y se corta en la forma deseada. En su composición química entran componentes como el sílice y óxidos de aluminio, calcio, magnesio, hierro, etc. Es considerado como un sustrato inerte, con una C.I.C. casi nula y un pH ligeramente alcalino, fácil de controlar. Tiene una estructura homogénea, un buen equilibrio entre agua y aire, pero presenta una degradación de su estructura, lo que condiciona que su empleo no sobrepase los 3 años. Es un material con una gran porosidad y que retiene mucha agua, pero muy débilmente, lo que condiciona una disposición muy horizontal de las tablas para que el agua se distribuya uniformemente por todo el sustrato.

Ventajas de la lana de roca: es un sustrato químicamente inerte, con elevada porosidad total, capacidad de retención de agua y de aireación.

Desventajas de la lana de roca: duración de 2 a 3 años. La lana de roca es usada como medio de cultivo en producciones bajo cubierta plástica desde hace más de 40 años. Se la utiliza en cultivo de hortalizas y flores.

Propiedades de la lana de roca (Fernández et al. 1998)	
Densidad aparente (gr/cm ³)	0,09
Espacio poroso (%)	96,7
Material sólido (% volumen)	3,3
Aire (% volumen)	14,9
Agua fácilmente disponible + agua de reserva (% volumen)	77,8
Agua difícilmente disponible (% volumen)	4

Perlita: material obtenido como consecuencia de un tratamiento térmico a unos 1.000-1.200 °C de una roca silíceo volcánica del grupo de las riolitas. La perlita está compuesta principalmente por óxido de silicio (73-75%) y óxido de aluminio (11-13%), son rocas volcánicas vítreas que se han formado por enfriamiento rápido, constituyendo un material amorfo que contiene entre 2-5% de agua combinada. Una vez procesada industrialmente, esta roca se transforma en unos gránulos blancos vitrificados, con gran porosidad interna y por lo tanto muy livianos, cuyas dimensiones varían entre 1,5 y 6 mm. La densidad aproximada es de 125 kg/m³, mientras que la roca original pesaba alrededor de 1500 kg/m³. Posee una capacidad de retención de agua de hasta cinco veces su peso y una elevada porosidad; su C.I.C. es prácticamente nula (1,5-2,5 meq/100 g); su durabilidad está limitada al tipo de cultivo, pudiendo llegar a los 5-6 años. Su pH está cercano a la neutralidad (7-7,5) y se utiliza a veces, mezclada con otros sustratos como turba, arena, etc. Ventajas de la perlita: buena aireación, no se descompone ni biológicamente ni químicamente, Mantiene un perfil de humedad casi constante en la zona radicular. Desventajas de la perlita: pierde estabilidad granulométrica provocando anegamiento en la parte inferior

Propiedades de la perlita (Fernández et al. 1998)			
Propiedades físicas	Tamaño de las partículas (mm de diámetro)		
	0-15 (Tipo B-6)	0-5 (Tipo B-12)	3-5 (Tipo A-13)
Densidad aparente (Kg/m ³)	50-60	105-125	100-120
Espacio poroso (%)	97,8	94	94,7
Material sólido (% volumen)	2,2	6	5,3
Aire (% volumen)	24,4	37,2	65,7
Agua fácilmente disponible (% volumen)	37,6	24,6	6,9
Agua de reserva (% volumen)	8,5	6,7	2,7
Agua difícilmente disponible (% volumen)	27,3	25,5	19,4

Vermiculita: se obtiene por la exfoliación de un tipo de micas sometido a temperaturas superiores a los 800 °C. Su densidad aparente es de 90 a 140 kg/m³, presentándose en escamas de 5-10 mm. Puede retener 350 litros de agua por metro cúbico y posee buena capacidad de aireación, aunque con el tiempo tiende a compactarse. Posee una elevada C.I.C. (80-120 meq/l). Puede contener hasta un 8% de potasio asimilable y hasta un 12% de magnesio asimilable. Su pH es próximo a la neutralidad (7-7,2).

Arcilla expandida: se obtiene tras el tratamiento de de nódulos arcillosos a más de 100 °C, formándose como unas bolas de corteza dura y un diámetro, comprendido entre 2 y 10 mm. La

densidad aparente es de 400 kg/m³ y posee una baja capacidad de retención de agua y una buena capacidad de aireación. Su C.I.C. es prácticamente nula (2-5 meq/l). Su pH está comprendido entre 5 y 7. Con relativa frecuencia se mezcla con turba, para la elaboración de sustratos.

Poliestireno expandido: es un plástico troceado en flóculos de 4-12 mm, de color blanco. Su densidad es muy baja, inferior a 50 Kg/m³. Posee poca capacidad de retención de agua y una buena posibilidad de aireación. Su pH es ligeramente superior a 6. Suele utilizarse mezclado con otros sustratos como la turba, para mejorar la capacidad de aireación.



Física de los sustratos y oxigenación del medio radicular.

En los CSS el sistema radical está confinado en un contenedor, y en general el volumen de la rizosfera es reducido. El confinamiento y el reducido volumen de la rizosfera, obligan a utilizar matrices porosas que denominamos sustratos y que contribuyen a paliar ambas limitaciones. En consecuencia las características de los sustratos deben ser tales que aseguren la disponibilidad de agua y oxígeno a las raíces. Según las condiciones ambientales, en los CSS se dan frecuentemente pasajes bruscos de la buena disponibilidad al estrés hídrico y lo mismo sucede con la disponibilidad de oxígeno a nivel de la rizosfera. En el interior de un sustrato se dan condiciones cambiantes, dinámicas. Se trata de conocer como fluye el agua y el aire en el espacio poroso de un sustrato. Así, el flujo del agua o del aire en el sustrato o entre el sustrato y las raíces depende no solo de los gradientes entre las fases para cada caso, sino también de la capacidad del medio de liberar el agua o circular el aire en la matriz porosa del sustrato. La difusión del oxígeno en el aire es 10^4 veces la del oxígeno en el agua. La solubilidad del oxígeno en el agua depende de la temperatura, de la presión parcial del

oxígeno, de la presión atmosférica, de la salinidad del agua y de la superficie expuesta. Pero en condiciones normales (20°C, 1 atmósfera de presión) la cantidad máxima de oxígeno disuelto es de 9 ppm y disminuye con la temperatura y con la concentración de sales disueltas. Por lo tanto la reposición del oxígeno en el sustrato depende en gran medida de la porosidad del mismo y de la morfología de la matriz porosa. Cuando el agua ocupa la mayor parte del espacio poroso de un sustrato, el agotamiento del oxígeno en la fase líquida y en la fase gaseosa de los microporos tiene lugar en forma exponencial y lleva asociado un aumento en la concentración de CO₂, y de otros gases como metano y etileno, esto conduce a cambios en el pH. Las condiciones de hipoxia tienen lugar cuando la presión parcial de oxígeno está alrededor del 1% (aprox. 3ppm). La restricción de oxígeno en la rizosfera, se denomina hipoxia y tiene lugar cuando la respiración radical comienza a verse perturbada por deficiencia de oxígeno. La ausencia total de oxígeno se denomina anoxia. En los CSS se dan condiciones propicias para que tengan lugar condiciones de hipoxia. Estas condiciones son la restricción del volumen del medio de cultivo, la densidad radicular, los bajos niveles de porosidad llenos de aire, la elevada concentración salina, la deficiente aireación y las temperaturas elevadas. El agotamiento del oxígeno disuelto como consecuencia de la respiración radicular tiene lugar en forma acelerada en los CSS. La reposición del oxígeno por difusión es lenta. Por lo tanto en cultivos en lámina (NTF) o en sustrato con difícil aireación o con elevada densidad radicular, es aconsejable airear la solución a fin de saturar la concentración de oxígeno permisible, mediante agitación mecánica o mediante burbujeo insuflando aire.

Producción hortícola y de flores.

Las plantas consumen grandes cantidades de agua, por ejemplo para producir 1 kilogramo de materia seca se necesitan aproximadamente 600 litros de agua. Si vamos a comenzar un proyecto agrícola, lo primero que debemos de resolver es el suministro y abastecimiento de agua. Una hortaliza es mayoritariamente agua, entre el 80 y 85%. El retraso de un solo riego en hortalizas, disminuye la calidad y cantidad producida. El riego utilizado tradicionalmente fue el que se realizaba en manta por inundación, hasta fines de los años 70, luego se comenzó a utilizar el riego por goteo, que era mucho más eficiente en el uso del agua. A fines de la década del 80 el riego por goteo superaba el 50% de la superficie cultivada y a fines de la década del 90 esta metodología alcanzaba a casi el 100% del área cultivada bajo cubierta. Esta modalidad de aplicación del agua de riego, aumento la eficiencia del uso del agua en un 60%. Paralelamente la expansión del riego por goteo, ha evolucionado y la implantación del fertirriego, es decir, sistemas que permiten la incorporación de los nutrientes necesarios al agua de riego, fue una muy buena evolución del sistema anterior. Luego una evolución del fertirriego fue la automatización del sistema en el invernadero. Aunque esta última variación se

ha dado lentamente, dada su complejidad y necesidad de conocimientos para aprovecharla. Ello implica una programación precisa de la incorporación de los nutrientes en el momento y en la cantidad adecuada, teniendo en cuenta que su incorporación al agua de riego conduce a modificaciones en el pH y en la CE. Los cultivos sin suelo, se han adaptados perfectamente a la fertirrigación de los invernaderos. Uno de los principales determinantes de la producción del sistema de CSS es el control del riego, que debe considerar la fenología del cultivo, las características del sustrato, las dimensiones del contenedor, la radiación incidente, la temperatura, la humedad del ambiente, el aporte de la solución nutritiva (frecuencia y dotación). Los ambientes con alta demanda hídrica se han asociado a la aparición de desordenes fisiológicos como es la necrosis apical en tomate y pimiento. Esta fisiopatía que tiene una incidencia económica de importancia, está relacionada con una restricción en el transporte de calcio hacia el fruto. Para la automatización del riego es necesario un ordenador que, ponga en marcha la electrobomba de riego y procede a satisfacer las necesidades hídricas. Los parámetros que definen la operación de riego son la dotación y la frecuencia, que se van adaptando a las necesidades del cultivo. Si la planta tiene una falta de agua, cierra sus estomas y deja de transpirar, esto trae consigo el calentamiento de las hojas por el sol, en consecuencia un incremento de la respiración. En CSS un día sin agua por problemas de abastecimiento, puede ser una catástrofe para el cultivo.

Cuál es la ventaja de producir bajo invernadero, si se consumen grandes volúmenes de agua?. La superioridad de los invernaderos radica en la mayor eficiencia en el uso del agua y consecuentemente en los mayores rendimientos.

Bibliografía

- CANOVAS, F.; DÍAZ, J.R. 1993. Cultivos Sin suelo. Curso Superior de Especialización. Ed. Instituto de Estudios Almerienses. Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. Almería.
- CANOVAS, F.; MAGNA, J.J.; BOUKHALFA, A. Cultivos sin suelo. Hidroponía. En Técnicas de producción de frutas y hortalizas en los cultivos protegidos del Sureste español. Ed. Instituto de la Caja Rural de Almería. Almería.
- FERNÁNDEZ, M.M.; AGUILAR, M.I.; CARRIQUE J.R.; TORTOSA, J.; GARCÍA, C.; LÓPEZ, M.; PÉREZ, J.M. 1998. Suelo y medio ambiente en invernaderos. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla.
- LLURBA, M. 1997. Parámetros a tener en cuenta en los sustratos. Revista Horticultura Nº 125 - Diciembre 1997.
- MAROTO, J.V. 1990. Elementos de Horticultura General. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

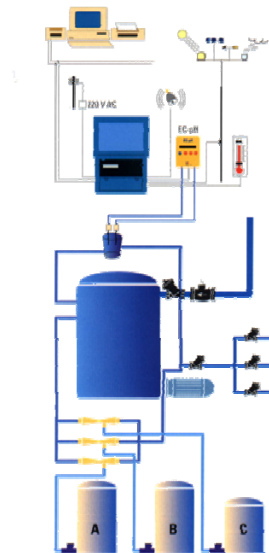
- MARTÍNEZ, E; GARCÍA, M. Cultivos sin suelo: hortalizas en clima mediterráneo. Ed Horticultura. Madrid.
- SADE, A. 1997. Cultivos bajo condiciones forzadas. Nociones generales. Ed. Hazera España 90, S.A. Tel Aviv. Israel.
- TERRES, V.; ARTETXE, A.; BEUNZA, A. 1997. Caracterización física de los sustratos de cultivo. Revista Horticultura Nº 125 - Diciembre 1997.
- URRESTARAZU, M. 1997. Manual De Cultivo Sin Suelo. Ed. Servicio de Publicaciones Universidad de Almería. Almería.

CAPÍTULO 6

Soluciones nutritivas II

Ricardo Andreau, Daniel Giménez y José Beltrano

Ordenadores



Introducción

Una solución nutritiva es un medio que le provee a la planta el agua y los nutrientes necesarios para su buen crecimiento y desarrollo. Una solución nutritiva completa debe tener los siguientes nutrientes; Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Azufre (S). Los mismos son conocidos como macronutrientes (gr/L). Otros elementos como el Hierro (Fe), Molibdeno (Mo), Boro (B), Zinc (Zn), Nickel (Ni) y Cobre (Cu), son los micronutrientes (mg/L). La planta no puede absorber estos elementos en su forma simple por lo que se les deben proveer en forma de iones, para que los pueda asimilar. Es importante mantener un pH de solución adecuado para que estos nutrientes se mantengan disueltos en la solución. La mayoría de las especies cultivadas crecen en medios ligeramente ácidos en un

rango de pH de 5.8-6.5. Si no se mantiene un rango de pH adecuado algunos elementos pueden precipitar, lo que ocasionaría que no estén disponibles para la planta y eventualmente se presentarían síntomas de deficiencia. Lo mismo ocurre con la conductividad eléctrica (CE). La CE se define como la capacidad que tiene una solución de transportar o conducir electricidad por unidad de área. La CE se mide en S/cm² (donde S = Siemens, la unidad del sistema internacional para la conductancia) o mhos/cm. Esta nos da una idea de la cantidad de sales disueltas en la solución. La misma se debe mantener en un rango de 1.8 – 2.3 mmhos/cm. Si no se mantiene este balance puede afectar la disponibilidad de los nutrientes.

Qué ocurre con el pH de la solución de fertirriego?

Los fertilizantes tienen un efecto considerable sobre el pH del agua de irrigación, en la que se los disuelve. El pH óptimo de la solución del suelo está entre 5.5 y 7.0. Valores demasiado altos de pH (>7.5) Disminuye la disponibilidad del Fósforo, Zinc y Hierro para las plantas y se pueden formar precipitados de carbonatos y ortofosfatos de Calcio y Magnesio en las tuberías y emisores. Cuando aumenta el pH de la solución de riego, las opciones para reducirlo son el ácido nítrico (HNO₃) o ácido fosfórico (H₃PO₄), con la ventaja que proveen a las plantas de Nitrógeno y Fósforo, respectivamente. Valores demasiado bajos de pH (<7.5) Puede aumentar las concentraciones de Aluminio y Manganeso hasta niveles tóxicos. Al mezclar dos soluciones fertilizantes, pueden formarse precipitados. Esto indica que los fertilizantes no son compatibles entre sí, y por lo tanto se debe evitar la colocación de ambos en un mismo tanque.

Se recomienda combinar los fertilizantes del siguiente modo

TANQUE A Fertilizantes sin Calcio

Sulfato de amonio
Fosfato monoamónico

Sulfato de potasio

Acido fosfórico

Sulfato de magnesio

Micronutrientes quelatados

TANQUE B Fertilizantes sin Fosfatos/Sulfatos

Nitrato de calcio

Ácido nítrico

Nitrato de magnesio

Suelos arenosos y sustratos artificiales

El cultivo de hortalizas y flores en invernaderos sobre suelos muy arenosos y/o en sustratos inertes requiere un especial y preciso control del fertirriego. Se trata de cultivos delicados, con corto e intenso período de crecimiento, muy sensibles al manejo nutricional, sin capacidad para prevenir cambios de pH o salinidad en el medio y con un sistema radicular poco desarrollado. Los ciclos de fertirriego deben ser frecuentes, homogéneos y precisos, controlados por un ordenador (software adecuado).

Controles

- Riego (en la solución de riego que emite el gotero)
- Que el pH, la CE y el volumen aplicados sean similares a los solicitados al ordenador
- Drenaje (en la solución drenada recolectada en la bandeja de drenaje)
- Que el diferencial de CE, el pH y el volumen drenado se encuentren dentro de los rangos normales

Para realizar las recomendaciones de fertilización

Adecuar las cantidades y relaciones de nutrientes según sean plantas en estado vegetativo, en floración, en fructificación o en senescencia.

Considerar el análisis foliar para determinar deficiencias.

Controlar las condiciones climáticas y de manejo para interpretar correctamente los valores de laboratorio. Exceso de agua, de humedad ambiental, excesiva transpiración, fríos intensos, luminosidad restringida u otros desvíos, pueden alterar profundamente la fisiología de cultivos intensivos y dificultar la interpretación de deficiencias.

La lechuga, como ejemplo, es una especie que si bien, no tiene elevadas necesidades nutritivas, es sensible a la salinidad elevada, a los desequilibrios nutricionales, y por su sistema radicular poco desarrollado, la afectan tanto la falta como el exceso de agua. Es sensible a la carencia de Boro y Molibdeno. Es sensible al Cloro en el agua de riego y es sensible a pH bajos.

Formulación de la solución nutritiva

La planta a través de su sistema radicular toma agua, oxígeno y nutrientes de la solución nutritiva. Los nutrientes serán aportados por la solución nutritiva. Esta solución contendrá los

misimos elementos que en los cultivos en suelo. Es clave la composición de solución nutritiva, ya que la misma deberá contener todos los elementos esenciales y en la cantidad y proporción adecuada para la especie y el momento fenológico del cultivo.

A. FERTILIZANTES PARA FERTIRRIEGO:

NITROGENADOS

NO₃K NO₃H (NO₃)₂Ca (NO₃)₂Mg

FOSFATADOS

PO₄H₃ PO₄H₂K PO₄H₂NH₄ FOSFATOURA

POTASICOS

SO₄K₂ NO₃K ClK

CALCICOS

(NO₃)₂Ca Cl₂Ca

MAGNESICOS

SO₄Mg (NO₃)₂Mg

MICROELEMENTOS

Quelatos Sulfatos

Pesos moleculares y equivalentes de los fertilizantes

Fertilizante	Riqueza	P. Molecular	Valencia	P. Equivalente
(NO ₃)Ca.4H ₂ O	15,5N;19Ca	236	2	118
NO ₃ K	13N; 38K	101	1	101
PO ₄ H ₂ K	23P; 28K	136	1	136
SO ₄ K ₂	45k; 18S	174,3	2	87,2
SO ₄ Mg.7H ₂ O	10Mg; 13S	246,3	2	123,2
PO ₄ H ₃ (85%)	26,6P; 61P ₂ O ₅	98	1	98
NO ₃ H (37%)	8,8N	63	1	63

Peso atómico de los elementos

Elemento	Peso Atómico	Elemento	Peso Atómico
N	14,0	Mn	54,9
P	31,0	Cu	63,5
K	39,10	Zn	65,4
Ca	40,08	B	10,8
Mg	24,31	Mo	95,9
S	32,10	Ni	58,7
Na	23,0	C	12,0
Cl	35,45	O	16,0
Fe	55,90	H	1,0

Fertilizantes para fertirriego (Riqueza: %)

	RIQUEZA DE LOS FERTILIZANTES (%)				
FERTILIZANTES	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
(NO ₃)Ca	15,5			19	
PO ₄ H ₃ (85%)		61			
NO ₃ K	13		46		
SO ₄ K ₂			52		
SO ₄ Mg					16
PO ₄ H ₂ K		53	34		
PO ₄ H ₂ NH ₄	12	61			

Soluciones nutritivas para especies hortícolas

	meq.L ⁻¹							mg.L ⁻¹				
	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ H ₂ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	Fe ⁺⁺	Mn ⁺⁺	Cu ⁺⁺	Zn ⁺⁺	B
TOMATE	10,5	0,5	1,5	7,0	3,75	1,0	2,5	0,56	0,56	0,03	0,26	0,22
PIMIENTO	11,75	0,0	1,25	6,0	3,75	1,25	1,25	0,56	0,56	0,03	0,26	0,22
BERENJENA	12,0	0,5	1,5	6,0	3,0	1,5	1,0	0,56	0,56	0,03	0,26	0,22
LECHUGA	9,5	0,5	1,0	5,75	2,25	1,0	1,0	0,56	0,56	0,03	0,26	0,22

Fertilizantes para fertirriego: compatibilidad

(NO ₃)Ca	PO ₄ H ₃	NO ₃ K	PO ₄ H ₂ K	SO ₄ K ₂	SO ₄ Mg	
C	I	C	I	I	I	(NO ₃)Ca
	C	C	C	C	C	PO ₄ H ₃
		C	C	C	C	NO ₃ K
			C	C	C	PO ₄ H ₂ K
				C	C	SO ₄ K ₂
					C	SO ₄ Mg

C. LOPEZ, 1997: C = COMPATIBLE I = INCOMPATIBLE

Relación entre mM. L⁻¹; meq. L⁻¹; mg. L⁻¹

Ión	mM. L ⁻¹	meq. L ⁻¹	mg. L ⁻¹
NO ₃ ⁻	1	1	62,0
PO ₄ H ₂ ⁻	1	1	97,0
K ⁺	1	1	39,1
Ca ⁺⁺	1	2	40,1
Mg ⁺⁺	1	2	24,3
SO ₄ ⁼	1	2	96,1
Na ⁺	1	1	23,0
Cl ⁻	1	1	35,5
CO ₃ H ⁻	1	1	62,0

Ejemplos de algunas soluciones nutritivas

mmol/L	Hoagland y Arnon (1938)	Verwer 1986	Graves(1983)	Sonneveld Voogt (1985)
N	15,0	12,3	12,5	10,7-17,0
P	1,0	1,25	1,6	0,95-1,45
K	6,0	7,1	10,0	7,6-12,7
Ca	4,0	4,25	5,6	3,75-7,5

Mg	2,0	1,0	2,0	1,6-2,0
S	2,0	3,3		
mg/L				
Fe	2,5	1,7	3,0	3,0-6,0
Mn	0,5	1,1	1,0	0,5-1,0
Cu	0,02	0,017	0,1	0,1
Zn	0,05	0,25	0,1	0,1
B	0,5	0,35	0,4	0,3-0,4
Mo	0,01	0,058	0,05	0,05

Ejemplos de algunas soluciones nutritivas

mmol/L	STEINER 1984	SONNEVELD 1986	Mavrogiannopolus PAPADAKIS 1987	DAY 1991
N	12,0	12,0	13,0	9,0-15,0
P	1,0	1,5	1,0	1,0
K	7,0	7,5	7,0	7,5
Ca	4,5	3,75	4,0	3,75
Mg	2,0	1,0	1,25	1,5
S	3,5			
mg/L				
Fe	1,33	0,56	3,5	2,0
Mn	0,62	0,55	1,0	0,75
Cu	0,02	0,03	0,02	0,1
Zn	0,11	0,46	0,5	0,5
B	0,44	0,22	0,3	0,4
Mo	0,049	0,05	0,05	0,05

Resultados de Analisis de agua de riego en la región Platenses					
	Col. La Plata	Olmos	Los Hornos	Va. San Luis	Gorina
pH	7,02	7,70	7,54	7,20	7,26
CE(mS.cm ⁻¹)	0,66	0,55	0,67	1,00	1,03
CO ₃ H ⁻¹	6,90	7,60	4,90	11,30	6,60
SO ₄ ⁼	0,52	1,00	0,80	1,00	2,10
Cl ⁻	0,60	0,50	0,30	0,90	1,10
K ⁺	0,21	0,30	0,20	0,40	0,30
Mg ⁺⁺	0,78	0,80	1,60	0,70	1,90
Ca ⁺⁺	1,12	1,50	1,10	4,10	1,70
Na ⁺	5,67	5,00	2,80	6,10	6,80
RAS	5,80	4,70	2,40	3,90	5,10
CSR	5,0	5,30	2,20	6,50	3,0
RASaj	11,7	9,70	4,90	10,0	11,10

Construcción de una solución nutritiva

	meq.L ⁻¹								mg.L ⁻¹				
	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻ H ₂	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺ +	SO ₄ ⁼	CO ₃ ⁻ H	Fe ⁺⁺	Mn ⁺⁺	Cu ⁺⁺	Zn ⁺⁺	B
Tomate Ideal	10,5	0,5	1,5	7,0	3,75	1,0	2,5	0,5	0,56	0,56	0,03	0,26	0,22
Agua de Riego	0	0	0	0,5	1,2	0,35	1,0	5,5	0	0	0	0	0
Diferencia	10,5	0,5	1,5	6,5	2,55	0,65	1,5	5,0	0,56	0,56	0,03	0,26	0,22

Al contenido de la solución ideal debe restársele el contenido del agua de riego. La diferencia nos da los iones que debemos agrega para llegar a la solución ideal

Construcción de una solución nutritiva

	meq.L ⁻¹							mg.L ⁻¹				
	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ H ₂ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	Fe ⁺⁺	Mn ⁺⁺	Cu ⁺⁺	Zn ⁺⁺	B
Diferencia	10,5	0,5	1,5	7,0	3,75	1,0	2,5	0,56	0,56	0,03	0,26	0,22

	NO ₃ ⁻	PO ₄ H ₂ ⁻	SO ₄ ⁼	
K ⁺	5,65		0,85	6,5
Ca ⁺⁺	2,55			2,55
Mg ⁺⁺			0,65	0,65
NH ₄ ⁺		0,5		0,5
H ₃ O ⁺	2,30	1		3,30
	10,50	1,5	1,5	13,5

$$\text{Acido} = \text{Peq.} \times \text{meq/L} \times \text{Conc.} = \text{L/1000 L}$$

$$\text{Densidad} \times \text{Riqueza} \times 10$$

$$\text{NO}_3\text{H} = (63 \times 1,80 \times 100) / (1,37 \times 37 \times 10) = 22,4 \text{ L}$$

$$\text{PO}_4\text{H}_3 = (1,50 \times 98 \times 100) / (1,70 \times 85 \times 10) = 10,2 \text{ L}$$

Calculo de la solución concentrada

$$\text{Fertilizante} = (\text{Peq.} \times \text{meq/L} \times \text{Con (L)}) / 1000 = \text{Kg/m}^3$$

$$\text{NO}_3\text{K} = (101 \times 5,65 \times 100) / 1000 = 57,065 \text{ Kg/m}^3$$

$$(\text{NO}_3)_2 \text{Ca} = (118 \times 2,55 \times 100) / 1000 = 30,1 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{NO}_3\text{NH}_4 = (80 \times 0,5 \times 100) / 1000 = 4,00 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{SO}_4 \text{K}_2 = (87 \times 0,85 \times 100) / 1000 = 7,40 \text{ Kg/m}^3$$

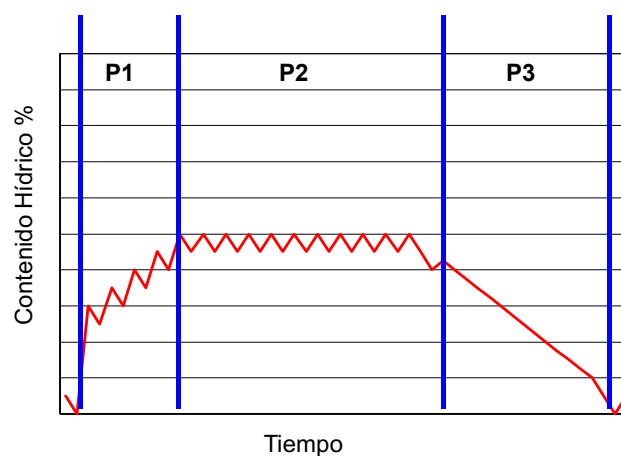
$$\text{SO}_4 \text{Mg} = (123 \times 0,65 \times 100) / 1000 = 8,00 \text{ Kg/m}^3$$

La nutrición mineral determinará la característica del crecimiento de los vegetales. En función de ello podemos observar que el crecimiento puede ser:

1. Crecimiento vegetativo:
 - a. Crecimiento radicular
 - b. Crecimiento de tallos y hojas
 2. Crecimiento reproductivo:
 - a. Aparición de flores
 - b. Aparición y crecimiento de frutos
- i. La planta en estado reproductivo tiene como destino principal los órganos reproductivos, las flores y los frutos
 - ii. Luego un destino importante son los meristemas apicales del tallo
 - iii. Finalmente será un destino secundario, las raíces.
 - c. El objetivo de esta etapa, es el de preparar una planta para pasar de la etapa vegetativa a su estado reproductivo.

RITMOS DE RIEGO

Períodos del contenido hídrico diario



Control del riego a través del ciclo del cultivo

P1: Periodo 1.

- A. Desde el primer riego hasta que empieza a drenar
- B. Incremento constante de la humedad
- C. Primer riego cuando la planta está en actividad

P2: Periodo 2 o periodo de drenaje

- A. Desde el primer drenaje hasta el último riego.

P3: Periodo 3.

A. Desde el último riego al primer riego siguiente.

Características del riego en función del amanecer y del incremento del contenido hídrico.

Periodo 1

Inicio del Riego	Tiempo en función del amanecer
0-1 horas después del amanecer	Temprano
1-2 horas después del amanecer	Normal
2-4 horas después del amanecer	Tardío
Incremento del contenido de humedad del sustrato/día en P1	
Incremento del CH en P1	Tipo de incremento
0-5%	Pequeño
5-10%	Normal
10-15%	Grande

Periodo 2 o periodo de drenaje.

Tiempo de Drenaje después del primer riego	Tiempo Relativo
1-2 horas después del primer riego	Temprano
2-3 horas después del primer riego	Normal
3-4 horas después del primer riego	Tardío
FIN DE RIEGO	TIEMPO RELATIVO
0-1 horas antes del atardecer	Temprano
1-3 horas antes del atardecer	Normal
3-6 horas antes del atardecer	Tarde

Con muy baja radiación se puede estar sin drenaje dos días. Con alta radiación, drenaje 20%, puede aumentar la CE, cambiar el pH o generar desbalances nutricionales

Periodo 3.

Perdida del CH en % , 3 horas después del último Riego	Causas
0-2%	Riego muy tardío
2-4%	Fin de riego en el momento adecuado

>4%	Detención del riego muy temprano
Diferencia del CH en %, entre día/noche	influencia en el Desarrollo de la Planta
4-6%	Vegetativa
6-8%	Normal
8-12%	Reproductiva

Manejo del control hidrico según la radiación.

Manejo en condiciones de baja radiacion

En otoño el CH baja gradualmente siguiendo la radiación (sin estrés).

Consecuencias:

- La raíz crece y explora el contenedor
- Buen desarrollo de los frutos
- Favorece la floración y el cuaje de los frutos
- Mayor cantidad de fruto

Manejo en condiciones de alta radiacion

- En primavera el CH aumenta siguiendo la radiación
- El ascenso es gradual y prevé repentinos aumentos de la radiación

Consecuencias

- La raíz es estimulada para incrementar la absorción de agua
- Con riegos frecuentes y cortos, se estimula el crecimiento vegetativo
- Riegos prolongados se estimula el incremento en el peso de los frutos
- En los periodos de mayor radiación, se logran mejores frutos

Control del CH y la CE en verano.

Si la variación entre le CE del drenaje y la CE del riego es:

- ✓ < 0,3 mS el riego fue muy abundante el día anterior
- ✓ 0,3 a 0,8 mS normal
- ✓ > 1 mS riego escaso o planta en estado reproductivo

Drenaje

- ✓ Mínimo 25%
- ✓ El 35% del drenaje debería suceder entre las 11 y las 15 hs

Gotos: deberían coleccionar 2 L/h

Porcentajes de drenaje según la radiación

- ✓ Alta radiación (soleado) 20-30%
- ✓ Nublado 10-20%

Horarios sugeridos para el riego, en función del amanecer y del ocaso

	Inicio (Amanecer)	Finalizar (Ocaso)
Temprano	0-1 horas	3-6 horas
Normal	1-2 horas	1-3 horas
Tardío	2-4 horas	0-1 horas

Volúmenes típicos en cc/m³ de solución utilizada:

Culivo	Volumen de Sustrato (L)	Volumen de riego en cc/m ³		
		Bajo	Normal	Alto
Tomate	9 a 9,5	200-300	300-400	400-500
Pimiento	10 a 13	200-300	300-400	400-500
Pepino	8-9	150-200	200-250	300-400

Consumo nocturno: Del total diario, el 15% la planta lo absorbe durante la noche.

Algunas condiciones del medio determinarán las características del crecimiento.

Condiciones que en general determinan el crecimiento vegetativo:

- ✓ Alta temperatura media diaria
- ✓ Baja amplitud térmica (variación entre la temperatura diurna-nocturna)
- ✓ Alta humedad relativa
- ✓ Bajos niveles de radiación
- ✓ Baja conductividad eléctrica (CE) del sustrato

Características del riego:

- ✓ Comenzar el riego a la mañana temprano

- ✓ Finalizar el riego en horas tardías
- ✓ Incrementar la frecuencia de los riegos
- ✓ Incrementar la nutrición con Ca^{++} , NO_3^- , NH_4^+
- ✓ No general situaciones de estrés de cualquier naturaleza.

Condiciones que en general determinan el crecimiento reproductivo:

- ✓ Bajas temperaturas medias diarias
- ✓ Alta amplitud térmica (variación entre la temperatura diurna-nocturna)
- ✓ Baja humedad relativa
- ✓ Altos niveles de radiación
- ✓ Alta CE del sustrato

Características del riego:

- ✓ Comenzar tarde
- ✓ Terminar temprano
- ✓ Menor frecuencias de riego
- ✓ Incrementar la nutrición con K^+ , $\text{SO}_4^{=}$, Na^+ , Cl^-
- ✓ General situaciones de estrés de cualquier naturaleza.

Algunas características del crecimiento en las plantas de pimiento, cultivadas en invernadero sin suelo, nos pueden indicar u orientar si estamos ante una planta que está en su etapa de crecimiento vegetativo o reproductivo.

Crecimiento en altura o longitudinal del tallo principal:

- ✓ Si el crecimiento semanal supera los 5 cm, crecimiento vegetativo.
- ✓ Si el crecimiento semanal es menor a los 3 cm, crecimiento reproductivo.

Forma de las hojas:

- ✓ Hojas redondeadas, crecimiento vegetativo
- ✓ Hojas con extremos o puntas lanceoladas, crecimiento reproductivo

Algunas consignas que se podrían tener en cuenta en el manejo de especies solanáceas en cultivos con solución nutritiva sobre sustratos.

Antes de plantar o instalar el cultivo:

- ✓ Saturar el sustrato 24 horas antes de instalar el cultivo
- ✓ Utilizar solución nutritiva (nunca agua)
- ✓ No dejar secar el sustrato
- ✓ Optima CE (2,5 a 3,5 mS/cm)

- ✓ Optimo pH 5,3 a 5,7.

Plantación o trasplante. Puntos básicos de manejo.

- ✓ Regar con solución
- ✓ Con temperaturas elevadas, NO regar al mediodía
- ✓ Al trasplante, el sustrato debe estar bien húmedo
- ✓ Si la temperatura es elevada, regar el plantín antes de las 9 hs o después de las 19 hs.
- ✓ Al trasplante, pocos riegos mas prolongados (200 cc/pl)
- ✓ Luego de instalado el cultivo, con buena formación de raíces, bajar la CE, el óptimo es $CE > 2,6 < 4,0$ mS/cm

Puntos básicos a tener en cuenta en cuanto a la CE. Un dato que es de importancia es la relación que existe entre la CE del gotero (la solución original de riego) y la CE del drenaje, la solución que se obtiene luego de pasar por las raíces, que absorbieron los nutrientes requeridos.

- ✓ La diferencia entre el gotero y el drenaje varía entre 0,5 y 2,5
- ✓ La diferencia óptima: 1-1,5.

Baja CE

- ✓ Hojas grandes
- ✓ Hojas tiernas
- ✓ Hojas moteadas
- ✓ Dificultades en la polinización

Acciones a desarrollar

- ✓ Aumentar la CE a razón de 0,5 mS/día
- ✓ Medir el contenido hídrico (CH)
 - Bajo= riego corto 100 cc
 - Alto= riego largo 300 cc

Alta CE

- ✓ Ápices o puntos de crecimiento oscuros
- ✓ Frutos pequeños
- ✓ Tallo fino
- ✓ Muchas flores

Acciones a desarrollar

- ✓ Bajar la CE a razón de 1,0 mS/día (max.)
- ✓ Riegos prolongados
- ✓ Verificar y analizar el drenaje al mediodía

- ✓ No regar con agua sola

Puntos básicos a tener en cuenta en cuanto al pH.

- ✓ pH óptimo: 5,6
- ✓ pH bajo: <5,2

Ápice clorótico

- ✓ Detención en la floración
- ✓ Raíces traslúcidas

Acciones a desarrollar

- ✓ Riegos prolongados
- ✓ Controlar sanidad de raíz
- ✓ Reducir o quitar riego con NH_4^+

pH alto >6,2

- ✓ Hojas oscuras (azuladas)
- ✓ Moteado amarillo (deficiencia Mn)
- ✓ Ápice clorótico (deficiencia de Fe)

Acciones a desarrollar

- ✓ Riegos prolongados
- ✓ Aumentar amonio (20% del nitrógeno total)
- ✓ Aportar Fe al estado Fe eddha

Puntos básicos a tener en cuenta en cuanto al CH del sustrato (Contenido hídrico).

- ✓ Rangos de CH entre 50 y 80%.
- ✓ En invierno entre 55 y 65%
- ✓ En verano entre 60 y 75%

Baja humedad

- ✓ Ápice oscuro
- ✓ Hojas pequeñas
- ✓ Entrenudos cortos

Acciones a desarrollar

Riego

- ✓ Comenzar al amanecer
- ✓ 2-3 riegos por hora

- ✓ Riegos hasta las 22 hs

Alta humedad

- ✓ Hojas grandes
- ✓ Entrenudos largos

Acciones a desarrollar

Riego

- ✓ Iniciar riego 2 h después del amanecer
- ✓ Finalizar riego 2 h antes del ocaso

Volúmenes de sustratos utilizados en plantas horticolas.

- ✓ Entre 2,5 y 13 litros por planta
- ✓ Normal entre 5 y 8 litros por planta.

El futuro de los cultivos hidropónicos.

La producción de frutas y verduras en los países industrializados se ve sometida a la competencia de productores con bajos costos de producción. El arma que tienen los agricultores del primer mundo para resistir esta competencia, es incrementar la producción y la calidad del producto, contando para ello con superior tecnología, más y mejores infraestructuras. Los CSS han constituido hasta ahora parte de esa diferencia tecnológica. Además, es posible que en un futuro más o menos próximo, según el avance tecnológico de la región, los cultivos en hidroponía se incrementarán de manera similar a como estos han ido sustituyendo a los cultivos en suelo, en muchas e importantes regiones del mundo. Las mayores posibilidades tecnológicas de control de condiciones, que serán cada día más accesibles tecnológicamente y económicamente. La menor contaminación, el mejor aprovechamiento energético, el menor costo, etc. Juegan a favor de estos sistemas de cultivo. Esperemos que sobre esta base, en nuestro país también se alcance un rápido desarrollo.

Porque no avanzan los cultivos sin suelo (CSS) en la Argentina?

- ✓ Por la complejidad del sistema?
- ✓ Es para países que no tienen tierras fértiles?
- ✓ Es más caro?
- ✓ Falta de información?
- ✓ Falta de formación profesional?

Bibliografía

- CANOVAS, F.; DÍAZ, J.R. 1993. Cultivos Sin suelo. Curso Superior de Especialización. Ed. Instituto de Estudios Almerienses. Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. Almería.
- CANOVAS, F.; MAGNA, J.J.; BOUKHALFA, A. Cultivos sin suelo. Hidroponía. En Técnicas de producción de frutas y hortalizas en los cultivos protegidos del Sureste español. Ed. Instituto de la Caja Rural de Almería. Almería.
- FERNÁNDEZ, M.M.; AGUILAR, M.I.; CARRIQUE J.R.; TORTOSA, J.; GARCÍA, C.; LÓPEZ, M.; PÉREZ, J.M. 1998. Suelo y medio ambiente en invernaderos. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla.
- LLURBA, M. 1997. Parámetros a tener en cuenta en los sustratos. Revista Horticultura Nº 125 - Diciembre 1997.
- MAROTO, J.V. 1990. Elementos de Horticultura General. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- MARTÍNEZ, E; GARCÍA, M. Cultivos sin suelo: hortalizas en clima mediterráneo. Ed Horticultura. Madrid.
- SADE, A. 1997. Cultivos bajo condiciones forzadas. Nociones generales. Ed. Hazera España 90, S.A. Tel Aviv. Israel.
- TERRES, V.; ARTETXE, A.; BEUNZA, A. 1997. Caracterización física de los sustratos de cultivo. Revista Horticultura Nº 125 - Diciembre 1997.
- URRESTARAZU, M. 1997. Manual De Cultivo Sin Suelo. Ed. Servicio de Publicaciones Universidad de Almería. Almería.

CAPÍTULO 7

Sanidad vegetal. Plagas

Araceli L. Vasicek

Plagas: Introducción

Los cultivos y plantineras pueden ser afectadas por plagas y enfermedades que reducen el vigor y capacidad de producción de las plantas. Las *plagas* tradicionalmente están constituidas por Artrópodos (insectos y ácaros); nematodos; caracoles; aves y roedores; en la actualidad estos últimos se agrupan en animales superiores.

Los métodos hidropónicos de producción de hortalizas aumentan la productividad y la inocuidad de los productos obtenidos al mismo tiempo que, por la aplicación de técnicas apropiadas, reducen las plagas y enfermedades. Sin embargo estos cultivos no escapan a la necesidad de controlar plagas y enfermedades a través de métodos de bajo impacto para la salud humana y el ambiente. Los sistemas hidropónicos son mucho menos propensos a tener ninguno de los problemas de enfermedades transmitidas por la tierra que afectan a las plantas de producción tradicional. Los hongos e insectos que viven en la tierra no estarán presentes en el medio de cultivo de un sistema hidropónico, lo que reduce la cantidad de productos químicos necesarios para una planta saludable y hace que sea menos probable que se pierda el cultivo debido a la interferencia de enfermedades y plagas del suelo. En plantas hidropónicas que crecen en interiores, es más fácil de identificar los problemas de plagas antes de que se conviertan en un problema grave.

Plaga Agrícola

En su sentido amplio, una plaga se define como cualquier especie animal que el hombre considere perjudicial o dañina a su persona, a su propiedad o al medioambiente. De modo que existen plagas de interés médico, tales como los vectores de enfermedades humanas (mosquitos, vinchucas, etc.); plagas de interés veterinario (pulgas y garrapatas en animales) y plagas agrícolas que afectan las plantas cultivadas así como los productos vegetales ya sean frescos o almacenados (diversos insectos como chinches, isocas, vaquitas, gorgojos y roedores). Se considera plaga agrícola a una población de animales fitófagos (que se

alimentan de plantas) que disminuye la producción del cultivo, reduce el valor de la cosecha o incrementa sus costos de producción. Se trata de un criterio esencialmente económico.

Otros conceptos propuestos actualmente consideran que, si existe una especie potencialmente dañina y se dan las condiciones agroecológicas que permiten el desarrollo de poblaciones, que creen una situación de riesgo de pérdidas de producción, se está ante la presencia de una plaga. Éste es un concepto ecológico de plaga, ya que considera que en condiciones ecológicas adversas, donde no se pueda desarrollar un número significativo de individuos capaces de causar daño económico, el ente biótico potencialmente dañino, no debe considerarse plaga. Algunos autores apoyan esta tendencia separando así el concepto de plaga de la especie animal que produce el daño, evitando establecer clasificaciones de especies 'buenas' y 'malas', y facilitando la explicación de por qué una especie es beneficiosa en un lugar y perjudicial en otro. Si bien ambos conceptos son antropocéntricos, actualmente, la comunidad internacional admite la definición siguiente para plaga: “Cualquier especie, raza o biotipo vegetal o animal o agente patógeno dañino para las plantas o productos vegetales”.

Categorías de plagas

No todas las poblaciones de animales fitófagos en un cultivo constituyen plagas, ni todas las plagas presentan la misma gravedad o persistencia en sus daños. De allí que se suele distinguir diversas categorías de plagas cuyas caracterizaciones tienen implicancias prácticas, en las medidas de protección del cultivo. Las principales categorías son:

Plaga Primaria, clave o permanente: Son especies de organismos fitófagos que en forma persistente, año tras año, se presentan en poblaciones muy abundantes, de alta densidad, ocasionando daños económicos a los cultivos. También aquellas que producen daños importantes al cultivo, aún a niveles bajos de densidad, cuando son vectores de enfermedades. En condiciones normales del cultivo carecen de factores de represión natural eficientes, en general se trata de plagas introducidas a lugares donde el clima les resulta favorable. Es decir, una plaga clave se presenta en forma permanente, produce daño económico y exige medidas permanentes de control. Ej. “arañuela roja común”.

Plagas Secundaria: Son aquellas que pueden estar presentes en el cultivo con una densidad poblacional por debajo del umbral de daño que en condiciones favorables para su desarrollo pueden convertirse en un problema. Aquellas poblaciones de organismos fitófagos que se presentan en cantidades perjudiciales solamente en ciertas épocas o años, mientras que en otros períodos carecen de importancia económica. El incremento de las poblaciones suele estar asociado con factores climáticos, variaciones en las prácticas culturales, deficiencia temporal en la represión por enemigos naturales y/u otros factores. Ej. “cochinillas harinosas”, que suelen pasar desapercibidas por la eficiente represión que ejercen sus enemigos

naturales; pero si éstos son destruidos por la aplicación de insecticidas, la cochinilla harinosa se puede transformar en una plaga seria.

Existen otras calificaciones útiles según la relación que existe entre la parte de la planta que es dañada por el insecto y la que se cosecha.

Plaga Directa: Cuando el insecto daña a los órganos de la planta que el hombre va a cosechar. Ej. las larvas de la polilla de la manzana que perforan los frutos.

Plaga Indirecta: Cuando el insecto daña órganos de la planta que no son las partes que el hombre cosecha. Ej. las moscas minadoras que dañan las hojas del tomate mientras que los órganos que se cosechan son los frutos.

Grupos de Plagas

a) Insectos Chupadores: Corresponden a insectos que en estado joven y adulto, chupan o succionan en general savia de las plantas y otros extraen jugos celulares de los tejidos vegetales con su aparato bucal. Al punzar los tejidos provocan lastimaduras o lesiones, luego por la succión se produce el marchitamiento y posteriormente el secado de las plantas. En este grupo se encuentran los pulgones, moscas blancas, trips, etc.

b) Insectos Masticadores: Son aquellos que en estado joven y adulto se alimentan de hojas, tallos, brotes, frutos, semillas; realizan sus daños mediante cortes y perforaciones. Ejemplo: gusanos cortadores, medidores y cogolleros; pulgillas, grillos, langostas.

c) Insectos Barrenadores y Minadores: Son insectos que sus estados jóvenes realizan galerías en tallos, hojas, frutos y raíces, secando y matando a las plantas. Ejemplo: gusanos alambre, larvas barrenadoras de tallos, de frutos, minadores internos de tejidos en hojas (dibujante) y en frutos. Solo en madera de árboles frutales y forestales se desarrollan larvas conocidas comúnmente como “taladros” realizando galerías en troncos y maderos.

d) Ácaros: adultos son organismos casi microscópicos, de ocho patas que succionan jugos celulares de los tejidos de las plantas, principalmente en hojas y frutos. Ejemplo: arañuela roja, ácaro blanco, etc.

e) Nemátodos: Los que atacan plantas son gusanos microscópicos. Habitualmente viven en el suelo y atacan las raíces de la planta, donde se alimentan de jugos celulares, desde el exterior o interior de los tejidos, en este último caso inducen la formación de tumoraciones o agallas que interrumpen la circulación. Ejemplo “papitas”, engrosamiento, nudos o agallas a nivel radicular.

PLAGAS PRINCIPALES

- 1- Arañuela roja
- 2-Trips

- 3- Pulgones
- 4- Moscas blancas
- 5- Dibujante
- 6- Polilla del tomate

1. Arañuela roja: *Tetranychus urticae* (Clase Arácnida-Orden Acari).

Es un ácaro de pequeño tamaño, mide aproximadamente 0,6 mm; se puede reconocer su presencia a simple vista como pequeños puntos rojizos en las hojas o en los tallos. Durante el verano poseen una coloración verdosa con dos manchas más oscuras en los laterales, pero cuando se aproxima el invierno, la coloración es rojo intenso, siendo la forma de resistencia. En condiciones óptimas de temperatura (23-30°C), desarrollan su ciclo (Huevo-Larva-Protoninfa-Deutoniña-Adulto) entre 8-14 días. Cada hembra puede vivir 20-28 días y en ese período coloca 100-200 huevos. Las abundantes colonias de arañuela roja viven generalmente agrupadas en el envés de las hojas. Producen hilos de seda en gran cantidad, que le sirven de protección frente a enemigos naturales y controles químicos con acaricidas (Figura 1).



Figura 1 - Arañuela roja. (cortesía Urretabizkaya, N.)

Daños: Es un ácaro muy polífago pudiendo atacar especies hortícolas, florícolas, ornamentales, etc. La estructura bucal consta de 2 quelíceros con los que punza células superficiales, se alimenta del contenido o jugo celular principalmente de hojas, absorbiéndolo célula a célula, dejando una pequeña mancha amarillenta (puntuaciones cloróticas) que contrasta con el verde normal de la hoja. Ataques severos causan decoloración generalizada de las hojas con muerte posterior de los tejidos (necrosis) evidenciándose de color castaño, deshidratadas provocan intensas defoliaciones. Con altas temperaturas y sequía, la abundante tela con la que envuelve las hojas, reduce la fotosíntesis e incluso llegan a matar a la planta. Los ataques se dan en focos y la

multiplicación se ve favorecida por el buen estado nutricional de las plantas específicamente con respecto al nitrógeno. Los daños directos consisten en la destrucción de tejido epidérmico, la deformación y muerte de hojas y brotes, el debilitamiento general y muerte de plantas; mientras que los indirectos conducen a la pérdida de calidad comercial.

Opciones de manejo

Mantener sin malezas dentro y fuera de las instalaciones. Desinfectar los utensilios de trabajo. En presencia de poblaciones altas de ácaros se recomienda la aplicación de productos a base de azufre, en horas de la tarde. Emplear preparados vegetales y acaricidas permitidos en cultivos orgánicos. Tener en cuenta presencia natural de ácaros acarófagos.

2. *Trips: Thrips sp. Frankliniella sp. (Clase Insecta-Orden Tisanóptero)*

Son insectos de pequeño tamaño, alcanzando a medir entre 1-2 mm de longitud; cuerpo alargado de color amarillento a castaño oscuro. La estructura bucal consta de un cono bucal (aparato bucal picador-suctor de 3 estiletes), con el cual perforan/roen la epidermis, inyectan saliva y se alimentan de jugos celulares, las células así vaciadas, se llenan de aire tomando la zona atacada color plateado. La mayoría de las especies son polífagas atacando cultivos hortícolas, florícolas, frutales, malezas, etc. Ciclo biológico (Huevo, Ninfa1, Ninfa2, Prepupa, Pupa y Adulto) es de duración variable, pero las especies de mayor importancia como: *Frankliniella schultzei*, "trips de las flores"; *Thrips tabaci*, "trips de la cebolla" y *Frankliniella occidentalis* "trips californiano de las flores" pueden cumplirlo en 15 días o menos, favoreciéndolo las altas temperaturas y escasa humedad ambiental, resultando así en más de 10 generaciones por año. Los huevos son encastrados por la hembra, dentro del tejido vegetal, colocando hasta 300 huevos durante 1 mes. Los estados pupales no ocasionan daños, son inactivos y se encuentran ocultos en la base de la planta.

Daños: Los daños directos los realizan por oviposición y alimentación: Un tipo de lesión lo ocasionan las hembras al encastrar sus desoves; los huevos reniformes son colocados debajo de la epidermis y cubiertos por excrementos, dando el aspecto de "hojas sucias". Alrededor de la zona de la incisión se apreciará tejido clorótico o corchoso. Otro daño lo realizan con el aparato bucal tanto adultos como ninfas, resultando zonas alargadas plateadas, por que las células atacadas se llenan de aire al ser raspadas y vaciados sus jugos celulares, con posterior necrosis y defoliación. Los daños directos los realizan atacando tejidos tiernos de yemas, de hojas, flores y frutos en crecimiento, mediante manchas en forma de estrías plateadas, luego necrosis con coloración parda (Figura 2). En ataques importantes producen deformación de yemas y aborto de flores y frutos. Los daños indirectos lo realizan por ser vectores de enfermedades virales, en cultivos hortícolas y florícolas predomina la transmisión del virus de la Peste Negra (TSWV) que es adquirido por las Ninfas1 al atacar una planta enferma y es transmitido por los adultos cada vez que se alimentan. Las plantas enfermas con peste negra,

se presentarán amarillentas, enanas, con hojas manchadas, deformadas; con aborto de botones florales y manchados de frutos, entre otros síntomas.

Opciones de manejo

Destruir residuos de cultivos del interior y de los alrededores del invernadero. Enemigos naturales: estimular la presencia de vaquitas benéficas o chinitas (A) (larvas y adultos de insectos coleópteros coccinélidos), crisopas (B) (larvas de insectos neurópteros) y chinche Orius (género de ninfas y adultos de insectos hemípteros heterópteros) que son eficientes depredadores de los trips. Los tisanópteros adultos aunque de vuelos cortos, son altamente invasivos. Es posible detectar a tiempo su presencia y disminuir las poblaciones con el uso de trampas pegajosas amarillas o azules dado que son fuertemente atraídos por estos colores. Emplear preparados vegetales e insecticidas permitidos en cultivos orgánicos. Proteger las instalaciones con mallas de polietileno anti insectos, a modo de bloqueo físico.



Figura 2 - Trips (cortesía Urretabizkaya, N.)



Vaquitas (cortesía Urretabizkaya, N.)

3. Pulgones: *Myzus persicae*, *Aphis fabae*, *Macrosiphum euphorbiae*, *Aulacorthum solani*, *Brevicoryne brassicae*, *Uroleucon ambrosiae*. (Clase Insecta-Orden Hemípteros-Flia. Afídidos)

Los pulgones o áfidos son pequeños insectos, alcanzan a medir entre 1,5 a 4,5 mm de longitud, de cuerpo globoso y blando, de colores variables como verde claro u oscuro (Figura 3), amarillento, rojizo, grisáceo o negro. Con el



(B) larva de crisopa (cortesía Urretabizkaya, N.)

aparato bucal picador suctor, punzan, inyectan saliva con sustancias a veces tóxica y extraen por succión savia de hojas y brotes. Las numerosas colonias viven formando masas de poblaciones de insectos, principalmente sobre tejidos en crecimiento con presencia de jóvenes y adultos con o sin alas (Figura 4). La mayoría de los pulgones eliminan por la cámara filtro del aparato digestivo grandes cantidades de melado permitiendo el desarrollo de hongos fumagina, que al cubrir el follaje impiden la fotosíntesis y la acción de controles químicos. Las hembras sin haber sido fecundadas pueden parir jóvenes embriones llamadas ninfas; que luego de 4 estadios ninfales se transforman en adultos. Desarrollan el ciclo en pocos días, ejemplo: el pulgón *Myzus persicae* en condiciones óptimas a 24°C puede realizar un ciclo completo en 7 días; las hembras pueden parir 400 ninfas hijas en 15 días. Cuando el alimento vegetal es escaso o hay superpoblación, surgen los individuos adultos alados que migran a otras plantas en busca de nuevos cultivos.



Figura 3 - Pulgones (cortesía Urretabizkaya, N.)



Figura 4 - Colonia de pulgones (cortesía Urretabizkaya, N.)

Daños: La mayoría de las especies de áfidos son polípagas de cultivos hortícolas, florícolas, cereales, frutales, etc., mientras que algunas son específicas de ciertos grupos botánicos (Ej. *B. brassicae* en brassicáceas). Cuando las poblaciones de pulgones son abundantes, la extracción de savia en grandes cantidades debilita la planta hasta poder ocasionar su muerte. Otro daño directo observable consiste en la deformación de hojas y brotes ocasionando la pérdida de flores y frutos. Los daños indirectos consisten en la producción de líquido azucarado (melado) sobre el cual desarrolla el hongo fumagina, que es una cubierta de apariencia pulverulenta de color negro, sobre la superficie de las hojas, la cual disminuye la capacidad fotosintética y evapotranspiración foliar. Otro daño indirecto resulta al enfermar los cultivos ya

que pueden transmitir virus a las plantas, los cuales causan cuantiosas pérdidas económicas ya que el cultivo se puede perder completamente.

Opciones de manejo

Los controles que se aplican para otras plagas normalmente eliminan a los pulgones. Varias especies de enemigos naturales (depredadores, parasitoides y patógenos) regulan sus poblaciones. Entre los depredadores más importantes se encuentran larvas y adultos de vaquitas benéficas (A), larvas de crisopas (B), jóvenes ninfas y adultos de chinches y larvas de moscas sírfidas. Además, existen varias especies de avispidas parasitoides. Se recomienda el uso de trampas pegajosas amarillas. Proteger las instalaciones con mallas de polietileno anti insectos, a modo de bloqueo físico. De ser necesario aplicar control químico selectivo con productos que no afecten a esta fauna benéfica.

4. Moscas blancas: *Trialeurodes vaporariorum*, *Bemisia tabaci* (Clase Insecta-Orden Hemípteros-Flia. Aleiródidos)

Insectos delicados y pequeños, miden de 1 a 2 mm de longitud. Presentan el cuerpo y los dos pares de alas recubiertos de una sustancia cerosa blanca, por lo cual se conocen como "moscas blancas" (Figura 5). Son consideradas plagas primarias en invernaderos, de carácter polífagas, atacando todo tipo de cultivo hortícola y florícola principalmente. Las moscas blancas son plagas de alto potencial reproductivo y *Bemisia* posee diferentes tipos biológicos. Los adultos al igual que las jóvenes ninfas, poseen aparato bucal picador-suctor; normalmente se ubican en el envés de las hojas donde se alimentan de savia. La hembra luego de ser fecundada, ovipone durante 3 a 6 semanas colocando hasta 300 pequeños huevos, blanquecinos y ovales con pedúnculo mediante el cual los fija al envés de las hojas en círculos o semicírculos. De ellos nacen ninfas que al principio son transparentes y luego color verde claro. Son móviles sólo en el primer estadio ninfal, las posteriores ninfa II y III son inmóviles y representan el estado de mayor consumo. La ninfa IV también llamada pupa es un estado de reposo, durante el cual no se alimentan. El ciclo completo lo cumplen en 20 a 30 días a temperatura óptima de 21- 24 °C con un máximo de 32°C. En condiciones de invernadero pueden desarrollar hasta 10 generaciones/año.



Figura 5 - Moscas Blancas (cortesía Urretabizkaya, N.)

Daños: Las mosquitas blancas se congregan en gran cantidad en el envés de las hojas superiores y en general vuelan hacia el haz cuando se las molesta. Los adultos y huevos se detectan en hojas jóvenes, mientras que las ninfas se ubican normalmente en hojas viejas. El daño directo es producido por ninfas y adultos por extracción de savia e inyección de saliva tóxica en la planta. Cuando hay grandes poblaciones ocasionan debilitamiento, deshidratación, detención del crecimiento, muerte de hojas y disminución del rendimiento. Los daños indirectos consisten en la producción de líquido azucarado (melado) por el aparato digestivo, sobre el cual desarrolla el hongo fumagina, que cubre de color negro la superficie de hojas y frutos. Aunque los daños más importantes los producen por transmisión de virus que provocan escaso rendimiento y frutos pequeños. Por el desarrollo de fumagina, se pierde calidad comercial y gasto extra por el lavado que debe realizarse de los frutos

Opciones de manejo

Se recomienda como control cultural utilizar malla anti-insectos; la colocación de trampas pegajosas de plástico color amarillo en diferentes sitios del cultivo, para monitoreo y descenso poblacional; la eliminación de restos vegetales y si hubiere cerca malezas que actúan como reservorios. Emplear preparados vegetales e insecticidas permitidos en cultivos orgánicos con bajas poblaciones. Las aplicaciones mediante el control químico convencional se llevarán a cabo cuando se inicie la instalación de la plaga en los cultivos jóvenes y en épocas propicias para su desarrollo. Cuando el cultivo esté avanzado y la época no sea la propicia se podrán dilatar las intervenciones. En tomate bajo cobertura con manejo tradicional, se sugiere realizar el control químico cuando se observen más de 5 *Bemisia* adultas por hoja y más de 10 *Trialeurodes*. Tener en cuenta la presencia de organismos de control biológico como avispias que parasitan pupas de la moscas, se presentan de color negro o anaranjado intenso; chinches depredadoras míridas (*Tupiocoris cucurbitaceus*), Orius; como también crisopas entre otros.

5. Dibujante: *Liriomyza* spp. (Clase Insecta-Orden Dípteros-Flia. Agromícidos)

Es una plaga polífaga de presencia habitual en cultivos hortícolas y florícolas. Los adultos del “dibujante” o “minador de la hoja” son moscas pequeñas, miden 2-3 mm de longitud. El cuerpo es de color negro brillante con amarillo, dorsalmente posee entre las alas una mancha triangular amarillo brillante característica. Los adultos son muy buenos voladores y se mueven alrededor de las plantas con rápidos movimientos irregulares. Las hembras perforan las hojas jóvenes formando las llamadas “punteaduras” y oviponen un huevo dentro de cada una de ellas; alimentándose del líquido que emana de las picaduras. En plantineras las oviposiciones comienzan en las hojas basales, resultando inapreciable a la observación, y solo visible cuando el daño se establece. Después de unos días, nacen las larvas que comienzan a alimentarse en el tejido del mesófilo de la planta, por debajo de la superficie superior de la hoja. Las larvas alcanzan unos 2 a 3,5 mm de longitud, son de color amarillento, van minando las hojas y avanzan a medida que crecen. Las larvas que emergen de las galerías internas después de haber completado tres estadios (L1, L2 y L3), en general se transforman en pupas o puparium en forma de barrilito, al final de la galería, quedando temporariamente adheridas, para luego caer. Los adultos que nacen de ellas, viven de 10 a 20 días. El ciclo biológico del dibujante o minador de la hoja puede ser tan corto como de 16 días a 25°C, estimándose un promedio de 21, dependiendo de la planta hospedante y la temperatura. Pueden realizar 9-10 generaciones/año.



Figura 6 – Galerías del Dibujante (cortesía Urretabizkaya, N.)

Daños: La principal causa de daño a la planta son las galerías que hacen las larvas en las hojas (Figura 6). Las larvas se alimentan minando entre las superficies superior e inferior de las hojas creando túneles sinuosos que inicialmente son pequeños y angostos, pero que

aumentan en tamaño a medida que crecen las larvas. En un principio las galerías son casi transparentes pero con el paso del tiempo van adquiriendo una tonalidad verde-amarillenta y posteriormente se necrosan. Estas minas pueden causar daño directo a las plántulas al remover clorofila y reducir la capacidad fotosintética de las plantas. El follaje atacado se presentará necrosado y habrá defoliación. Las minas y las punteaduras de oviposición-alimentación también abren entradas para organismos patógenos. En plantas con número excesivo de galerías puede hacer que las hojas se sequen, lo cual resulta en quemaduras por el sol en los frutos y reducción en el rendimiento y la calidad. En infestaciones severas, las minas en las hojas pueden causar la muerte de las plantas; como también, puede ocasionar caída de hojas cuando la densidad de la plaga es muy alta produciendo pérdidas económicas. En poblaciones elevadas, puede provocar daños en el 100 % del follaje, con lo cual ocasiona la defoliación del cultivo

Opciones de manejo

Mantener libres de malezas las camas de cultivo. Colocar trampas de plástico adhesivas amarillas o blancas. Resulta conveniente utilizar malla anti-insectos. El control químico excesivo de plagas en el invernadero, ocasionan daños más fuertes en los cultivos por mayor presencia de minadores, debido a la eliminación de sus parasitoides naturales por ejemplo la avispa *Diglyphus* sp. que ataca larvas de la mosca. Se debe sembrar varios cultivos simultáneamente en el invernadero, para diversificar los cultivos. De ser necesario aplicar el insecticida ecológico en base a *Bacillus thuringiensis*, bacteria que infecta y mata a las larvas. Es seguro para el medio ambiente, tiene efecto residual de 10 días y no es tóxico para otros organismos. La eliminación programada del follaje mediante la poda del cultivo durante su desarrollo, disminuye significativamente la infestación de las larvas de Minador de la hoja. Para ello las hojas eliminadas se colectan en bolsas de plástico y se destruyen.

6. *Polilla del tomate: Tuta absoluta (Clase Insecta-Orden Lepidóptero)*

Es una plaga específica de solanáceas, pudiendo atacar papa, pimiento, berenjena resultando su acción devastadora en su cultivo preferido, el tomate. Los adultos son mariposas pequeñas, alcanzan a medir 7 a 10 mm de longitud, de coloración castaño grisáceo, no ocasionan ningún tipo de daño. Son atraídos por la luz ya que son de hábitos crepusculares a nocturnos por lo que se refugian en el envés de las hojas más bajas del cultivo durante el día. Las hembras colocan más de 240 huevos, ovoides, de 0,3 mm, al principio de color blanquecino y hacia el final amarillo, los disponen aisladamente en hojas nuevas, tanto en el haz como en el envés; también en brotes, pedúnculos, pecíolos y en frutos verdes. En aproximadamente 7-10 días nacen las larvas, de color verdoso amarillento y cabeza oscura, en su máximo desarrollo alcanzan a medir 10 mm de longitud; presentan 3 pares de patas torácicas anteriores y 5 pares de patas abdominales

posteriores. Desde que emergen se alimentan y comienzan a cavar galerías en diferentes órganos de la planta. Las larvas en sus estadios iniciales suelen salir de la galería y así quedan expuestas a medidas de control. El período larval lo cumplen en aproximadamente 15 a 23 días. Hacia el final de esta etapa, las larvas tejen un capullo de seda blanquecino dentro del cual se transformarán en pupa, al principio color verde oscureciéndose al castaño a medida que avanza el desarrollo. Dicho estado dura 6-8 días, luego de ese lapso nacerán las nuevas polillas adultas que tienen una longevidad de hasta 30 días. El ciclo se cumple entre 28 a 59 días.

Daños: Las larvas se alimentan de la parte interna entre ambas caras de la hojas (mesófilo) dejando galerías o zonas transparentes de aspecto “lacunar” características. Otros daños directos son el minado interno de brotes, que los seca y en flores y frutos provocará su caída. Las larvas penetran los frutos del tomate, ingresando mediante perforaciones que se continúan con galerías internas. Los frutos son atacados desde su formación, pudiendo dar lugar a que se pudran posteriormente por la acción de patógenos secundarios en las galerías. Los daños indirectos consisten en el envejecimiento prematuro de las hojas; pérdida de la calidad comercial y la producción de heridas donde pueden penetran patógenos, enfermando a la planta.

Opciones de manejo

Eliminar las partes de las plantas dañadas por la polilla, como pueden ser hojas y frutos afectados; restos de cultivo después de la cosecha. Se recomienda desde el inicio del cultivo utilizar Trampas cromática de agua que se les pueden agregar aceite y realizar el seguimiento semanal de la captura de adultos. Preservar la presencia de enemigos naturales, como la pequeña chinche nabis que depreda huevos y larvas; la avispa *Trichogramma* que parasita huevos y *Bracon* que parasita larvas. De ser necesario aplicar el insecticida ecológico en base a *Bacillus thuringiensis*, que infecta y mata larvas.

Otras plagas

-Babosas (Moluscos-Gastrópodos)

Presentan el cuerpo alargado, blando, de color castaño, gris a negro con un pie musculoso que les permite deslizarse, dejando a su paso un sendero de "baba". Las más conocidas son: la "babosa gris grande" de 3,5 cm (*Deroceras reticulatum*), la "babosa gris chica" cuerpo menor a 2 cm (*Deroceras laeve*) y "babosa negra" 6-9 cm (*Milax gagates*). La cabeza lleva cuatro tentáculos retractiles y la boca posee pequeños dientes y una lengua dentada o rádula. Se alimentan raspando los tejidos con su rádula por lo que causan daños

severos al follaje hasta llegar a la defoliación. Son de hábitos nocturnos, y de día se esconden en lugares oscuros y húmedos. La colocación de trampas en esos lugares en que se ocultan brinda buenos resultados; se utiliza la cerveza como cebo siendo un atrayente efectivo.

-Cochinillas algodonosas (Clase Insecta- Orden Hemípteros-Flia. Pseudococcidos)

Son insectos pequeños, alcanzan a medir hasta 4 mm de longitud. Poseen el cuerpo ovalado, blando de coloración que varía desde el amarillento, rojizo a grisáceo, cubiertas completamente por secreciones cerosas blancas de tipo pulverulento o algodonoso que le proporciona protección, con textura semejante al algodón; dentro de esas secreciones las adultas colocan sus masas de huevos poniendo en el saco de 300 a 500 huevos. Las colonias generalmente son muy numerosas, se alimentan clavando el aparato bucal picador succionador en hojas, tallos y frutos de los cuales extraen savia, por lo que segregan abundante melado sobre el cual desarrolla fumagina. Las cochinillas jóvenes, son muy móviles y se dispersan para encontrar un lugar adecuado de alimentación. Las cochinillas algodonosas afectan plantas de interior, de jardín, de invernadero y árboles frutales principalmente. Se detectarán ya sea por su presencia; por las hojas amarillentas y defoliación; por brotes y pequeños frutos cubiertos de cerosidad blanca con caída prematura de órganos florales; como por el melado y la fumagina. Los géneros *Planococcus* y *Pseudococcus* sp. pueden atacar cultivos de pepino, melón, berenjena, tomate y también en pimiento. Ante la presencia de focos abundantes en el cultivo, intervenir sobre ellos con insecticidas recomendados.

-Nematodos de la agalla (Phylum Nemata)

Son pequeños gusanos cilíndricos, blanquecinos, microscópicos, de 0,2 mm de longitud. Los más frecuentes corresponden al género *Meloidogyne* sp. que viven en el interior de las raíces, induciendo la formación de tejido tumoral característico en forma de “papitas” o agallas; observándose un retraso del crecimiento en las plantas atacadas, aunque no son significativos en hidroponía.

-Moscas Sciáridas (Clase Insecta- Orden Dípteros)

Se las conoce también como moscas negras o moscas del sustrato. Son pequeñas moscas de cuerpo oscuro, que alcanzan a medir 2 a 4 mm. El ambiente óptimo es la humedad, comúnmente se observan a simple vista, con vuelo lento andando sobre el sustrato húmedo y también pueden localizarse en cultivos hidropónicos. Las hembras llegan a poner 200 huevos, con un tiempo de embrionado de 2 a 3 días. Las larvas

alcanzan a medir 5 mm de longitud, presentan color blanco translúcido y cabeza color negro, transcurriendo en este estado durante 2 o 3 semanas. Los daños en el cultivo lo realizan solo larva, ya que no solo se alimentan de materia orgánica muerta (algas, hongos), sino que también lo hacen de los pelos radiculares o los tallos, llegando a perforarlos. Además de destruir completamente las raíces, limitan el acceso a los nutrientes para la planta y facilitan el ingreso de hongos patógenos. Un mínimo ataque provocará la disminución del crecimiento y un ataque fuerte podrá conducir a muerte de la planta. Para disminuir la población de adultos colocar trampas adhesivas amarillas para su captura. De ser necesario utilizar insecticidas recomendados.

-Orugas (Lepidoptera- Noctuidos)

Las larvas alcanzan más de 50 mm de longitud, presentan el cuerpo color castaño claro y oscuro con bandas y líneas, se destacan 3 pares de patas anteriores y 5 pares de patas falsas, abdominales, cortas en la región ventral. O también intensamente verdes con 3 pares de patas anteriores y solo 3 pares de patas posteriores (Figura 7). Las orugas causan daños en casi todo tipo de plantas, atacando hojas, frutos, flores y cogollos. Son altamente polífagas y actúan por la noche. Las mariposas son atraídas por la luz, depositarán sus huevos sobre el follaje o brotes y de ellos nacerán pequeñas larvas que van a crecer por el gran consumo de tejido vegetal, siendo el único estado perjudicial. Las larvas de mariposas pueden ser controladas con aplicaciones de *Bacillus thuringiensis*.



Figura 7 – Galerías del Dibujante (cortesía Urretabizkaya, N.)

Preparación de Plaguicidas Caseros

PLANTAS	PREPARACIÓN	PLAGAS
Neem Azadirachta sp.	Moler 50 g de semilla, envolver en un paño y poner en 1 litro de agua por 24 horas, filtrar y aplicar en horas de la tarde-noche.	Gusanos. Insectos: masticadores y succionadores.
Paraíso Melia sp.	Machacar 500 g de hojas frescas, remojar por 24 horas en 10 litros de agua. El líquido filtrado aplicar en las plantas. frutos de "paraíso" machacados y macerados en agua durante un par de semanas dan un producto fermentado que regado sobre suelo y plantas resulta ser un buen repelente de hormigas.	Gusanos. Insectos: masticadores y succionadores.
Tabaco (*) Nicotiana sp.	Durante 20 minutos cocinar 400 g de tabaco, en 4 litros de agua, para preparar 60 litros de insecticida Otra opción: 250 g de hojas de tabaco, 30 g de jabón y 4 litros de agua, hervir 1/2 hora. Diluir 1:4 (caldo: agua). Solución de tabaco: macerar 60 g de tabaco en 1 litro de agua, agregándole 10 g de jabón blanco. Se pulveriza, diluyendo en 4 litros de agua. (*) No pulverizar sobre ají, tomate ni berenjena.	Árañuela, mosca blanca, trips. Adultos y larvas de mariposas/cascarudos. (*) Esperar de 3 á 4 días después de las pulverizaciones para cosechar.
Ortiga Urtica sp.	Macerar 1.5 kilos de hojas y tallos en 20 litros de agua durante 5 á 7 días. Purín de ortiga: (El purín es la fermentación al sol de un vegetal en agua). Macerar en recipiente no metálico 100 g de ortigas en 10 litros de agua durante 2 días. Se pulveriza.	Arañuelas, Pulgones
Cebolla Allium sp.	Cocinar 60 g de cáscara de cebollas en 4 litros de agua, durante 20 minutos dejar enfriar y aplicar Purín de cebollas: macerar en un recipiente con agua algunos bulbos de cebolla durante 2 ó 3 semanas. El purín se aplica sobre las plantas.	Pulgones
Ají picante Capsicum sp.	Machacar 20 g de ají y diluirlos en 4 litros de agua, aplicar. Triturar 100 g de frutos en un mortero, agregar 1 litro de agua, filtrar con un lienzo. Diluir una parte del concentrado en 5 partes de agua jabonosa. En concentraciones altas puede causar quemaduras en las hojas.	Pulgones, gorgojos, hormigas

Infusiones de hojas de Ruda, Salvia, Lavanda		200-300 g por litro de agua, pulverizada sobre plantas, repele eficientemente pulgones e insectos succionadores.
PARA LAS INFUSIONES SE RECOMIENDA AGREGARLE ALGUNAS RALLADURAS DE JABÓN BLANCO, LO CUAL FAVORECERÁ LA ADHESIVIDAD DEL PRODUCTO A LAS PLANTAS.		
Ajo Allium sativum	Cocinar 10 dientes de ajo en 4 litros de agua durante 20 minutos, enfriar y aplicar.	Arañuelas, pulgones, moscas blancas
Cebolla + ajo Allium sp.	Moler o licuar una cebolla grande, 4 dientes de ajo en 2 litros de agua y una taza de vinagre, filtrar y aplicar.	Mosca blanca, trips.
Eucalipto Eucalyptus sp.	Recolectar una buena cantidad de hojas y secarlas al sol, luego se muelen hasta hacerlas polvo.	Minadores
Alcohol de ajo	4 - 5 dientes de ajo picados, alcohol fino de 500 cc y 500 cc de agua, licuarlos 3 minutos, colar, envasar en frasco con tapa y guardar en heladera. Aplicar puro pulverizando	Arañuela, polillas, gorgojos, mosca blanca y pulgones

Otros repelentes naturales: Poleo, laurel, menta, romero, orégano, crisantemo, etc.

Caldo Bordelés: (fungicida con acción acaricida) 100 g. de cal, 10 gr. de sulfato de cobre, 10 l de agua. Utilizar inmediatamente después de preparado.

Sulfato de Cobre, azufre para mojar o para espolvoreo (arañuelas).

RECOMENDACIÓN

Revisión diaria de la huerta (5' por la mañana y 5' por la tarde)

VENTAJAS

Control más eficiente, limpio y económico de los cultivos hidropónicos familiares.

Bibliografía

Alarcón Roldán, R.; A. Bravo Rodríguez; M.A. Carranza García; J.M. Durán Álvaro; E.M. Garrido Villamar; P.J. González Provost; M. Martínez Santos y R. Nieto Galera. (2011). "La polilla del tomate: *Tuta absoluta*". 7 pp. *Hoja divulgadora de horticultura ecológica*. [en línea]. Consultado el 10 de noviembre de 2014 en

- http://www.juntadeandalucia.es/.../Hoja_Divulgadora_Horticultura_Ecoloxgica_TUTA_ABSOLUTA.pdf
- Barros, P. (1999 marzo). "La hidroponía? Pero si es muy fácil". [en línea]. Consultado el 21 de octubre de 2014 en <http://www.biblioteca.org.ar/libros/3040.pdf>
- Canedo, V.; A. Alfaro y J. Kroschel. (2011). Manejo Integrado de las Plagas de insectos en Hortalizas: Principios y Referencias Técnicas para la Sierra Central de Perú. Centro Internacional de la papa (CIP). Lima, Perú. 48 pp. ". [en línea]. Consultado el 26 de octubre de 2014 en <http://www.cipotato.org/wp-content/uploads/2014/08/005739.pdf>
- Carrera Santibáñez, F. (2013 noviembre). "Invernaderos: manejo integrado de plagas y enfermedades en cultivos hidropónicos en invernaderos". 12 pp. [en línea]. Consultado el 12 de noviembre de 2014 en <http://www.agrointernet.com.mx/index.php?...invernaderos-manejo-integrado->
- Davies, O. (1997). *Introducción a la Entomología*. Ed. Mundi Prensa. 449 pp.
- FAO. (2002 mayo). "Manual práctico. MIP y enfermedades en cultivos hidropónicos en invernadero". 36 pp. [en línea]. Consultado el 14 de agosto de 2014 en <http://www.fao.org/alc/file/media/pubs/2002/mip.pdf>
- FAO. (2010 noviembre). "Biopreparados para el manejo sostenible de plagas y enfermedades en la agricultura urbana y periurbana". 96 pp. [en línea]. Consultado el 10 de octubre de 2014 en http://www.minagri.gob.ar/site/desarrollo_rural/forobioinsumos/publicaciones/manual_biopreparados_fao_2010.pdf
- Fortín, A. M. (2012 marzo). "Identificación de insectos plagas en cultivos hortícolas orgánicos. Alternativas para su control". Informe técnico. Serie Extensión Rural INTA-EEA El Colorado-Formosa. 19 pp. [en línea]. Consultado el 18 de junio de 2014 en <http://inta.gob.ar/.../identificacion-de-insectos-plagas.../Identificación%20de%20...>
- Gonzalez, R.H. (1989). *Insectos y ácaros de importancia agrícola y cuarentenaria en Chile*. Santiago, Chile, Edit. Ograma. 310 p. [en línea]. Consultado el 26 de junio de 2014 en http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_agronomicas/gonzalezr03/
- Guzmán Díaz, G. A. (2004 mayo). "Hidroponía en casa: una actividad familiar". San José, C. R. MAG. 25 pp. [en línea]. Consultado el 20 de septiembre de 2014 en http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/Hidroponia.pdf
- Metcalf, C. y W. Flint. (1965). *Insectos destructivos e insectos útiles*. Ed. Continental, 1º edición. 1110 pp.
- Mitidieri, M. y L. Polack. (2012 mayo). "Guía de monitoreo y reconocimiento de plagas, enfermedades y enemigos naturales de tomate y pimiento". Boletín de Divulgación Técnica, EEA San Pedro, nº 22. [en línea]. Consultado el 2 de diciembre de 2014 en http://inta.gob.ar/documentos/guia-de-monitoreo-de-plagas-y-enfermedades-de-tomate-y-pimiento/at_multi_download/file/INTASP_Guia%20de%20monitoreo_2012BDT22.pdf
- Riquelme, A. H. (2011 noviembre). "Control ecológico de plagas de la huerta".

http://inta.gob.ar/documentos/control-ecologico-de-plagas-de-la-huerta/at_multi_download/file/Control%20ecologico%20de%20plagas%20de%20la%20huerta%20-%20Riquelme.pdf

Urretabizkaya, N.; A. Vasicek y E. Saini. (2010). Insectos perjudiciales de importancia agropecuaria. I. Lepidópteros. Ediciones INTA. ISBN. 978-987-1623-56-3. 72 pp.

CAPÍTULO 8

Enfermedades en cultivos hidropónicos

Lía Ronco y Marcela Ruscitti

Introducción

Las enfermedades de las plantas son una de las principales limitantes de la producción agrícola, llegando a producir serias pérdidas en las cosechas. Cereales, oleaginosas, ornamentales, forestales, frutales y hortalizas están expuestos a agentes bióticos y abióticos que inciden negativamente en sus rendimientos. Las hortalizas, en particular, no solo se cultivan de forma convencional (campo e invernadero) sino en la modalidad sin suelo o hidroponía. Se considera que en la misma son menos frecuentes los problemas sanitarios, sobre todo los causados por patógenos de suelo. Sin embargo, el uso de sustratos o agua de riego contaminados, puede tener graves consecuencias.

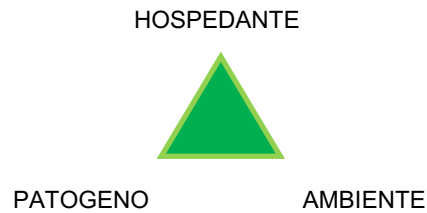
¿Qué es enfermedad?

Se define enfermedad como un desorden fisiológico que se traduce en una anormalidad constitucional y de duración más o menos prolongada o permanente como para perjudicar la calidad y el valor económico. De esta definición se desprenden dos elementos, la alteración de funciones fisiológicas (imperceptibles a nuestra vista) tales como: división celular, absorción de agua y minerales y su transporte, fotosíntesis, reproducción, almacenamiento de reservas y los cambios de la estructura de los órganos que se visualizan a través de los síntomas: hiperplasias e hipoplasias; destrucción de raíces, obstrucción de vasos; manchas, tizones, clorosis; muerte de flores; afección de frutos, tubérculos, granos.

¿Cuáles son los factores que intervienen para que haya enfermedad?

Para que se produzca una enfermedad deben estar en equilibrio 3 factores:

hospedante – patógeno – ambiente.

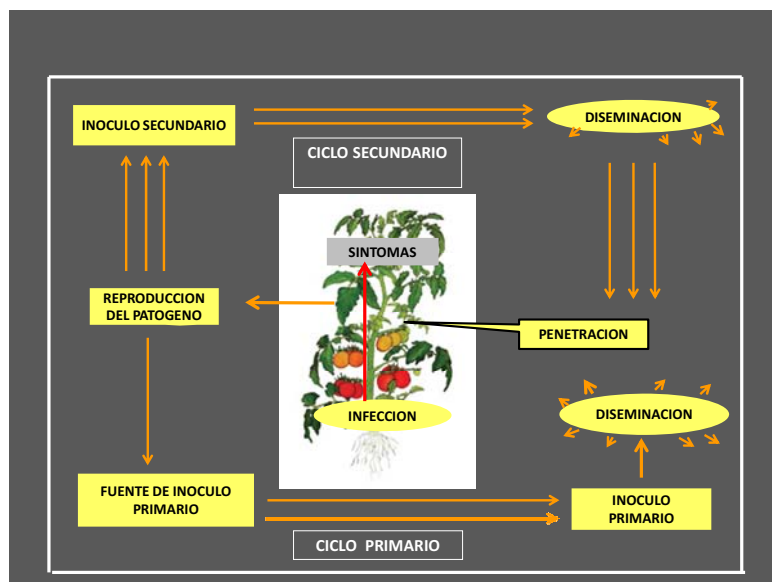


Es decir que para la ocurrencia de una enfermedad deben existir:

- ✓ Un hospedante susceptible en estado vulnerable o receptivo.
- ✓ Un agente causante capaz de iniciar una infección.
- ✓ Un ambiente favorable para la infección y el establecimiento del patógeno en el hospedante.

¿Cuál es el ciclo de una enfermedad?

En la interacción planta–patógeno ocurre lo que se denomina ciclo de la enfermedad y que se esquematiza como podemos ver a continuación:



En el ciclo se puede observar lo que se denomina fuente de inóculo primario que pueden ser suelo, aire, rastrojo, semillas, plantines, tubérculos, bulbos. En ellos se encuentra el inóculo primario(célula bacteriana, partícula viral, micelio activo, micelio latente, esclerocios, esporas sexuales y asexuales)que si se presentan las condiciones

ambientales favorables para el desarrollo de la enfermedad, será diseminado por el aire, agua, vectores, semillas y plantines enfermos entrando en contacto con el hospedante susceptible donde ocurrirá el proceso de patogénesis:

El patógeno **PENETRA** en la planta, interactúa con las células del huésped **INFECTA** a la planta (se establece), se multiplica o crece dentro del tejido vegetal, lo **COLONIZA**, la interacción patógeno-huésped hace que ésta se modifique aparecen los **SINTOMAS**, el patógeno se reproduce y se exterioriza (hongos y bacterias) para poder llegar a nuevas plantas aparece el **SIGNO** y se producirá el ciclo primario.

Si las condiciones ambientales siguen siendo favorables, tendrá lugar el ciclo secundario que es la infección en el resto del cultivo.

¿Cómo reconocemos una enfermedad?

Las enfermedades se reconocen a través de los síntomas y signos.

1. **Síntoma:** es la reacción de la planta frente a la presencia de un agente externo.
2. **Signo:** es la visualización del agente patógeno (solo bacterias y hongos).

En relación a los síntomas, los mecanismos de patogénesis son:

- ✓ Producción y liberación de enzimas que degradan la pared celular.
- ✓ Producción y liberación de toxinas que interfieren con el metabolismo o afectan la estructura del protoplasma.
- ✓ Producción y liberación de compuestos hormonales que interfieren con el control normal de crecimiento y desarrollo.
- ✓ Interferencia con el movimiento normal del agua, nutrientes y metabolitos: polisacáridos.

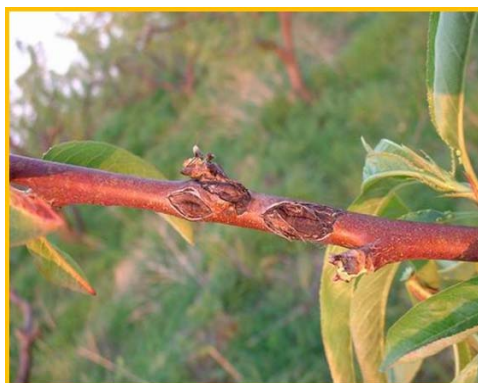
Síntomas

1. Necróticos
2. Hiperplásicos
3. Hipoplásicos
4. Metaplásicos
5. Otros síntomas

1. **Necróticos:** se caracterizan por la necrosis de tejidos por acción de enzimas o de toxinas. Se clasifican en:

- 1.1. **Manchas:** lesiones en hojas, tallos y frutos, de tamaños y colores variados. Fig. 1, 2, 3, 4

Ejemplo: Viruela de tomate (*Septoria lycopersici*).



- 1.2. Marchitamientos: muerte de la planta por problemas de interferencias en el movimiento normal de agua y nutrientes. Estos síntomas suelen ser causados por las enfermedades provocadas por patógenos del suelo que atacan al cuello y las raíces. Fig. 5



La muerte de la planta puede sobrevenir por diferentes razones:

- 1- Destrucción del sistema radicular, que impide la absorción de agua.
- 2- Oclusión de los vasos leñosos por el parásito. Es una acción mecánica de taponamiento que impide el ascenso del agua.
- 3-Toxicogénica: la producción de toxinas por el patógeno aumenta la permeabilidad de la membrana citoplasmática de las células del mesófilo produciéndose como consecuencia un desbalance hídrico.
- 4- Embolias: consiste en formación de burbujas de aire en los vasos del xilema lo que provoca la ruptura de las columnas de agua.

Ejemplo: Marchitamiento del tomate *Ralstoniasolanacearum*)

- 1.3.** Cancros: lesiones crónicas que se producen sobre tejidos lignificados o algo succulentos, de lento progreso, con tendencia a extenderse por ser heridas que no logran cicatrizar. Fig. 6



Ejemplo: Cancrosis de los citrus (*Xanthomonas axonopodis* pv. *citri*)

- 1.4.** Autotomias: se presenta ante la presencia de enfermedades que provocan manchas, como un desprendimiento de tejido en hojas afectadas que se visualizan como perforadas.

Ejemplo: Viruela de la acelga y de la remolacha (*Cercospora beticola*).

- 1.5.** Podredumbres: es una desorganización de los tejidos y posterior muerte de las células por despolimerización de los componentes de la laminilla media y paredes

celulares. Según la naturaleza del órgano afectado pueden ser: secas o húmedas.

Fig. 7

Ejemplo: Podredumbre blanda de las hortalizas (*Pectobacterium caratovorum* subsp. *caratovorum* (= *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*)).

- 1.6. Antracnosis: lesiones hundidas que se presentan en hojas, pecíolos, tallos y frutos. Fig. 7, 9

Ejemplo: Antracnosis de la frutilla *Colletotrichum fragariae*

- 1.7. Tizones: muerte rápida y generalizada de hojas, flores y tallos.

Ejemplo: Tizón tardío de la papa y del tomate (*Phytophthora infestans*)

2. Hiperplásicos: se produce un aumento de tamaño del órgano afectado (agallas o tumores y enaciones), por aumento del tamaño de las células o excesiva división celular por desbalance hormonal. Fig. 10

Ejemplo: Agalla de la corona (*Agrobacterium tumefaciens*)

3. Hipoplásmicos: se presentan como una disminución de un órgano (atrofia), del tamaño de la planta (enanismo), del contenido de clorofila (clorosis) por desbalance hormonal. Fig. 11, 12

Ejemplo: Virus del mosaico del tomate (ToMV)

4. Metaplásmicos: cambio de color de los órganos afectados por variación del pH de los jugos celulares.

Ejemplo: Viruela de la acelga y de la remolacha (*Cercospora beticola*)

5. Otros síntomas:

- a. Proliferaciones: Formación de yemas en un órgano donde normalmente no se producen.

- ✓ Proliferación de ramas en un nudo (escoba de brujas).
- ✓ Proliferación de flores femeninas.
- ✓ Proliferación de raíces adventicias.

Ejemplo: Necrosis de la médula del tomate (*Pseudomonas corrugata*)

- b. Epinastia: curvamiento en hojas o ramas hacia abajo debido al crecimiento diferencial en las caras de las hojas.

Ejemplo: Peste negra del tomate (TSWV)

- c. Hiponastia: curvamiento de las hojas o ramas hacia arriba debido al mayor crecimiento diferencial de la parte inferior respecto de la superior.

Ejemplo: Curly Top de la remolacha (Virus del Encrespamiento Apical de la Remolacha)

- d. Fasciaciones: Transformación de un tallo u otro órgano en aplanado, de sección elíptica en vez de circular

Ejemplo: Stolbur del tomate (Fitoplasma)

- e. Ahilamiento: Alargamiento anormal de entrenudos acompañado de clorosis. se produce en cualquier vegetal por insuficiencia de luz.

SIGNOS: como se aclaró precedentemente, solo los hongos y las bacterias producen signo.

Hongos

1. Eflorescencias de diversos colores Fig. 13
2. Puntuaciones negras Fig. 14
3. Pústulas (diversos colores) Fig. 15
4. Masas carbonosas

Bacterias

1. Zoogleaseas

¿Cómo nos afectan?

- ✓ Directamente, afectando la producción
- ✓ Indirectamente, disminuyendo los rendimientos
- ✓ Contaminando con toxinas
- ✓ Aumento de costos por aplicar medidas de control
- ✓ Residuos de plaguicidas sobre los productos cosechados

¿Quiénes causan enfermedades?

Agentes bióticos (enfermedades parasitarias)

Hongos y organismos afines

bacterias

virus

Fitoplasmas

Viroides

fanerógamas parásitas

Agentes abióticos (enfermedades no parasitarias o fisiopatías)

Ambiente Fig. 17

Deficiencias nutricionales Fig. 18

Contaminación ambiental

¿Cómo manejar enfermedades? ¿manejo o control?

A fin de evitar el efecto negativo de las enfermedades de las plantas, se hace necesario aplicar medidas frente a las mismas. Hasta hace poco tiempo se hablaba de **control** y en la actualidad de **manejo**.

Control: involucra la aplicación de medidas tendientes a erradicar al organismo causal de una enfermedad.

Manejo: implica un proceso continuo de eventos consistentes en la selección y uso de técnicas orientadas a reducir las enfermedades a un nivel tolerable.

Manejo integrado de enfermedades (mie)

Combinación de técnicas orientadas a reducir las enfermedades a un nivel tolerable

Manejo cultural

- ✓ Erradicación de hospederos
- ✓ Rotación de cultivos
- ✓ Sanitation
- ✓ Mejoramiento de condiciones de crecimiento
 - Fertilización adecuada
 - Densidad adecuada
 - Control de malezas
- ✓ Creación de condiciones desfavorables para el patógeno
 - Ventilación
 - Control de humedad
 - Control de temperatura

Control genético

Control biológico

Control físico

- Tratamiento con calor
- Radiación
- Solarización

Control químico

¿Cuáles son las principales enfermedades en Lechuga, pimiento y tomate?

Lechuga

Micosis

Mildiu: *bremia lactucae*

Podredumbre blanca: *sclerotinia minor*, *sclerotinia sclerotiorum*

Moho gris: *botrytis cinerea*

Bacteriosis

Podredumbre blanda: *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (= *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*)

Virosis

Big Vein

Fisiopatías

Tipburn: Deficiencia de calcio

PIMIENTO

Micosis

Mildiu: *Phytophthora capsici*

Oídio: *Leveillulataurica* (= *L. Sicula*)

Marchitamiento: *Sclerotium rolfsii*

Podredumbre blanca: *Sclerotinia sclerotiorum*

Virosis

Peste negra –Tospovirus (Trips, persistente)

Mosaico del Tomate – tomv (Mecánica)

Virus y de la Papa – PVY (Afidos, no persistente)

Mosaico del Pepino – CMV (Afidos, no persistente)

Geminivirus (Mosca blanca, persistente)

Fisiopatías

Blossom-endrot (BER) o podredumbre apical: deficiencia de calcio

Asoleado de frutos

Tomate

Micosis

Tizón temprano: *Alternaria solani*

Moho de las hojas: *Cladosporium fulvum* (= *Passalora fulva*)

Oídio: *Oidium neolycopersici*

Moho gris: *Botrytis cinerea*

Mancha gris de la hoja: *Stemphylium* spp.

Podredumbre de la corona y el pie: *Fusarium oxysporum* f.sp. *radici-lycopersici*

Podredumbre blanca: *Sclerotinia sclerotiorum*

Marchitamiento: *Sclerotium rolfsii*

Bacteriosis

Mancha bacteriana: *Xanthomonas campestris*pv. *vesicatoria*

Peca bacteriana: *Pseudomonas syringae*pv. *tomato*

Cancro bacteriano: *Clavibacter michiganense* subsp. *michiganense*

Marchitamiento bacteriano: *Ralstonia solanacearum*

Necrosis de la médula: *Pseudomonas corrugata*

Podredumbre del tallo y de frutos: *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (*Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*)

Virosis

Mosaico del tomate – ToMV (Mecánica)

Peste negra – varios Tospovirus (Trips, persistente)

TSWV : Tomato spotted wilt virus

TCSV : Tomato chlorotic spot virus

GRSV :Groundnut ring spot virus

Virus Y de la Papa – PVY (Afidos, no persistente)

Mosaico del pepino – CMV (Afidos, no persistente)

Geminivirus (Mosca blanca, persistente)

Fisiopatías

Blossom-endrot (BER) o podredumbre apical: deficiencia de Calcio

Asoleado de frutos

Deficiencia de Magnesio

Catface

Bibliografía

Agrios, G.N. (2005). Plant Pathology.Academic Press.920 pp. (Fifth Edition).ISBN 0-12-044564.

American Phytopathological Society. Compendium of Pepper Diseases. APS Press. 63 pp.

Blancard, D. (1992). Enfermedades del Tomate. Mundi-Prensa. 212 pp.

FernandezValiela, M.V. (1978). Introducción a la Fitopatología. Vol. I,II,III,IV, Colección Científica INTA.

LLácer, G. López, M.M., Trapero, A., Bello, A. (2000) Patología Vegetal. Phytoma, 695 pp. ISBN 84-921910-0-7.

Ronco, L. (2006). Enfermedades de cultivos hortícolas en invernadero. Red de Alerta de plagas y enfermedades CFI. Ministerio de Asuntos Agrarios.www.maa.gba.gov.ar/agricultura.../art.../enfermedades_en_cultivos.doc.

www.agro.unlp.edu.ar Aula Virtual.

http://www.agro.unlp.edu.ar/cursos/pluginfile.php/19135/mod_resource/content/1/GUIA_DE_TRABAJO_PROACTICOS_2014.pdf

Se agradece a las Ings. Agrs. Marina Sisterna y Elena DalBó y a la Dra. Marina Stocco por las fotos proporcionadas para ilustrar la publicación.

CAPÍTULO 9

Modificación artificial del ambiente: cultivos protegidos

Susana Martínez y Mariana Garbi

Los cultivos protegidos son sistemas de producción en los cuales se actúa sobre el microclima que rodea a las plantas durante parte o todo el ciclo de cultivo. Cuando la protección es temporal, aplicándose a períodos bien definidos, el sistema de protección se denomina “semiforzado”. Son ejemplos de sistemas semiforzados las protecciones que se realizan únicamente durante la etapa de almácigo, los túneles bajos de polietileno en frutilla, las barracas cubiertas que se utilizan en trasplantes tempranos de tomate a campo, o distintos sistemas que permiten adelantar la siembra directa, protegiendo al cultivo de los vientos fríos y heladas.

Los sistemas de protección permanentes, que acompañan al cultivo durante todo su ciclo se denominan “forzados”, como es el caso de los distintos tipos de invernaderos (Foto1). Un invernadero es toda construcción formada por una estructura que puede ser de materiales diversos y que soporta una cubierta de vidrio o plástico rígido o flexible. Posee suficiente solidez para soportar los embates del viento y dimensiones que permiten el desarrollo de las plantas y su manejo interior desde el inicio hasta la cosecha del cultivo.

Además de incrementos en los rendimientos y en la calidad de los productos obtenidos, esta forma de producción presenta ciertas ventajas como:

- Obtener productos en momentos del año que no son los tradicionales para un cultivo, logrando cosechas más tempranas o más tardías, y con ello mejores precios
- Producir en zonas donde el cultivo no sería posible, al permitir la regulación de las condiciones ambientales
- Lograr precocidad en la producción, dado que las mayores sumas térmicas debajo de la protección permiten reducir los ciclos de los cultivos en forma importante
- Aumentar la cantidad de cosechas por año
- Mejorar las prácticas de manejo al permitir, en cierta forma, el control sobre el riego, la fertilización, las plagas y enfermedades
- Disminuir los riesgos climáticos

También existen ciertas desventajas, como la necesidad de una mayor inversión inicial y de conocer una tecnología algo diferente a la utilizada tradicionalmente.



Foto 1: Combinación de protecciones: Invernadero, mulching y túnel

Clima del invernadero

La luz solar, además de ser imprescindible para que las plantas realicen fotosíntesis, tiene una importancia fundamental desde el punto de vista del clima del invernadero para favorecer el incremento de temperatura dentro del mismo. La radiación que llega al interior de la cobertura, en combinación con el material de cubierta, son los principales responsables de la producción del clima del invernadero. La energía emitida por el sol llega a la superficie de la tierra en forma de radiaciones electromagnéticas no uniformes y que pueden dividirse en:

- a) Radiación ultravioleta: que abarca una longitud de onda hasta 390 nm
- b) Radiación visibles: esenciales en el crecimiento de las plantas, pues de ellos depende la fotosíntesis (400 a 760 nm)
- c) Radiación infrarroja de longitud de onda corta: de ellos depende el calentamiento del suelo y de las plantas (760 a 2500 nm)
- d) Radiación infrarroja de longitud de onda larga: emitida por el suelo, plantas y estructuras durante la noche como consecuencia de su calentamiento durante el día (mayor a 2500 nm)

La radiación solar de onda corta que atraviesa la cobertura y llega al interior del invernadero, alcanza el suelo, las plantas y objetos que encuentre en su camino, los que como consecuencia de su calentamiento, emiten radiación de onda larga que es la responsable del

calentamiento del ambiente y que debe tratar de conservarse dentro de la cobertura. Para que esto sea posible, es fundamental que los materiales que se utilizan para cubrir los invernaderos reúnan dos características básicas:

- a) Máxima transparencia a la radiación solar de onda corta, que llega durante el día, para que la mayor cantidad posible alcance el interior del invernadero
- b) Máxima opacidad a la radiación infrarroja de onda larga emitida por el suelo, plantas y estructuras para que no se pierda hacia el exterior y se produzca la elevación de la temperatura interna.

Los materiales utilizados como cobertura, según su composición química y espesor, pueden actuar disminuyendo la radiación que llega al interior del invernadero, ya que una parte de ella pueden ser absorbida o reflejada hacia el exterior. Las superficies opacas (maderas, caños, etc.) propias de la construcción también limitan la radiación que llega al interior, estimándose una reducción del 10 % en los casos más desfavorables. Otros factores que afecta negativamente la transmisión de radiación son la deposición de partículas de polvo sobre la superficie, en combinación con las condiciones del tiempo y el envejecimiento propio de los materiales.

En un trabajo realizado en La Plata (Buenos Aires, Argentina) se comparó la cantidad de radiación fotosintéticamente activa recibida en el interior de un invernadero de tipo parabólico, según la antigüedad del polietileno. El invernadero estaba formado por 3 naves cubiertas con polietileno de 200 μm colocados en diferentes fechas: 1) agosto 2010, 2) agosto 2009, 3) agosto 2008; registrándose la radiación fotosintéticamente activa recibida en el interior y en el exterior en febrero, marzo y abril de 2012. La radiación recibida en el interior fue en todos los casos significativamente menor que en el exterior, fluctuando entre 36 % y 77 %, acentuándose la diferencia con la antigüedad del polietileno.

Modificaciones de los elementos del tiempo y el clima en invernadero

Radiación solar

La radiación solar directa, que es la que llega en forma unidireccional a la superficie terrestre, es la mayor carga energética que recibe el invernadero. La principal variable que determina la intensidad de la radiación solar que incide sobre una superficie y la capacidad de ésta para ser reflejada, transmitida o absorbida es el ángulo de incidencia.

El ángulo de incidencia es el que se forma entre el rayo solar y una línea perpendicular a la superficie de captación. Cuanto más perpendicular a la superficie (el techo) es la incidencia de los rayos solares, menor es el ángulo de incidencia y, por lo tanto, mayor el pasaje de luz.

Cuanto mayor es la inclinación de los rayos solares, mayor será la reflexión, reduciéndose la cantidad de radiación que llega al interior de la cobertura.

La fracción de radiación que efectivamente llega a los cultivos depende de una serie de factores no modificables como latitud, época del año, hora del día y topografía del sitio y de factores modificables como el tipo de invernadero, orientación, ángulo de techumbre y el material de cobertura (propiedades ópticas).

Factores no modificables:

Latitud: tiene relación directa con el ángulo de incidencia de la luz y, por lo tanto, con la cantidad de radiación que llega a atravesar la cobertura. Al alejarnos del ecuador la radiación influye en forma cada vez más oblicua, aumentando la reflexión hacia el exterior.

Época del año: durante el invierno el sol tiene menor altitud y los rayos alcanzan la superficie terrestre con mayor oblicuidad que en verano.

Factores modificables

Orientación: se refiere a la posición del eje principal o más largo del invernadero, y debe elegirse priorizando la máxima captación de energía solar en el periodo invernal ya que la mayoría de la producción desestacionalizada se lleva a cabo durante otoño – invierno – primavera. En este caso la orientación este - oeste y las líneas de cultivo en dirección norte – sur, hacen que la entrada de radiación sea mayor y, además, se evita el sombreado de las líneas de cultivo. La ventaja de la orientación este-oeste se relativiza respecto a la norte-sur a medida que se acerca el verano. Lo enunciado anteriormente es válido cuando se construye un invernadero aislado. Cuando se considera un conjunto de ellos (varias naves adosadas) la orientación aconsejable es norte - sur ya que de la otra forma puede ser importante la proyección de la sombra de cada una de las naves sobre la siguiente.

Ángulo de techumbre: ángulo formado entre el techo de la cobertura y la pared lateral. Está relacionado con la forma del techo e influye decididamente en la captación de luz y en la homogeneidad de la distribución interna. Cuanto menor es este valor, más se favorece la reflexión de la radiación hacia el exterior. Las estructuras de techo curvo son las que permiten lograr mayor transmitancia, seguidas por las estructuras tipo capilla y capilla modificada. En general, la pendiente promedio óptima varía entre 25° y 30°. En cuanto a la homogeneidad, el de mejor comportamiento es el tipo curvo.

Tipo de invernadero: se relaciona con la forma del techo. Aquellos de techumbre curva o parabólica son más eficientes en la captación de la radiación porque los rayos inciden en forma más perpendicular sobre ellos (Foto 2).

Separación entre naves: está en relación con la altura de la estructura y con la altura del sol. Debe cuidarse que una estructura se encuentre a distancia suficiente para no proyectar su sombra sobre la siguiente.



Foto2: Invernadero parabólico metálico de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

Temperatura del aire

El principal aporte de energía por parte de un invernadero proviene de la radiación solar que se transforma en energía térmica. El calor se transfiere de diversas maneras en la cobertura y estas formas de transferencias son las responsables de las variaciones de temperatura debajo de la cobertura. Es importante conocer estas formas de transferencia para actuar eficientemente sobre las pérdidas de energía que se produzcan y así tener cierto control de la temperatura interior. El balance térmico es el resultado de las ganancias y pérdidas de energía calórica, que se propaga por radiación, convección y conducción.

Intercambios por radiación: ocurren a través de la superficie de los materiales, sin pasaje de materia. Proviene del suelo, la atmósfera, la vegetación y son emitidos hacia el ambiente por la estructura y la cubierta. El balance depende del material de cobertura y de las condiciones del ambiente exterior.

Intercambios por convección: implica la propagación del calor mediante el movimiento de sustancias calientes. Estos intercambios se producen con el ambiente exterior, con el ambiente interior, con el suelo o través de paredes no estancas.

Intercambios por conducción: la propagación del calor se produce a través de sólidos, sin que se produzca transporte de materia. Ocurre en el suelo interior, a través de la pared del invernadero.

Renovaciones o fugas: principal pérdida de calor en los invernaderos, consecuencia de la falta de estanqueidad de los mismos, producidas por plásticos rotos, mal colocados o aberturas con mal cierre.

El aire dentro de un invernadero cerrado, no calefaccionado es siempre más caliente durante el día y generalmente durante la noche, que el aire externo. La diferencia de temperatura depende principalmente de la radiación y volumen del invernadero. Las estructuras con pequeños volúmenes de aire sufren variaciones más pronunciadas en la temperatura entre el día y la noche. Dentro de un invernadero, la temperatura aumenta con la altura.

Las características constructivas de las coberturas, además de las condiciones meteorológicas imperantes son fundamentales al momento de considerar la utilización de invernaderos para crear condiciones ambientales más propicias para el desarrollo de los cultivos. En las estructuras más comúnmente utilizadas en zonas de La Plata, una de las áreas con mayor superficie cubierta de de la Argentina, en un análisis realizado durante 6 campañas de cultivo, comparando las temperaturas registradas en el exterior y en el interior de distintos tipos de invernaderos, se observó que todas las estructuras produjeron aumentos significativos de la temperatura máxima del aire. Los registros arrojaron temperaturas que superaron los 40 °C, niveles térmicos que se alejan de los óptimos requeridos por los cultivos más comunes en la zona, observándose en todas las estructuras incrementos de 3 a 14 °C respecto a la temperatura registrada en el exterior. El menor salto térmico (diferencia entre la temperatura interior y exterior) se observó en las estructuras tipo capilla con abertura cenital, lo que pudo deberse al efecto combinado de las ventanas laterales y cenitales, con las que se logra una máxima renovación del aire. En los invernaderos sin calefaccionar no se observa un efecto marcado sobre las temperaturas mínimas, con valores que pueden superar en 1 a 5 °C a los registrados en el exterior. La ocurrencia de los mínimos valores de temperatura se dan durante la noche, momento en que se producen pérdidas de radiación provocadas por la emisión del suelo y las plantas a través del polietileno. Si el polietileno utilizado no retiene suficientemente la radiación infrarroja durante la noche, puede ocurrir que la temperatura interna resulte más baja que la temperatura exterior. Este fenómeno se conoce como “inversión térmica”.

La inversión térmica puede producirse cuando ocurren heladas de tipo radiativas, provocadas por la irradiación nocturna del suelo que conduce a enfriamientos sucesivos de las capas de aire cercanas al mismo. Una de las condiciones para la ocurrencia de estas heladas es que el aire se encuentre calmo. Al aire libre siempre hay más movimiento de las capas exteriores de aire que en el interior del recinto protegido, por lo que para prevenir este problema en invernaderos, en noches que hay riesgo de heladas por radiación, puede ser conveniente ventilarlos adecuadamente.

Temperatura del suelo

Debido a las transferencias de calor en un invernadero, y en particular, al hecho de que la radiación térmica directa desde el exterior es modificada por el material de cobertura, la temperatura del suelo o sustrato dentro del invernadero tiene valores mayores que en el exterior. El transporte de calor en el suelo, es similar en ambos casos. Sin embargo, para las distintas profundidades, el suelo del invernadero es significativamente más caliente que al aire libre. Las diferencias de temperatura entre 5 y 50 cm y la variación diaria en la parte superior son mayores en el exterior que en el invernadero. En zonas de clima frío o templado frío, el incremento de la temperatura a nivel radical resulta beneficioso para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Entre las prácticas culturales el uso de coberturas plásticas es una alternativa poco costosa que permiten modificar la temperatura del suelo o sustrato. Los polietilenos disponibles comercialmente presentan un rango de propiedades ópticas muy amplio que determinan grandes diferencias en la manera en que la energía calorífica se transmite en la superficie del suelo. Los materiales translúcidos transmiten hasta un 90% de la radiación recibida, aumentando el flujo de calor hacia el suelo en relación a los polietilenos opacos que absorben parte de la radiación incidente y la transmiten fundamentalmente por conducción. En ensayos realizados bajo invernadero durante el mes de octubre en La Plata (Buenos Aires, Argentina) se observó que en el suelo cubierto con polietileno naranja (Foto 3) las temperaturas máximas, mínimas y medias registradas a 5 cm de profundidad eran significativamente mayores que las se alcanzaban con polietileno negro o en suelo desnudo, con diferencias promedio de 3 °C; mientras que el polietileno negro elevó la temperatura mínima respecto al suelo desnudo. En un ensayo similar realizado durante el periodo invernal, se observaron modificaciones solo sobre la temperatura máxima, con ventajas a favor del polietileno verde. En general, el suelo cubierto con polietileno negro presenta valores de temperatura similares al suelo desnudo, ya que actúa absorbiendo gran parte de la radiación solar incidente y transmitiendo una baja proporción por conducción en profundidad, con un menor calentamiento de los primeros centímetros del suelo, estando su efecto muy asociado a la época de año. Los polietilenos verde y naranja presentaron un patrón de comportamiento similar a los polietilenos coloridos translúcidos, que actúan como transparentes respecto a la elevación de la temperatura.

Las películas plásticas colocadas sobre el suelo, además de modificar la temperatura, actúan incrementando el albedo, es decir, la relación porcentual entre la radiación que incide sobre la superficie y la reflejada por esta, lo que se traduce en un aumento de las temperatura del aire a nivel del canopeo. En ensayos realizados durante el mes de agosto en La Plata, en invernaderos con cultivos de pimiento y tomate, se observó que la cobertura del suelo con láminas plásticas plateadas produjo aumentos significativos de la temperatura diurna, mientras que las láminas negras favorecieron el incremento de las nocturnas.

Los polietilenos transparentes son utilizados como una alternativa de control no químico para la desinfección del suelo, a través del tratamiento de solarización, que consiste en cubrir el terreno, después de regado, con una lámina plástica de polietileno de un espesor comprendido entre 0,025 y 0,10 mm, por un periodo variable, según los niveles de radiación solar existentes. Con este método se consigue reducir las pérdidas de calor latente de evaporación, por radiación infrarroja del suelo y se aumenta la eficiencia en la transmisión de calor. Es un método barato y eficaz siempre que se cuente con, por lo menos 30 días de elevada radiación solar. Puede conseguirse un salto térmico medio respecto a la temperatura ambiental de unos 10 °C. Numerosos hongos del suelo pueden ser controlados con esta técnica. Entre los nemátodos puede controlar especies como *Ditylenchus dipsaci* y *Meloidogyne* sp. También posee acción bactericida cercana al 90% pero se ha observado el retorno a valores normales luego de 3 a 7 meses del tratamiento.

Los polietilenos opacos, particularmente el negro, son de gran utilidad para el control de malezas, al impedir la llegada de luz al suelo. Además, el color de la lámina ha demostrado influir en forma diferencial sobre la presencia de insectos y el momento de aparición de síntomas de enfermedades víricas, habiéndose observado que el uso de polietilenos aluminizados reduce la presencia de áfidos, trips y mosca blanca, respecto a otros colores.



Foto 3: Mulching de suelo color naranja en cultivo de tomate en La Plata

Humedad relativa

En un sistema en el que no se verifican variaciones del contenido de vapor de agua y de la presión atmosférica, al aumentar la temperatura se observa una disminución de la humedad relativa y un aumento del déficit de saturación. Este último expresa la cantidad de agua que puede admitir una masa de aire a determinada temperatura para alcanzar el estado de saturación. Por el contrario, si la temperatura se mantiene constante, al aumentar la humedad

específica se tiene un aumento de la humedad relativa y una disminución de déficit de saturación. El déficit de saturación tiene gran importancia desde el punto de vista fisiológico ya que, junto a la temperatura de las hojas, determina el gradiente de presión de vapor que regula el proceso transpiratorio. La humedad relativa y el déficit de saturación dependen estrechamente de la temperatura del aire y de la cantidad de vapor de agua que contenga. Entre las fuentes de aprovisionamiento de vapor de agua pueden considerarse la evapotranspiración, la irrigación y las intervenciones climatizantes específicas. Como procesos que tienden a disminuir la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera del invernadero se encuentran la condensación, la ventilación y la deshumidificación. Otro problema relacionado a la humedad del aire en el invernadero, es el de la condensación del vapor de agua bajo la forma de gotas. (Foto 4). La humedad relativa tiene un papel muy importante en el crecimiento de los cultivos, pero cuando llega a valores elevados, puede favorecer la proliferación de hongos fitopatógenos causantes de enfermedades. Por lo tanto, resulta muy importante una buena ventilación del ambiente y la disposición de líneas de cultivo que favorezcan esa ventilación.

Dióxido de carbono

El CO_2 es imprescindible en la fotosíntesis, su concentración normal en la atmósfera es de aproximadamente 0,035% (350 ppm), pudiendo variar entre 0,02 y 0,04%. En un invernadero cerrado, a la noche, como resultado del flujo de CO_2 del suelo y de las plantas, aumenta su concentración; en las primeras horas de la mañana las concentraciones son mayores que en la atmósfera. Al aumentar la intensidad luminosa, las concentraciones bajan rápidamente a niveles de 200 ppm. Este nivel se mantiene durante algunas horas, hasta que la intensidad luminosa comienza a disminuir; momento en que aumenta gradualmente la concentración para alcanzar los niveles iniciales. En invierno esta disminución del CO_2 puede ser más notoria ya que la ventilación se disminuye como consecuencia de la baja temperatura exterior. En situaciones de cultivo donde los invernaderos no pueden ventilarse convenientemente, puede recurrirse a sistemas de inyección de CO_2 o abonado carbónico mediante equipos que almacenan el gas a elevada presión y baja temperatura, requiriéndose también un sistema de vaporización y una red de distribución en el interior del invernadero.



Foto 4: Condensación en plásticos tratados con tensioactivos (Fuente: Juan Ignacio Montero)

Instalación y características estructurales de los invernaderos

Cuando se proyecta la construcción de un invernadero deben tomarse en cuenta las características climáticas de la zona, características físico – químicas del suelo, abastecimiento y calidad del agua con fines de riego y otras como la posibilidad de suministro de energía eléctrica, caminos y comunicaciones. Respecto al ambiente climático, es necesario considerar los parámetros que lo caracterizan como: evolución de las temperaturas medias diarias, extremas y estacionales, humedad relativa, periodo libre de heladas, heliofanía teórica y real, intensidad de la radiación, pluviometría mensual y el régimen de vientos, en cuanto a su velocidad máxima, ráfagas, dirección predominante. Este parámetro es importante tanto por la acción mecánica (daños sobre la estructura y cubierta) como por su influencia en el incremento de las pérdidas de calor en el invernadero. La forma del invernadero tiene importancia primordial en dos conceptos: la luminosidad interior y la resistencia al viento, siendo importantes la forma del techo y el ángulo de techumbre. La presión que ejerce el viento sobre la estructura depende de la forma de ésta, la dirección y la intensidad del viento, el material de cobertura, y la existencia o no de protecciones (rompevientos). Los invernaderos con techos redondeados son más resistentes y los plásticos flexibles ofrecen mejor comportamiento que los rígidos. El viento tiene distinto efecto sobre las distintas partes del invernadero. La pared en barlovento (dirección que viene el viento) duplica a la presión que soporta la pared en sotavento. En el techo la cara orientada en sotavento sufre presiones que tienden a elevarlo. Es conveniente que el eje principal del invernadero se ubique en dirección a los vientos dominantes y que no haya puertas ni ventanas con esa ubicación.

Dimensión de los invernaderos

Además del aspecto económico, deben tenerse en cuenta otros criterios como la disponibilidad de mano de obra para el trabajo que va a generarse, rendimiento de los equipos, que normalmente exigen dimensiones mínimas que justifiquen su utilización, posibilidad de construir distintos módulos, uno al lado del otro, adosados o no, pero compartiendo instalaciones comunes. Por otra parte, las dimensiones del invernadero en lo que se refiere a su relación superficie – volumen, permite definir la capacidad global del invernadero para mantener la temperatura. Cuanto mayor sea el volumen de aire retenido, mayor será la cantidad de calor acumulada durante el día por unidad de superficie, disminuyendo la velocidad con la que el calor se irá perdiendo durante la noche.

Tipos de invernaderos

Invernaderos tipo parral o almeriense: posee una estructura vertical de madera o metal, sobre la que se coloca una doble mallas de alambres que sujetan la lámina de polietileno, con el fin de brindar mayor seguridad a la cubierta frente a la ocurrencia de vientos fuertes. Se caracterizan por la escasa pendiente de su techumbre (11 a 15 °), lo que reduce la captación de radiación solar y aumenta la caída de gotas de agua que se forman como consecuencia de la condensación en el techo sobre el cultivo. Encierran un gran volumen de aire, poseen bajo sombreado interno, son resistentes a los vientos, pero tiene una deficiente ventilación y pueden romperse con precipitaciones intensas, por su baja capacidad para evacuar el agua (Foto 5).



Foto 5: Invernadero tipo parral NOA Pcia de Jujuy con cultivo de Melón

Invernaderos tipo capilla o con techo a dos aguas: son estructuras de mediana a baja complejidad de construcción, pudiendo realizarse con materiales de bajo costo, según la

disponibilidad en la zona. Presentan la desventaja de requerir elementos de soporte internos que producen mayor sombreado y la ventilación puede resultar dificultosa cuando los invernaderos se agrupan en baterías (Foto 6).



Foto 6: Invernadero tipo capilla con abertura cenital

Invernaderos tipo diente de sierra: formados por la unión en batería de naves a un agua, orientadas de un modo que penetre a través de una única pendiente la mayor cantidad de luz posible. Se caracterizan por una excelente ventilación pero puede dificultarse la evacuación del agua de lluvia (Foto 7). Invernaderos semicilíndricos o túnel: son estructuras de fácil instalación y muy resistentes a los vientos. Se utilizan para crear, en un volumen reducido, un microclima adecuado para el crecimiento y desarrollo de los vegetales. Pueden emplearse como sistemas semiforzados para proteger sólo la primera fase del cultivo. Como sistema forzado son recomendables para cultivos de mediano a bajo porte. Pueden tener dimensiones variables según la finalidad. Debe tenerse en cuenta el volumen de aire que deben contener para ser efectivos en contrarrestar el efecto del frío. Como regla general, para cada $[m^2]$ de superficie cultivada y protegida debe corresponderle como mínimo un volumen de 0,45 a 0,50 m^3 , y deben manejarse convenientemente con aireaciones oportunas. La ventilación suave puede utilizarse para atenuar la posible inversión térmica causada por el uso de polietileno transparente. Puede utilizarse polietileno perforado que permite un intercambio de aire continuo manteniendo los niveles de temperatura y humedad en valores adecuados y disminuyendo el requerimiento de ventilación.

Invernaderos de techumbre curva: son de mediana a baja complejidad de construcción y permiten un buen aprovechamiento del espacio interno. Poseen buena transmisión de la radiación solar y alta inercia térmica, aunque puede dificultarse la ventilación, dependiendo del ancho y del sistema constructivo.



Foto 7: Invernaderos diente de sierra (NEA) Pcia de Corrientes

Materiales estructurales

La estructura de los invernaderos puede hacerse en madera, hierro, acero o aluminio. Las estructuras construidas en madera son menos luminosas y reducen los espacios libres dentro del invernadero, al requerir la instalación de postes como soporte, generalmente distanciados entre 2 y 3 metros. Como ventaja puede mencionarse la facilidad de armado y su baja conductividad térmica, lo que permite cierto ahorro energético si se utiliza algún método de calefacción. Para prolongar la vida útil de estas estructuras, la madera debe tratarse previamente con materiales que ayuden a su preservación. El uso de hierro y acero requiere montaje por personal especializado, con piezas que deben venir de fábrica. Poseen máxima anchura libre de las naves y muy buena iluminación; mientras que el aluminio presenta ventajas constructivas, pero un costo elevado.

Otros elementos estructurales

Puertas: conviene que faciliten el paso a los medios de transporte con apertura hacia fuera. Lo más habitual para puertas de grandes dimensiones es que sean corredizas. En ciertos casos puede pensarse en dos tipos de puerta: una grande para medios mecánicos y otra más pequeña para el paso del personal. En algunos invernaderos toda la parte frontal puede quitarse fácilmente, lo que resulta muy práctico en el momento de entrar con tractores o cuando se requiere una buena ventilación ya que quitando la parte frontal y trasera se consigue una buena corriente de aire.

Ventanas: se trata de otro elemento importante y depende, en gran parte, del material de la estructura. Su importancia en el desarrollo de la actividad del invernadero radica en dos puntos:

que cierren bien, cuando debe mantenerse el calor y que se puedan abrir mucho cuando se requiere buena ventilación. Cuanto más simple y más barata es la construcción de una cobertura, más complicada suele ser la apertura y cierre correcto de las ventanas. Las ventanas pueden ser laterales y/o cenitales, ubicadas en el techo del invernadero. Un aspecto fundamental en cuanto al dimensionamiento de las ventanas, respecto al resto de la estructura es su función en cuanto a la ventilación del invernadero que permite la renovación del aire interior, imprescindible en toda construcción. En la mayoría de los casos permite equilibrar la temperatura con el exterior cuando la interior sea excesiva, así como cubrir deficiencias de CO₂ y humedad relativa. Se busca una adecuada renovación del volumen de aire, la cual debe ser aproximadamente de 40 renovaciones por hora. La distribución de temperatura dentro del invernadero no es uniforme, sino que se producen perfiles térmicos que varían según el invernadero tenga ventilación cenital o no. Este perfil es consecuencia de las pérdidas de calor a través del material de cobertura y a la diferencia de densidad del aire caliente y frío. En general se observa un aumento de la temperatura hacia el techo, más marcado en los invernaderos sin ventilación cenital. Respecto a la superficie de ventanas, las laterales deben representar del 20 al 25 % de la superficie cubierta para que la diferencia entre el exterior y el interior sea mínima. Si se dispone de ventilación lateral y cenital se estima como valor aconsejable el 10 % de superficie de ventilación cenital y el 15 % de superficie lateral respecto al total de la cubierta. Para que la ventilación sea efectiva con estos porcentajes, es muy importante aumentar la altura de los invernaderos. Las aberturas laterales tienen que comenzar a una altura no inferior a 0,70 m desde el suelo.

Canaletas y bajantes de agua: en prácticamente todos los invernaderos están previstas la recolección, canalización y evacuación del agua de lluvia, en la mayoría de los casos para que no cause problemas en las proximidades o en determinados puntos del propio invernáculo, y en otros para aprovechar el agua de lluvia. En estos últimos casos debe disponerse de depósitos adecuados para su almacenamiento. En todos los casos la cubierta hace las veces de cuenca de recolección y en función del número de vertientes de la cubierta deben existir las canaletas adecuadas, suficientemente dimensionadas, con la inclinación correcta, para recoger y conducir el agua caída. En algunos casos la canaleta puede constituir un elemento más de la estructura, con lo cual además de un posible ahorro de material obtenemos una sensible mejora de la iluminación interior al evitar la repetición de elementos opacos en la estructura.

Tirantes: Según el tipo de estructura es frecuente que lleve tirantes, es decir, piezas de refuerzo para determinados tipos de esfuerzo. Una estructura bien calculada puede ser mucho más “ligera”, es decir, construida con menos cantidad de material, con lo cual se logra mayor ahorro económico, menos obstáculos interiores y menos pantallas a la luz.

Materiales de cubierta: En la elección del material de cobertura debe considerarse tanto la transmisión de la radiación, en cuanto a la disponibilidad de luz, como la capacidad para lograr un máximo efecto invernadero (retención de la energía de alta longitud de onda). Por lo tanto hay una serie de características que deben ser tenidas en cuenta:

- Transparencia a la luz solar (onda corta)
- Retención del calor (opacidad a la radiación de onda larga)
- Rendimiento térmico (diferencia entre la temperatura externa y la interna)
- Ligereza
- Flexibilidad
- Estanqueidad (pocas fugas hacia el exterior)
- Duración o envejecimiento

La mayoría de los materiales de cobertura utilizados presentan una transmisión media ponderada entre 87 % y 91 % para la radiación de onda corta. Hay que tener presente que esa capacidad de transmitir disminuye con el tiempo (alteraciones del material de cubierta) y con el ángulo expuesto a la radiación solar. En relación a la segunda característica el comportamiento de los materiales es bastante diferente, siendo más eficientes los denominados "térmicos", que pueden retener el 80% de la radiación infrarroja. Otro aspecto que puede ser de importancia, es la de la luz, particularmente en zonas de gran insolación. Los materiales rígidos, como el vidrio, policarbonato o poliéster son muy eficientes como aislantes térmicos, por sus características ópticas y por la posibilidad de construir estructuras con un alto nivel de estanqueidad. Su uso se ve limitado por el costo y por requerir construcciones que permitan su adecuada colocación y sujeción. En la actualidad predomina el uso de materiales plásticos flexibles, que en su mayoría contienen una serie de sustancias o aditivos que son aplicados durante el proceso de fabricación y permiten mejorar las cualidades del material.

Materiales antigoteo: reducen la condensación en forma de gotas sobre la cara interna. La presencia de gotas puede reducir la transmisión de la radiación hasta un 40 % debido al aumento de reflexión producido por las gotas que actúan como prismas, sumándose esto al efecto de goteo y mojado que puede producirse sobre el cultivo. Estos polietilenos actúan sobre la tensión superficial dificultando la formación de gotas. El agua, producto de la condensación, queda en forma de lámina que tiende a desplazarse por la inclinación del techo. De esta forma, los rayos de luz pasan sin impedimento y no se produce la caída de agua sobre el cultivo.

Materiales difusores de la radiación: aumentan la proporción de radiación difusa en el invernadero, lo que mejora la intercepción de luz por parte del cultivo, traducándose en aumentos de rendimientos y reduce los riesgos de quemado, en áreas con cielos muy claros y altos niveles de radiación.

Materiales fotoselectivos: dentro de este grupo existen polietilenos "antivirus o antiplaga" que reducen la transmisión de una fracción amplia de la radiación UV, dificultando el desarrollo y movilidad de insectos, reduciéndose la propagación de virus por esta vía. Otros materiales actúan reduciendo la intensidad de las radiaciones en la banda verde (0,5-0,6 μm) en beneficio de la banda roja (0,6-0,7 μm).

Existen materiales de color que absorben más luz que los incoloros, puesto que tienen una banda de absorción proporcionada a la intensidad de su color, a nivel de su color

complementario. Por ejemplo, un material azul marino absorbe en cantidad elevada el color amarillo – naranja, dentro del espectro visible, con lo que se consigue reducir en 1 a 2 °C la temperatura en las horas de máxima luminosidad, y un mejor desarrollo en el sentido horizontal de los cultivos (tallos menos largos, mayor peso de hojas, raíces y tallos). Un material verde esmeralda absorbe radiaciones rojas e infrarrojas, lo que provoca una disminución de la temperatura en el invernadero (sombreado en el periodo primavera-estival). Los materiales rojos se recomiendan en cultivos de tomate, pimiento, frutilla, sandía y flores.

Materiales fotosensibles: el mismo aditivo anti UV que en un principio tiene un efecto estabilizante, luego de cierto tiempo sometido a la radiación se transforma en un agente agresivo que ataca al polímero. El proceso de desintegración química va desde la división del film en trozos hasta volverse un fino polvo y con el tiempo puede ser atacado por el agua y microorganismos. Es una alternativa para un problema cada vez más importante que es la eliminación de los polietilenos luego de su utilización.

Materiales de mayor duración: se incorporan tratamientos que aumenten la resistencia a las radiaciones ultravioletas que actúan acelerando el envejecimiento del plástico. De esta manera se incrementa la duración del mismo pero debe considerarse que un tratamiento anti UV puede reducir la transmisión de la radiación entre un 5 % y un 7 %.

Colocación y sujeción de coberturas

En el momento de decidir el tipo de estructura a construir, debe tenerse en cuenta el sistema de fijación sobre la misma del material de cubrimiento. Esto es particularmente importante en las estructuras metálicas clásicas pues tanto en el caso de la madera como en el del aluminio, o bien es muy simple o bien ya vienen resuelto en función del tipo de piezas utilizadas. No debe olvidarse que la duración respectiva de la estructura y del recubrimiento son muy distintas y el plástico deberá cambiarse por lo menos cinco o seis veces sobre la misma estructura. En este caso, la facilidad del sistema de anclaje de la cubierta a la estructura es fundamental. Si bien la facilidad de montaje es importante en cuanto significa tiempo y, por lo tanto tiene una repercusión económica, también debe considerarse que la forma de sujeción de las piezas o de las láminas incide directamente en la duración de las mismas. Ciertos plásticos no resisten ser perforados, otros se ennegrecen o cuartean con el roce del metal.

Climatización del invernadero

Cuando se realizan cultivos en invernaderos, uno de los objetivos principales consiste en aumentar la temperatura diurna. Sin embargo en latitudes con inviernos fríos y veranos muy

cálidos, pueden ocurrir temperaturas extremas hacia fines de primavera - verano. Los cultivos se ven afectados por:

- mayor respiración de mantenimiento
- daños directo por calentamiento
- establecimiento de fruto nulo o deficiente
- mayor demanda hídrica
- desequilibrio hídrico durante el día, aun con buena disponibilidad de agua

Durante la noche los invernaderos no sólo pierden calor por radiación infrarroja lejana, sino por conducción-convección y por renovaciones de aire. Esta última pérdida de calor, en los invernaderos más comunes de nuestro país es muy alta, lo que anula el beneficio de una menor pérdida de radiación infrarroja. Las bajas temperaturas nocturnas afectan a los cultivos por:

- congelamiento
- enfriamiento
- polinización deficiente
- establecimiento de frutos nulo, deformes o sin tamaño comercial

Climatización en períodos cálidos

El principal objetivo de disminuir las altas temperaturas es lograr ampliar el periodo de utilización del invernadero. El reducir la temperatura es uno de los mayores problemas de la horticultura protegida en climas cálidos, porque no es fácil refrigerar el invernadero sin invertir cantidades relativamente altas en instalaciones y equipos.

Los métodos más usados para lograr este objetivo son:

1. Ventilación
2. Reducción de la radiación solar que llega al cultivo
3. Refrigeración por evaporación de agua

Ventilación

Es la renovación del aire interior, imprescindible en todo invernadero. En la mayoría de los casos permite equilibrar la temperatura con el exterior cuando la interior sea excesiva, así como cubrir deficiencias de CO₂ y humedad relativa. Se busca una adecuada renovación del volumen de aire, la cual debe ser aproximadamente de 40 renovaciones/hora. La ventilación puede hacerse en forma natural, a través del uso de ventanas laterales y/o cenitales; la que puede potenciarse mediante la ventilación forzada por el uso de ventiladores. La ventilación natural es el procedimiento más utilizado (Foto 8). La renovación del aire en el invernadero se produce por dos efectos:

Efecto estático: el movimiento del aire se da por una diferencia de presiones consecuencia de una diferencia de temperatura entre el interior y exterior de la cobertura. La superficie de ventanas es fundamental cuando se utiliza este efecto.

Efecto viento: la velocidad del viento mejora la renovación del aire. Este efecto supera al estático cuando la velocidad del viento es mayor a 1m/s. Cuando la ventilación es cenital, no interesa la dirección del viento.

Para que la ventilación natural sea efectiva, las ventanas laterales deben representar del 20 al 25 % de la superficie cubierta. Cuando se combinan ventanas laterales y cenitales, un 10 % de superficie debe corresponder a la ventilación cenital y un 15 % a la lateral. Para que la ventilación sea efectiva con estos porcentajes, es muy importante aumentar la altura de los invernaderos. Las aberturas laterales tienen que comenzar a una altura no inferior a 0,70 m desde el suelo. La ventilación puede realizarse en forma forzada, estableciendo corrientes de aire mediante ventiladores o extractores, con lo que se consigue homogeneizar la temperatura con el exterior. El uso de ventiladores permite un control más preciso de la temperatura que el que puede lograrse con ventilación pasiva. Se recomienda que la tasa de ventilación sea como mínimo de $\frac{3}{4}$ a un cambio total de aire por minuto, debiendo considerarse las siguientes recomendaciones:

- Los ventiladores deben hacer circular un caudal de aire previamente calculado a la presión estática de 0,03 Kpascales
- La distancia entre dos ventiladores contiguos no debe superar los 7,5 m para asegurar uniformidad en el flujo de aire
- Siempre que sea posible se deben situar los extractores a sotavento de los vientos dominantes en verano. Si deben ubicarse a barlovento, se debe aumentar el volumen a ventilar por cada extractor en un 10 %.
- Debe haber una distancia mínima sin obstáculos a la salida del aire de 1,5 veces el diámetro del ventilador

Reducción de la radiación solar que llega al cultivo: sistemas de sombreado

El sombreado es la técnica de refrigeración más usada en la práctica. Los sistemas de sombreado pueden dividirse en “sistemas estáticos” que una vez instalados sombrean el invernadero de una manera constante, sin posibilidad de graduación o control y “sistemas dinámicos” que permiten un control más o menos perfecto de la radiación solar en función de las necesidades climáticas del invernadero.

Sistemas estáticos

Encalado: El blanqueo de las paredes en base a carbonato de calcio o de cal apagada es un sistema relativamente barato. En zonas de poca lluvia se prefiere el carbonato de calcio porque es más fácil de eliminar por lavado. En zonas más húmedas es preciso usar soluciones de cal apagada. En el aspecto técnico, el blanqueo presenta una serie de inconvenientes:

- a) Permanencia de la cal en el invernadero durante períodos cubiertos.



Foto 8: Diferentes formas de ventilación en invernaderos

- a) Consumo de mano de obra para la aplicación y limpieza.
- b) Imposibilidad de realizar una aplicación homogénea, produciéndose diferencias en la cantidad de luz que llega a las plantas.

Mallas de sombreo: Pueden usarse mallas de polietileno, polipropileno, poliéster o derivados acrílicos. La gama de mallas con distintos porcentajes de transmisión, reflexión y porosidad al aire es muy amplia. Existen también materiales aluminizados que presentan la ventaja de reflejar parte de la radiación en calor. Si la capacidad de reflexión se mantiene con el transcurso del tiempo, estos materiales son los más adecuados para climas cálidos. La

mayoría de las redes de sombreado son poco selectivas, reducen tanto la transmisión de radiación fotoactiva como la del infrarrojo corto. Sería conveniente reducir al máximo esta última y dejar pasar la primera. Siempre que sea posible deben situarse las mallas de sombreado en el exterior, aunque así se limita la vida útil de las mismas y se complica la instalación, la reducción de la temperatura es más efectiva. Por ejemplo, una malla negra colocada dentro del invernadero absorbe radiación y la convierte en calor dentro del mismo, este calor debe ser eliminado por ventilación. La malla exterior se calienta con la radiación, pero se refrigera con el aire exterior del invernadero. Al instalar una red de sombreado se provoca una disminución de los intercambios de aire entre la zona de vegetación y el exterior. Por lo tanto, el sombreado y la ventilación deben ir asociados. Respecto al color de las mallas, la de color negro es la de mayor duración y por eso suele ser la más utilizada. Sin embargo, no es la mejor desde el punto de vista climático. Foto 9



Foto 9: malla media sombra

Sistemas dinámicos

Cortinas móviles: Son mecanismo que permite abrir o cerrar la cortinas de sombreado en función de los niveles de luz, haciendo un uso mucho más eficiente de la radiación disponible.

Riego de la cubierta: Algunos invernaderos tienen instalados un sistema de riego en su cumbrera, de modo que es posible crear una película de agua que fluye sobre la pared. Este resultado parece dar mejores resultados para calentar que para enfriar el invernadero. Como método de calefacción puede usar agua templada (16 a 18°C) que resulta efectiva como medida antihelada. Utilizado como sistema de refrigeración no está libre de problemas como el desarrollo de algas en la cubierta, formación de depósitos sobre el plástico, entrada de agua en el invernadero. Además no supera en reducción de temperatura a los sistemas clásicos de blanqueo o sombreado.

Refrigeración por evaporación de agua

El agua, al pasar del estado líquido a vapor absorbe calor. Si el invernadero dispone de un equipo capaz de vaporizar agua, la vaporización absorberá calor del aire del invernadero y bajará la temperatura ambiente. La evaporación del agua continúa hasta que el aire se satura (humedad relativa del 100 %). La temperatura del aire en condiciones de saturación se llama “temperatura húmeda”. No es posible bajar la temperatura ambiente por debajo de la temperatura húmeda, puesto que el aire no admite más cantidad de agua en el estado gaseoso.

Los sistemas de humidificación empleados en cultivos protegidos son dos: pantalla evaporadora y las boquillas de nebulización.

Pantalla evaporadora: es una pantalla de material poroso que se satura de agua por medio de un equipo de riego. La pantalla se ubica a lo largo de todo un lateral o un frontal del invernadero. En el extremo opuesto se instalan ventiladores eléctricos. El aire exterior entra a través de la pantalla porosa, absorbe humedad y baja su temperatura. Posteriormente, es expulsado por los ventiladores. El invernadero debe ser hermético, de tal manera que todo el aire que es forzado por los ventiladores penetre únicamente a través de la pantalla. Si el aire entrara sin recibir el aporte de humedad de la pantalla, el enfriamiento no se produciría..

Nebulización fina: la nebulización consiste en distribuir en el aire un gran número de gotitas de agua muy finas (10µm). Debido al escaso tamaño, la velocidad de caída de las gotas es muy lenta, por lo tanto, permanecen suspendidas en el aire el tiempo suficiente para evaporarse sin llegar a mojar los cultivos. Si las condiciones ambientales hacen que las gotas se depositen sobre las hojas, la cantidad de agua depositada es suficientemente pequeña para no dañar los cultivos. El elemento más delicado del sistema es la boquilla de nebulización, pues de ella depende la calidad de la instalación. La boquilla recibe agua a presión, la divide en gotas minúsculas y las dispersa a corta distancia. El movimiento natural del aire redistribuye la humedad. Existen también equipos que fuerzan una corriente de aire y mejoran el alcance de las gotas.

Climatización del invernadero en periodos fríos

Según las metas que se proponga el productor, los costos, la inversión a afrontar y la rentabilidad esperada, pueden considerarse tres niveles de temperatura deseada:

- Lucha contra heladas: evitar que se llegue a la temperatura letal media del cultivo
- Mantener la temperatura por sobre la que produce daños por enfriamiento del cultivo
- Mantener la temperatura nocturna en el nivel óptimo para los cultivos

Para lograr estos objetivos se pueden utilizar métodos complementarios, clasificados en:

1. Materiales de cubierta
2. Técnicas de ahorro energético
3. Sistemas de calefacción

Materiales de cubierta: cualquier material utilizado como cubierta de los invernaderos debe poseer ciertas características básicas:

- Máxima transparencia a la radiación solar global o de longitud de onda corta
- Máxima opacidad a las radiaciones térmicas o caloríficas de longitud de onda larga

Dentro de los materiales flexibles, en términos generales, el PVC y el polietileno presentan un nivel medio de protección térmica durante la noche similar, permitiendo alcanzar temperaturas de entre 2 °C y 2,5 °C más que fuera del invernadero. Dentro de los materiales rígidos como vidrio o materiales plásticos en placa es posible alcanzar niveles de protección térmica nocturna del orden de 4-5 °C.

Si se analizan las pérdidas por conducción-convección del invernadero y por radiación infrarroja, es importante considerar el espesor de los materiales, ya que esta característica es mucho más importante que las propiedades térmicas propias de los distintos materiales de cobertura.

Técnicas de ahorro energético

- a) Pantallas térmicas
- b) Paredes dobles
- c) Cortavientos

Pantallas térmicas: Se colocan sobre el cultivo mallas, generalmente aluminizadas, de manera que reflejen hacia el interior la radiación térmica. Se prefieren materiales que no sean rígidos para facilitar el plegado y desplegado, deben ser permeables al agua para que no se formen bolsas de lluvia o condensación, tener características anticondensantes, para prevenir la formación de grandes gotas que pudieran caer sobre el cultivo y resistencia al rasgado para resistir el rozamiento sobre los alambres y cables de soporte.

Paredes dobles: Consiste en instalar otra película, generalmente de polietileno de 50 ó 100 micras de espesor separada unos centímetros de la cubierta principal. La separación óptima entre ambas películas está entre 2 y 10 cm. Si se aumenta la separación no se mejora la reducción de pérdidas térmicas, puesto que el aire confinado en la pared doble puede moverse con mayor facilidad. La separación de ambas láminas por medio de aire a presión es una variante mejorada del sistema anterior.

Sistemas de calefacción

La calefacción de un invernadero se puede hacer por convección o por conducción, o de ambos a la vez.

Sistemas por convección

- Tuberías aéreas de agua caliente
- Aerotermos
- Generadores de aire caliente
- Generadores y distribución del aire en mangas de polietileno

Tradicionalmente se han utilizado los sistemas de calefacción aérea con distribución en tuberías de agua caliente. El cálculo del sistema es muy simple y se basa en la cantidad de calor disipado por unidad de longitud de la tubería. Los sistemas que utilizan el aire como fuente de distribución del calor como aerotermos o generadores se usan en los casos en que interesa mantener el salto térmico mínimo o solo para casos de emergencia, heladas puntuales o zonas de inviernos suaves. La distribución del aire caliente se mejora en el caso de generadores de aire mediante la utilización de mangas de polietileno con orificios. Las ventajas de estos sistemas son:

- rápida respuesta en cambios de temperatura
- regulación sencilla de la temperatura
- eficiencia térmica alta

Desventajas:

- distribución más irregular del calor
- alto consumo de energía eléctrica para los ventiladores

Tuberías aéreas de agua caliente:

El sistema está provisto de una caldera donde el agua se calienta y circula simplemente por gravedad, es decir, por diferencia de densidad que hay entre la que sale de la caldera y la que entra (circulación pasiva). También puede disponerse de una bomba (circulación forzada). En el primer caso se requiere que exista un desnivel entre la caldera y el invernadero y el uso de cañerías de gran diámetro (4 pulgadas).

Aerotermos:

Basa su funcionamiento en un calentamiento convectivo. Posee un intercambiador de calor constituido por tubos en los que circula agua caliente (que actúan como radiantes) y

un ventilador que impulsa el aire que se calienta, provocando un flujo continuo de intercambio (Foto 10)

Generadores de aire caliente:

Este sistema ofrece dos posibilidades:

- 1) El aire caliente pasa directamente del generador al interior del invernadero, donde se difunde por convección. Los gases de descarga se eliminan a través de una chimenea. Hay equipos más simples cuya finalidad es lograr una calefacción de socorro.
- 2) El aire caliente mezclado con los gases de descarga se hace circular en el invernadero y luego se elimina a través de tuberías especiales que los descargan en el exterior. Se favorece la circulación de aire por medio de un ventilador que puede estar al principio o al final.



Foto 10: Aerotermos en cultivo de yerbera en Barcelona -España

Sistema por conducción

Se basan en tuberías de agua caliente, las diferencias entre ellos se encuentran en la temperatura del agua y su localización.

- ✓ En el piso a nivel del cultivo
- ✓ Por banquetas

Su uso se limita a la producción de plantas en macetas y consiste en tubos de polietileno, polipropileno, etc. por los que circula agua caliente.

Automatización del control climático

Muchos de los mecanismos de climatización pueden automatizarse para que operen en forma autónoma según parámetros ambientales pre-establecidos por un operador. Para que esto sea factible, se requieren sistemas informáticos que procesen las distintas variables que

deben tenerse en cuenta. Deben instalarse sensores que registren variables ambientales como temperatura, humedad, radiación, velocidad del viento, concentración de CO₂ y transmitan los valores medidos a sistemas que procesen la información y activen automáticamente los sistemas de control ambiental.

Bibliografía

- Alpi, A.; Tognoni, F. (1991). Cultivo en Invernadero. Madrid: Mundi-Prensa.
- Bernat Juanos, C.; Vitoria, J. J. A.; Martínez Ros, J. (1990). Invernaderos: Construcción, manejo, rentabilidad. Barcelona: Aedos.
- Camacho M. J. (1995). Avaliação de elementos meteorológicos em estufa plástica em Pelotas, RS. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 3(1), 19-24.
- Buriol, G.A. (1993). Modificação na temperatura mínima do ar causada por estufas de polietileno transparente de baixa densidade. Rev. Brasileira de Agrometeorologia, 1(1), 43-49.
- Buriol, G. A.; Streck, N. A.; Schneider, M. M.; Heldwein, A. B. (1996). Temperature and moisture regime of a soil covered with transparent mulches. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 4(2), 1-6
- Carbone, A.; Garbi, M.; Morelli, G.; Martínez, S.; Grimaldi, M.C.; Somoza, J. (2012). Influencia del grado de envejecimiento del polietileno sobre la transmisión de radiación fotosintéticamente activa (PAR) hacia el interior de un invernadero parabólico. Horticultura Argentina, 31(76), 22.
- Csizinszky, A.A.; Schuster, D. J.; Dring, J.B. (1995). Color mulches influence yield and insect pest populations in tomatoes. Journal of American Society Horticultural Science, 120, 778-784
- Garbi, M.; Grimaldi, M. C.; Martínez, S. Ex aequo. (2001). Efecto de plásticos de color sobre la temperatura del suelo durante el periodo frío en La Plata (Buenos Aires, Argentina). Revista Argentina de Agrometeorologia, 1(1), 87 – 90.
- Garbi, M.; Grimaldi, M. C.; Martínez, S; Carbone, A. Ex aequo. (2002). Influencia de invernaderos sobre la temperatura estival en el cinturón hortícola platense. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 10(1), 27-31.
- Grimaldi, M.C.; Somoza, J.; Garbi, M.; De Hagen, T.; Massi, A.; Barrenechea, M.; Martinez, S. (2013). Invernaderos: influencia de la tipología sobre la marcha térmica durante el mes de enero. Actas del XXXVI Congreso Argentino de Horticultura, (pp. 249). San Miguel de Tucumán: Asociación Argentina de Horticultura.
- Jarvis, W. (1998). Control de enfermedades en cultivos de invernadero. Madrid: Mundi-Prensa.
- Matallana Gonzalez, A.; Montero Camacho J.I. (1993). Invernaderos. Diseño, construcción y ambientación. Madrid: Mundi-Prensa.

- Martínez, P.F. (1994). The influence of environmental conditions of mild Winter climate on the physiological behaviour of protected crops. *Acta Horticulturae*, 357, 29-48.
- Martínez, S., Garbi, M., Etchevers, P.; Asborno M. Ex aequo. (1998). Efecto del color de la cobertura plástica sobre el régimen térmico del suelo para el cultivo de tomate en invernadero plástico. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 6(2), 147-150.
- Martínez, S.; Grimaldi, M. C.; Garbi, M.; Raggio, M.; Barrenechea, M. (2001). Amplitud térmica del suelo: Influencia de los mulch de colores en cultivo de apio en La Plata. *Actas del XII Congreso Brasileiro de Agrometeorología*, (pp. 865-866). Fortaleza: Sociedad Brasileira de Agrometeorologia.
- Montero Camacho, J. I. (1999). Climatización de invernaderos durante períodos fríos y cálidos. *Actas de la 8ª Jornada Sobre Cultivos Protegidos*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
- Teitel, M.; Montero, J.I.; Baeza, E.J. (2012). Greenhouse design: concepts and trends. *Acta Horticulturae*, 952, 605-614.
- Munguia, J.; Zermeno, A.; Quezada, R.; De La Rosa, M.; Ibarra, L.; Torres, A. (2004). Relación entre los componentes del balance de energía y la resistencia estomática en el cultivo de melón bajo acolchado plástico. *Phyton*, 73, 181-192.
- Muñoz, P. (2000). Aplicación de fundamentos teóricos para el control del ambiente de la producción hortícola bajo cubierta. Curso de Post-grado Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
- Rocha, M.S.; Martínez, S.; Garbi, M.; Somoza, J.; Pincirolí, M.; Grimaldi, M.C.; Morelli, G. Análisis de la temperatura y de la radiación interna en invernaderos con techo simple y doble en cultivo de rosas Colonia Urquiza, Buenos Aires. *Actas de la XIV Reunión Argentina de Agrometeorología*, (pp. 117-118). Río Cuarto: Asociación Argentina de Agrometeorología.

CAPITULO 10

Bioproductividad en hidroponía

José Beltrano

Introducción

Desde que el hombre moderno, cambió su hábito de vida de nómada en sedentario, paso también a convertirse de simple recolector de alimentos, en productor de los mismos. En ese momento, hace aproximadamente 10.000 años, las poblaciones humanas procedieron a la domesticación tanto de animales como de plantas, confinando el desarrollo de estos en tiempo y espacio determinado, para asegurar el sustento alimenticio de su comunidad. De este modo surgen los primeros sistemas agropecuarios de la civilización moderna. Enfrentado el hombre a una necesidad creciente de alimentos en virtud de un crecimiento poblacional mundial cada vez mayor, fue necesaria la adquisición de nuevos conocimientos con el fin de comprender el funcionamiento individual de las plantas, conocer las características de la interrelación entre ellas y de éstas con el ambiente, en sistemas agrícolas modificados como los cultivos, para lograr aumentos en la productividad. El comportamiento de una planta viene condicionado por el conjunto de variables que configuran el microclima y la rizosfera donde se desarrolla. Las condiciones óptimas para cada uno de estos factores permiten o conducen a la máxima respuesta vegetativa y reproductiva, condicionada por su genoma. A medida que cada variable se aparte del óptimo considerado, la planta se ve sometida a condiciones de estrés de incidencia variable según el momento fenológico del cultivo, la duración y la intensidad del estrés. Los principales factores ambientales: radiación, humedad relativa, CO₂, O₂, nutrientes, etc., no solo son capaces de producir situaciones de estrés por sí mismos, sino que inducen otros estreses por su comportamiento interrelacionados. Si el cultivo se lleva a cabo en invernadero, este ambiente confinado se modifica con una inercia diferente que el ambiente exterior y depende de las características del invernadero y del manejo del mismo, por lo que es similar, aunque no idéntico a cualquier sistema de cultivo utilizado y las diferencias debemos buscarlas en el microclima y en la rizosfera.

Es interesante resumir, al principio de este capítulo, la importancia que puede tener difundir la importancia u objetivos de los cultivos hidropónicos:

Producir alimentos en las zonas áridas

Producir en regiones con condiciones climáticas adversas

Producir en regiones donde el agua tiene un alto contenido de sales
Producir en regiones donde la agricultura no es posible debido a limitantes de suelo
Producir hortalizas, flores y plantas ornamentales en la proximidad de grandes centros de consumo

Los sistemas hidropónicos son ideales para las investigaciones con plantas en ambientes controlados o semicontrolados.

En este capítulo se pretende abordar la problemática de la fisiología de los cultivos hidropónicos, desde el punto de vista del novel productor, con el fin de brindar una herramienta de conocimiento básica, para quienes cuentan en su formación con los conocimientos elementales de la climatología, edafología, fisiología y los factores que pueden inducir situaciones de estrés bióticos y abióticos, que los capacitan para seguir siendo los actores de la experiencia del cultivo hidropónico. La raíz absorbe y suministra a la planta el agua y los nutrientes minerales. La parte aérea de la planta fabrica, recibe y distribuye los carbohidratos que le proporcionan la energía (lumínica-solar) necesaria para sus funciones fisiológicas. Los vegetales son los únicos organismos vivos capaces de convertir la energía lumínica, en energía química, a través del proceso de fotosíntesis. Esta energía química esta representada en moléculas orgánicas de distinta naturaleza, y que finalmente constituyen lo que se denomina biomasa. El rendimiento del cultivo hidropónico va a estar representado por la biomasa efectivamente aprovechada por el hombre, a través de la obtención de distintos productos ya sean para alimentación directa (granos, tubérculos, raíces, frutos, hojas y tallos de hortalizas, inflorescencias, etc.), para su conversión en carne (biomasa aérea de plantas forrajeras), para su aprovechamiento textil (fibras), para su aprovechamiento industrial (especies arbóreas forestales) o para su aprovechamiento ornamental (flores, especies arbóreas ornamentales). El rendimiento de los cultivos hidropónicos en general pueden duplicar los rendimientos de los cultivos en suelo y al aire libre. Las diferencias entre los dos sistemas pueden acentuarse o minimizarse en función del manejo de cada uno de los factores incidentes en la producción de biomasa, partición de la misma, la eficiencia en el uso de los recursos y la calidad y conocimiento de los operadores. En algunos casos, como en la producción de forraje, casi toda la productividad primaria del sistema (excepto o inclusive las raíces), es igual al rendimiento del sistema de producción. En otros casos el rendimiento diferirá, en virtud del patrón de partición del vegetal.

$$\text{Fotosíntesis Neta FN} = \text{F. bruta (FB)} - (\text{Resp. oscura (RO)} + \text{Fotorrespiración (FR)})$$

Teniendo en cuenta las reacciones de síntesis (fotosíntesis) como las de consumo o degradación (respiración y fotorrespiración), es lógico pensar que el balance neto (fotosíntesis neta) será función de un balance energético, entre los procesos de producción y de consumo

de energía. Por lo tanto los factores determinantes de la fotosíntesis neta, serán aquellos que afecten a estos procesos y se los puede considerar como sigue

La cantidad de luz (fotones) capaz de ser interceptada y absorbida por las plantas.

La capacidad y eficiencia de conversión de la energía lumínica en energía química.

La magnitud del consumo de energía, a través de escoto y fotorespiración.

La cantidad de fotones capaz de ser interceptada y absorbida por las plantas

En este sentido es necesario puntualizar que la intercepción de la luz por parte del cultivo será función de las características propias de la radiación incidente, tanto en cantidad como en calidad y de las características inherentes al cultivo como son aquellas que caracterizan al conopeo del mismo, con respecto a su arquitectura, su densidad (medida a través de su índice de área foliar o IAF), la distribución y permanencia de éste en el tiempo (Duración del área foliar o DAF).

Características de la radiación incidente

De la radiación incidente en la superficie terrestre sólo un 40 % es efectivamente activo en la fotosíntesis, y un 60 % de la radiación corresponde a una longitud de onda no absorbida por las plantas. Del 40 % fotosintéticamente activo, existen pérdidas por reflexión (5-15%), un 8% como calor y un 10% se trasmite a través de las hojas.

Cuando la luz incide normalmente sobre una hoja su penetración depende de las características de la cutícula y de los tejidos epidérmicos, en empalizada y esponjoso. La luz que pasa la epidermis llega a las células del tejido en empalizada y la que no es absorbida, llega al esponjoso. Parte de esta radiación que incide sobre éste es reflejada hacia el tejido en empalizada. La que alcanza la epidermis abaxial interna, parte también vuelve hacia el mesófilo y, en parte, la atraviesa y se transmite fuera de la hoja. Debido a estos fenómenos ópticos dentro del mesófilo se crea una "turbulencia" de fotones que aumenta su absorción por los cloroplastos, maximizando su utilización.

Características de la arquitectura del canopeo

La biomasa, es el producto de la fotosíntesis y en la que están incluidos los elementos incorporados por las raíces, que no sobrepasan el 10 % del peso seco total. Toda la materia seca de una planta está entonces formada por sustancias fotoasimiladas y en menor proporción por elementos tomados por las raíces desde la solución nutritiva. La cantidad de biomasa producida será función de la intensidad del proceso fotosintético global del cultivo y éste estará determinado por la cantidad de fotones que son capaces de ser interceptados por el canopeo del mismo, siempre que la solución del suelo aporte los elementos necesarios para que la maquinaria de síntesis funcione adecuadamente. Como ya se mencionó, esta capacidad de intercepción de fotones dependerá de la densidad o amplitud del canopeo, de su

disposición en el espacio o arquitectura del mismo y de la duración del área foliar a lo largo del tiempo. Es necesario entonces definir el concepto de canopeo, como el espacio comprendido por la sumatoria de hojas y aire interpuesto entre ellas, limitado por y desde el suelo hasta una línea imaginaria que una las hojas más externas del cultivo o planta. Los canopeos pueden diferenciarse en canopeos laxos o densos, con todas las variantes intermedias correspondientes a cada cultivo y a las cuestiones de manejo (distancia entre plantas, manejo de poda, etc). El grado de laxitud o densidad de un canopeo puede ser cuantificada a través de un índice de crecimiento como es el índice de área foliar o IAF que se define como la superficie fotosintetizante por unidad de superficie de suelo:

$$\text{IAF} = \Sigma \text{área foliar (m}^2\text{)} / \text{Área de suelo (m}^2\text{)}$$

La magnitud del IAF en los cultivos va desde valores de cero, a la siembra (no existen hojas) o hasta la emergencia, hasta valores variables según las especies (alrededor de 6 para cultivos y 14 en sistemas forestales, aproximadamente). La evolución del IAF a lo largo del ciclo de un cultivo es variable según las condiciones en que se lleva a cabo el cultivo y las características genéticas del mismo. Luego de la emergencia, el crecimiento inicial de la masa foliar tiende a ser lento, con el resultado de que la intercepción de luz durante las primeras etapas del crecimiento del cultivo suele ser escasa, incluso en presencia de condiciones ambientales favorables. Luego de este período de crecimiento relativamente lento, ocurre por lo común un aumento rápido en el IAF, durante un período de tiempo de duración variable, seguido por una declinación que también puede ser muy rápida. En los cultivos a campo, la intercepción de luz alcanza una proporción alta únicamente cuando el IAF es superior a 3-4, situación que se da en 2 a 3 meses para muchos cultivos anuales, y no siempre coincide con los momentos de radiación más alta o condiciones de crecimiento más favorables. En los cultivos hidropónicos en invernadero, los tiempos son modificados, generalmente son más cortos y el aprovechamiento de la radiación es más eficiente. En cuanto a la disposición del área foliar, el factor más importante a tener en cuenta es el ángulo de inserción de las hojas. Los cereales, por ejemplo, tienen ángulos de inserción próximo a 90 ° con respecto a la horizontal (especies erectófilas), mientras que en la papa, que tiene ángulos de inserción de sus hojas menores a los 90°, con respecto a la horizontal, (especies planófilas). Además, relacionado con este concepto también va a ser variable para ambas especies la magnitud de su índice de área foliar crítico (IAFc), entendiéndose por este como el IAF que es capaz de interceptar el 95 % de la radiación incidente sobre el cultivo. Los valores de IAF serán características genotípicas de cada especie y cultivo, pero no obstante ello, son variables fuertemente influenciadas por las condiciones ambientales y por el hombre a través de sus labores culturales de manejo. De este modo la disponibilidad de agua y nutrientes, los niveles de temperatura del ambiente, la densidad de siembra o disposición de las plantas en el sistema

hidropónico, la presencia o no de malezas, la acción de patógenos o plagas, etc., incidirán fuertemente en la magnitud de estos índices en el cultivo. Obviamente, muchos de estos factores son mas manejables en los cultivos hidropónicos que en los cultivos a campo. Si bien el IAF es una variable determinante en la “cosecha” de luz por parte de los cultivos, también la arquitectura del canopeo de los individuos tendrá gran relevancia, entendiéndose por ello la disposición de las hojas en el espacio. Es así como distintas especies con el mismo valor de IAF, interceptarán distinta cantidad de fotones en virtud de su diferente arquitectura, ya sean especies planófilas o erectófilas, como ya fue definido. En base a trabajos de dos investigadores japoneses, Monsi y Saeki (1953) se pudo evaluar el comportamiento en el cultivo, de la influencia de la arquitectura del canopeo en la captación de la luz, a través de la creación de un índice que representa la disminución de la irradiancia, cuando la luz penetra dentro de un canopeo de un cultivo herbáceo. Ellos encontraron una relación matemática entre el logaritmo natural del cociente entre la irradiancia que llega a un estrato determinado dentro del canopeo y la irradiancia incidente en el tope de canopeo. Estos investigadores determinaron que esta relación es una función lineal del producto del IAF por una constante de proporcionalidad, que denominaron coeficiente de extinción (K), ya que nos expresa con cierta precisión como se extingue la luz al atravesar los estratos del canopeo o al penetrar en el mismo dentro del cultivo. Cuanto mayor es la pendiente del coeficiente K , mayor es la intercepción de la luz por las hojas y, por lo tanto, más abrupta es la disminución de la irradiancia a medida que se penetra en el canopeo. De este modo si las hojas estuvieran en un solo plano horizontal, el valor de K sería máximo (próximo a uno), la luz se extinguiría en los estratos superiores y la distribución dentro del canopeo sería muy deficiente. Si las hojas se dispusieran todas en posición vertical, el valor de K sería mínimo (próximo a cero) y la distribución de luz dentro del canopeo sería mucho más uniforme. Esta conclusión conduce a otra: una menor intercepción de luz de alta irradiancia en las hojas superiores resultará en un mayor aprovechamiento en todos los estratos. El coeficiente K de todas maneras no es un índice muy preciso dado que en su formulación se supone que las hojas se distribuyen al azar y la orientación es uniforme, lo cual no ocurre así en todos los cultivos. Además este coeficiente será variable en función del valor de IAF y de la altura del canopeo. De todos modos, en general las especies erectófilas presentan valores menores de K y las especies planófilas, valores mayores, evidencia que permite afirmar que en especies erectófilas la penetración de la luz al interior del canopeo es mayor. Por consiguiente, las hojas dispuestas en forma más vertical pueden representar una ventaja significativa en los cultivos, en cuanto a la eficiencia en el uso de la radiación. La capacidad y eficiencia de conversión de la energía lumínica en energía química. La totalidad de la energía contenida en los fotones no es convertida en energía química, sino que dependerá de la eficiencia que posea el sistema fotosintético para transformar la energía lumínica en energía química. El grado de esta transformación se denomina Eficiencia de Conversión (ε , épsilon). Para poder calcular ε es necesario conocer el número de fotones requeridos para reducir un mol de CO_2 (requerimiento

cuántico) o su inversa, es decir el número de moles de CO₂ reducidos por cada mol de fotones interceptados (rendimiento cuántico). Ambos se calculan como sigue:

Requerimiento cuántico = moles de fotones requeridos/ mol de CO₂ reducido

Rendimiento cuántico = (moles de CO₂ reducidos/moles de fotones absorbidos) x 100

La tasa de crecimiento medida como acumulación de MS de un cultivo, se puede expresar a través del Coeficiente de Productividad Neta (C) (expresado como g MS. m⁻². día⁻¹). Este representa la ganancia neta diaria de MS en todo el cultivo y será función de un balance entre energía convertida y la consumida, en procesos de escoto y fotorespiración. Este balance variará con la ontogenia del cultivo, la tasa de crecimiento, la cantidad de biomasa, la relación entre órganos fotosintéticos: órganos no fotosintéticos y condiciones del ambiente. En términos generales, un cultivo respira más cuanto mayor es su demanda energética. De este modo cultivos jóvenes, en pleno crecimiento, experimentan mayores tasas de respiración específica, esto es por unidad de biomasa producida. Esto responde a la mayor demanda de esqueletos de carbono para crear las nuevas estructuras, la reposición de éstas, y a la alta demanda energética (ATP) para sostener el crecimiento. A medida que la planta se desarrolla y envejece, esta demanda se reduce y la respiración también disminuye. Un cultivo consume en procesos respiratorios entre el 50 y el 75 % de los carbohidratos fotosintetizados. Una gran proporción de esta respiración se da en las raíces, ya que éstas respiran entre un 20 y un 40 % del total de los fotoasimilados producidos por la planta durante el día. La respiración del cultivo se estima como la suma de dos términos, respiración de mantenimiento y respiración de crecimiento. La respiración de mantenimiento tiene como objetivo el sostenimiento energético de los procesos que sustituyen estructuras que sufrieron degradación, como el recambio enzimático y proteico, el mantenimiento de estructuras de membrana y la incorporación y transporte de nutrientes y transporte de compuestos varios inorgánicos y orgánicos. La respiración de crecimiento, representa el costo metabólico de convertir los productos de la fotosíntesis, en compuestos estructurales, citoplasmáticos o de reserva. A medida que el crecimiento de la planta aumenta, también aumentan su tasa de respiración específica y la proporción de la respiración de crecimiento respecto a la de mantenimiento. Por lo antes expuesto, surge como estrategia para optimizar la producción del cultivo, minimizar los costos respiratorios de mantenimiento con el objetivo de destinar más carbono a la respiración de crecimiento, optimizando la economía del carbono del cultivo. En este sentido es sabido que en condiciones limitantes de nutrientes y agua, las raíces pueden llegar a consumir hasta el 70 % de los fotoasimilados que le llegan durante el día desde la parte aérea de la planta, con el fin de aumentar su crecimiento y poder explorar mas regiones de suelo, para subsanar estas limitantes. Esto no debería suceder en caso de cultivos hidropónicos, en que tanto el agua como los nutrientes están fácilmente disponibles para el sistema radical, para su absorción y

transporte. En este sentido, es bueno recordar que una situación de estrés (falta de riego) en un cultivo hidropónico, puede tener consecuencias más graves que en un cultivo en suelo, por las diferentes inercias de los sistemas de cultivo. De allí que un buen status hídrico y nutricional de la planta minimizaría estas pérdidas de carbono. Por otro lado la reducción de factores de estrés, causados por inadecuados niveles térmicos, plagas, enfermedades o malezas, minimizaría la alteración de estructuras vegetales que luego demandarán de gastos de carbono en respiración de mantenimiento, para reponerlas. Otra estrategia es la selección de genotipos que tengan bajo costo de respiración de mantenimiento (por aumento en la eficiencia del transporte de fotoasimilados y en la vida media de sus proteínas). También se han detectado genotipos con una relación inversa entre crecimiento y respiración, esto es que genotipos con una tasa de crecimiento más rápida tienen tasas de respiración de mantenimiento más bajas, de manera que la mayor parte de la energía producida por la respiración se destina al crecimiento activo.

Rendimiento

La cantidad de biomasa de una planta o de un cultivo, no es un indicador del rendimiento de un cultivo, excepto en el caso de hortalizas de hoja, donde la biomasa está representada por las hojas y se consumen las mismas en su totalidad (lechuga, espinaca, acelga) o especies destinadas a su aprovechamiento forrajero o pastizales naturales. Por lo tanto la biomasa destinada al crecimiento y expansión de los órganos que son aprovechables por el hombre, ya sean granos, tubérculos, fibra, etc. es el denominado rendimiento de las comunidades vegetales o los cultivos. De este modo se formuló un índice de eficiencia de conversión de energía en productos utilizables directa o indirectamente por el hombre, llamado Índice de cosecha. Índice de cosecha =

$$IC = \text{Cantidad de biomasa aprovechable} / \text{Cantidad de biomasa total} \times 100$$

La magnitud de este índice es variable entre comunidades y dentro de una misma comunidad o cultivo y va a depender del patrón de partición de la biomasa, dicho de otra manera, este índice expresa el modelo de distribución de los asimilados y más concretamente nos indica el porcentaje de la biomasa total que se utiliza para los órganos cosechables. El mismo puede ser afectado por varios factores, algunos de ellos propios de la especie y otros propios del ambiente de cultivo y las prácticas que se apliquen. Por lo tanto son susceptibles de ser modificados por el hombre, ya sea a través del fitomejoramiento o de la implementación de distintas tecnologías de cultivo, como efectivamente lo ha sido hasta la actualidad.

Los mismos se pueden discriminar como sigue:

- Características del traslado de fotoasimilados hacia los destinos o sitios de almacenaje
- Número y tamaño potencial de esos sitios de almacenaje de fotoasimilados
- Duración del período de llenado de los destinos
- Duración del área foliar

Características del traslado y distribución de fotoasimilados hacia los destinos.

En muchos sistemas parece que la tasa de exportación de fotoasimilados varía en forma paralela a la tasa de fotosíntesis. La fuerza de atracción de los destinos constituye un factor determinante en los patrones de distribución de la materia seca y, por ende, del rendimiento, pero aún no está claro si esto depende de la capacidad de descarga de fotoasimilados en los destinos, con o sin ayuda de hormonas producidas por el lugar de recepción. Por lo tanto el conocimiento de estos procesos es una de las tareas a emprender en el futuro, por los fisiólogos de cultivos.

Número y tamaño potencial de los destinos o sitios de almacenaje

Se cree que buena parte de los efectos de los factores ambientales sobre la distribución de fotoasimilados son el reflejo de sus efectos diferenciales sobre la actividad de los destinos potenciales de las plantas. En algunas especies cultivadas, el tallo puede constituir un depósito transitorio de fotoasimilados. Estas sustancias pueden ser retranslocadas más tarde, a otros órganos de reserva o a los frutos. En la papa, por ejemplo, un porcentaje del peso final de los tubérculos puede provenir de material almacenado en el tallo. El tallo pierde peso rápidamente cuando comienza la senescencia foliar, al término del ciclo de cultivo, y puede proveer un 20 a 25 % del total de la materia seca que se deposita en el tubérculo. En el trigo un 10% del peso final del grano puede provenir de materiales almacenados en el tallo. Se le atribuye a las reservas almacenadas en el tallo un papel importante en amortiguar los efectos de las fluctuaciones en las condiciones ambientales, sobre la provisión de fotoasimilados a los destinos, al verse reducida o alterada la integridad de la masa foliar del canopeo del cultivo. El carácter de número y tamaño de destinos, en muchas especies ha sido seleccionado por los fitotecnistas, a veces inadvertidamente, a lo largo del proceso de mejoramiento de las especies vegetales de cultivo, al utilizar como criterio de selección el IC. En este sentido si la cantidad de destinos o el número de células no es suficiente para acumular la materia orgánica producida por la fotosíntesis, se produce una retroinhibición del proceso fotosintético operada por la acumulación de hidratos de carbono, proteínas o lípidos. El tamaño potencial de los órganos de almacenamiento está ampliamente relacionado con la duración de su llenado, de modo que los granos grandes pueden representar una característica de rendimiento importante cuando el almacenamiento es prolongado. Como contrapartida, en ambientes donde la sequía o el calor interrumpen dicha fase, suele ser más importante tener muchos granos, y una tasa de rápida

de almacenamiento, que granos grandes. En el caso de los cultivos hidropónicos, estas situaciones de estrés hídrico no deberían presentarse y el estrés por altas temperaturas puede morigerarse mediante diferentes técnicas de ventilación de los invernaderos.

Duración del período de almacenamiento o “llenado” de los destinos

La duración del período de “llenado” constituye un determinante muy importante del rendimiento. La duración del almacenamiento en varios cultivos parece estar inversamente relacionada con la temperatura como en el arroz, trigo y algodón, donde las temperaturas altas acortan el período de almacenamiento. Como la temperatura y la radiación incidente están a menudo correlacionadas, la duración de la fase de almacenamiento o llenado de los destinos puede disminuir a medida que aumenta el nivel de radiación, con el resultado de que el rendimiento puede incrementarse conforme con la radiación diaria, sólo hasta un punto determinado, más allá del cual alcanza un valor estable. No se conoce con precisión por que las temperaturas altas acortan el período de llenado. Puede que se afecten las proteínas foliares, provocando una senescencia más prematura. Estos procesos pueden estar influenciados por las citocininas sintetizadas en raíz, como agentes antisenescentes y es posible que la detención del crecimiento radical indique la finalización de la actividad de almacenamiento en la parte aérea. Por lo antes presentado, sería necesario clarificar en que grado el almacenamiento sostenido de proteína y carbohidratos en frutos, depende del crecimiento permanente de las raíces, con el fin de seleccionar variedades con este carácter, con el objeto de lograr mayores rendimientos. En el caso de los cultivos hidropónicos, la posibilidad de evitar situaciones de estrés por falta de agua y moderar las altas temperaturas, hace que las raíces se vean menos castigadas o menos perjudicadas por estas situaciones de final del cultivo, en estas condiciones la senescencia puede dilatarse y el llenado de los destinos ser más eficiente.

Duración del área foliar

Calculando la integral del IAF a lo largo del ciclo de un cultivo tendremos otro parámetro que contempla el área foliar, como es la duración del área foliar (DAF). Esta información, también asumirá valores diferentes según el tipo del cultivo que se trate, y es importante a la hora de evaluar la capacidad de interceptar la radiación a lo largo del tiempo, especialmente en el período crítico, donde se definirá el número de destinos y estos comiencen a ser llenados con fotoasimilados provenientes de las hojas. En este sentido se sabe que a partir del momento en que se define el número de destinos, la duración del período de llenado guarda estrecha relación con la fuente de fotoasimilados como es la suma de la superficie foliar y de la duración de esta área foliar. Aproximadamente un 50 % de las variaciones en el rendimiento, debidas a cuestiones climáticas, prácticas agronómicas y al cultivar, están asociadas a la DAF, además de diversos factores como la disminución de nitrógeno en el suelo, estrés hídrico, o altas temperaturas que acortan el período de llenado de los destinos, al afectar la integridad del área

foliar fotosintetizante. En el caso de los cultivos hidropónicos en invernadero, muchas de estas inclemencias pueden superarse con el simple cuidado del operador.

Factores que Limitan el rendimiento

Mediante un cuidadoso análisis, de lo visto en capítulos previos, estaríamos en condiciones de conocer los factores que limitan el rendimiento. En principio es posible determinar cuáles son los factores que limitan la producción de un sistema productivo. Estos factores pueden ser intrínsecos de las especies que constituyen el cultivo, o del ambiente en lo que se refiere a clima, suelo y parásitos o predadores, sean éstos virus, bacterias, hongos, insectos o plantas y animales superiores. Si bien existen diversas plantas, herbívoros y patógenos que conviven con los cultivos, estos organismos se considera malezas, plagas o enfermedades, respectivamente, cuando su interferencia con el cultivo y provoca una merma en el rendimiento o en la calidad comercial del producto final. La importancia económica de las adversidades en la producción de cultivos, puede analizarse a partir de la estimación directa de las pérdidas que ocasionan en el rendimiento, o también indirectamente a partir del uso de agroquímicos destinados a su control. Las pérdidas varían tanto por las condiciones particulares del ambiente biótico y abiótico, como por las medidas de control implementadas. Una merma poco considerada, pero no menos importante, es la que resulta del incremento de costos debidos a la reducción en la calidad del ambiente, provocada por la contaminación del medio con agroquímicos. Descartando por el momento los parásitos y predadores, lo habitual es que en todo ecosistema natural o agrícola los factores limitativos del producto primario sean la luz, el agua, el CO₂, la temperatura y los nutrientes. Esto se pone de manifiesto en su máxima expresión en los cultivos hidropónicos, en particular cuando se refiere a luz, agua y nutrientes. Un capítulo aparte amerita las condiciones de temperatura ambiente. Las deficiencias debidas a la escasez de luz son medibles con equipamiento relativamente simple y al alcance del productor. La deficiencia de nutrientes puede determinarse ya sea por medios químicos de análisis o de una seria revisión de la composición de la solución nutritiva utilizada o también el profesional puede inferir alguna deficiencia en particular, por su experiencia. Aunque ante algunos síntomas específicos, lo que se sugiere es revisar y reformular la solución nutritiva y su manejo. Las limitaciones por agua pueden observarse porque las plantas se encuentran en un estado de marchitez temporaria bien manifiesta y las causas seguramente deben atribuirse al manejo que se realiza del sistema de provisión del riego, ya sea manual o automatizado, en consecuencia, debemos revisar al sistema de aporte de solución al cultivo. Tal como queda planteado, en los cultivos hidropónicos, la solución de estas deficiencias (agua y nutrientes), son rápidas si el operador las detecta a tiempo. Las diversas especies varían en cuanto a su necesidad de agua para crecer y desarrollar, así como en lo que respecta a su capacidad de utilizarla con relación a la producción. Las limitaciones por nutrientes son muy generales y se agudizan a medida que

se intensifica la explotación de los sistemas. Un factor limitativo (biótico o abiótico) no implica que la producción esté determinada en relación directa y regida con dicho factor. En realidad, los factores pueden actuar tanto por deficiencia como por exceso. Cuando un factor en deficiencia se incorpora, se produce un aumento en la velocidad del metabolismo hasta que el sistema entra nuevamente en estado "cuasi estable", en el cual puede actuar otro factor como limitativo, sea del medio o de las estructuras mismas del sistema. Por estas razones, la producción suele reaccionar positivamente al suministro de agua, o bien con el suministro de nutrientes. Sin considerar el concepto de rendimiento máximo, lo indicado es determinar el factor limitativo para poder aumentar el rendimiento. En general el juego de los máximos o mínimos de estos factores, agua y nutrientes, responde a la Ley del mínimo de Liebig.

Conclusiones y perspectivas.

Es importante señalar que los fitomejoradores en los últimos 60 años han realizado una tarea notable en el mejoramiento de las especies. En este sentido no sólo se han obtenido cultivares, resistentes a condiciones adversas (plagas, enfermedades, sequía, estrés térmico, etc.), sino que han aumentado los rendimientos de manera significativa. Con respecto al rendimiento es necesario diferenciar el mismo en rendimiento actual, rendimiento máximo y rendimiento potencial. El rendimiento actual está representado por valores promedio, alcanzados con implementación de tecnología promedio para el sistema agropecuario analizado. El rendimiento máximo, en cambio, es aquel alcanzado con la incorporación de un paquete tecnológico de avanzada para el sistema agropecuario analizado, con fuertes subsidios energéticos, ya sea través de fertilización, riego, uso intensivo de agroquímicos, etc., empleando variedades con alto potencial de rendimiento que responden a esta tecnología pero poco tolerantes a los factores de estrés bióticos y abióticos. Con respecto al rendimiento potencial, éste es el alcanzado luego de ejercer un control de las variables ambientales que inciden en la producción y el rendimiento, hacia valores óptimos, como la luz (en intensidad y calidad), longitud del fotoperíodo, temperatura, humedad, concentración de CO_2 y O_2 , agua, nutrientes minerales, etc. En este aspecto se han obtenido, en experiencias en laboratorio llevadas a cabo por investigadores de la NASA (USA), rendimientos para trigo de $24 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, mientras que el máximo registro a campo en el mundo era de solo $12\text{-}14 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. El incremento de los rendimientos actuales fue debido, fundamentalmente, a la modificación y aumento del índice de cosecha. Con el avance de sistemas computarizados y el uso de modelos matemáticos de simulación se tiende en la actualidad a lograr avances tecnológicos en el incremento del rendimiento de los cultivos, mediante la creación de "ideotipos" de plantas con el objeto de optimizar su producción mediante modificaciones en la capacidad de absorción de luz, a través de modificaciones en la arquitectura del canopeo. También la ingeniería

genética y la biología molecular son herramientas tecnológicas pasibles de ser utilizadas en la optimización de procesos metabólicos que conduzcan a una mayor productividad y rendimiento. En los sistemas de cultivo intensivos, como los hidropónicos, el objetivo es lograr rendimiento que se aproximan al rendimiento potencial, del cultivo-cultivar utilizado. Se debe tener presente que en un cultivo hidropónico, muchas de las variables son controladas y modificadas por el operador, a fin de superar los estreses respectivos. En consecuencia, la resultante será la sumatoria de los aportes de energía en lo que hace a agua, luz, nutrientes, temperatura, etc.

En resumen, vistos todos los conceptos vertidos en este libro, podemos preguntarnos,

¿Quiénes pueden cultivar en hidroponia?

Cualquier persona interesada en cultivar sus propios vegetales (verduras, flores, césped, forrajes, etc) en forma limpia y sencilla. Ideal para jovenes o personas de edad avanzada. Los conocimientos necesarios son muy elementales y disponibles en este libro o en cualquier texto de biología. El cultivo en hidroponia es sencillo y puede llevarse a cabo en espacios reducidos. Es de gran utilidad tanto para aquellas personas que quieren iniciarse de forma comercial, experimental o simplemente como hobby. La solución nutritiva puede prepararse de acuerdo con las instrucciones aportadas en el capítulo respectivo. La solución nutritiva aporta todos los elementos necesarios para el óptimo crecimiento de cultivos en sistemas hidropónicos. El resto puede aportarlo el operador con su criterio y dedicación.

Bibliografía

- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. 2008. Fundamentos de Fisiología Vegetal. 651 pág. McGraw-Hill-Interamericana de España. 2da. Edición.
- Canovas, F.; Díaz, J.R. 1993. Cultivos Sin suelo. Curso Superior de Especialización. Ed. Instituto de Estudios Almerienses. Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. Almería.
- Canovas, F.; Magna, J.J.; Boukhalfa, A. Cultivos sin suelo. Hidroponía. En Técnicas de producción de frutas y hortalizas en los cultivos protegidos del Sureste español. Ed. Instituto de la Caja Rural de Almería. Almería.
- Cultivos sin suelo II. 1999. Dirección General de Investigación y Formación Agraria de la ExJunta de Andalucía. 2da edición actualizada.
- Durany Ulises, C. (1982). Hidroponia-Cultivo de plantas sin tierra. 4th de. Barcelona. Spain, Ed. Sintesis. S.A. (p. 106)
- Epstein, E. (1972). Mineral nutrition of plants; principles and perspectives. New York: Wiley.

- Golberg, A. D. (2008). El agua. De la molécula a la biósfera. 231 pág. Alberto Daniel Golberg y Alicia Graciela Kin 1ra ed. Santa Rosa: Base 1.
- Guzmán Díaz, G. A. (2004 mayo). "Hidroponía en casa: una actividad familiar". San José, C. R. MAG. 25 pp. [en línea]. Consultado el 20 de septiembre de 2014 en http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/Hidroponia.pdf
- Howard, M. Resh, P. (1997). Cultivos Hidropónicos. Nuevas técnicas de producción. Cuarta edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. Barcelona. Mexico.
- La Huerta Hidropónica Popular. Manual Técnico y Curso audiovisual. 2004. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 4ta edición ampliada y revisada.
- Montaldi, E.R.(1995). Principios de Fisiología Vegetal. 298 pág. Ediciones Sur.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2006). Plant physiology. 3ra.Ed 758 pág. Sinauer Associates, Inc. Publisher.

Los autores

José Beltrano

Ingeniero Agrónomo (1973) Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP)). Docente Universitario Autorizado Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación UNLP. Profesor de Fisiología Vegetal en las Facultades de Ciencias Agrarias, UNM del P, de Agronomía, Universidad Nacional del Centro, de Ciencias Naturales y Museo y en la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP. Profesor de posgrado en las Facultades de Ciencias Exactas y de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Profesor Visitante Facultad de Biología, Universidad de Barcelona, España, y en INRA Montpellier, Francia. Secretario Académico (1984) y Decano (1998) FCAyF UNLP. Prosecretario de Posgrado UNLP (2001) Profesor en cursos de Extensión “Como hacer crecer las plantas sin suelo” y Curso optativo para alumnos “Cultivo en hidroponía” FCAyF UNLP. Investigador Comisión de Investigaciones de la Provincia de Buenos Aires (CICBA).

Daniel O. Giménez

Ingeniero Agrónomo, docente en la Cátedra de Fisiología Vegetal desde 1973 Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP)). Profesor de Fisiología Vegetal en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (1979-1996) y Profesor Adjunto de Fisiología Vegetal en la de Ciencias Agrarias y Forestales (FCA y F) de la UNLP (desde 1994). Profesor de posgrado en las Facultades de Ciencias Exactas y en la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, de la UNLP. Profesor Titular de Fisiología Vegetal Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires desde 2006. Profesor en cursos de Extensión “Como hacer crecer las plantas sin suelo” y Curso optativo para alumnos “Cultivo en hidroponía” FCA y F, UNLP. Director del Departamento de Ciencias Biológicas FCA y F, UNLP desde 2002.

Marcela F. Ruscitti

Ingeniero Forestal Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Máster en Gestión y Planificación del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Universidad Politécnica de Madrid. Jefe Trabajos Prácticos Fisiología Vegetal, UNLP. Profesor Adjunto Fisiología Vegetal, UNNOBA. Profesor cursos de Extensión “Como hacer crecer las plantas sin suelo” y Curso

optativo “Cultivo en hidroponía” FCA y F, UNLP. Investigación: participación de micorrizas arbusculares, en situaciones de estrés.

Alejandra V. Carbone

Lic. en Botánica, Facultad de Ciencias Naturales y Museo UNLP. Master en Protección Vegetal UNLP. Jefe de Trabajos Prácticos. Curso de Fisiología Vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP. Investigación "Ecofisiología de Cultivos Protegidos". UNLP. Profesor cursos de Extensión “Como hacer crecer las plantas sin suelo” y Curso optativo “Cultivo en hidroponía” FCA y F, UNLP.

Ricardo Andreau

Ingeniero Agrónomo UNLP. Especialista en Horticultura Universidad de Pisa, Italia. Especialista en Riego, Horticultura y Cultivos hidropónicos. Profesor Adjunto Riego y Drenaje UNLP. Profesor Titular Sistemas de Producción Hortícola UNAJ. Profesor cursos de Extensión “Como hacer crecer las plantas sin suelo” y Curso optativo “Cultivo en hidroponía” FCA y F, UNLP. Director del Proyecto “Injerto de tomate en cultivo protegido” UNLP.

Araceli L. Vasicek

Lic. en Zoología Universidad Nacional de La Plata. Especialista en Ingeniería Ambiental Universidad Tecnológica Nacional. Entomología Agrícola. Profesora de Zoología Agrícola FCAyF. Profesor cursos de Extensión “Como hacer crecer las plantas sin suelo” y Curso optativo “Cultivo en hidroponía” FCA y F, UNLP. Investigadora en Sanidad Vegetal, UNLP.

Blanca L. Ronco

Ingeniera Agrónomo Facultad de Agronomía UNLP. Carrera Docente en la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación UNLP. Profesor Adjunto, Dpto. Curso de Fitopatología, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP. Docente en el Magister Scientiae en Protección Vegetal FCA y F UNLP. Docente Curso “Cultivo en hidroponia” y “Como hacer crecer las plantas sin suelo” FCA y F UNLP.

Susana B. Martínez

Ingeniero Agrónomo Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales UNLP. Profesora Adjunta Climatología y Fenología Agrícola UNLP Y Profesora Titular en UNNOBA. Docente Curso “Cultivo en hidroponia” y “Como hacer crecer las plantas sin suelo” FCA y F UNLP. Directora Proyecto 11 A/269 UNLP

Mariana Garbi

Ingeniero Agronomo Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales UNLP. Doctora UNLu. Jefe de Trabajos Prácticos de Climatología y Fenología Agrícola.Co-Directora Proyecto 11 A/269 UNLP Ecofisiología de los Cultivos protegidos.

Cultivo en hidroponía / José Beltrano ... [et al.] ; coordinación general de José Beltrano ; Daniel Giménez. - 1a ed. adaptada. - La Plata : Universidad Nacional de La Plata, 2015.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-950-34-1258-9

1. Plantas. I. Beltrano, José II. Beltrano, José, coord. III. Giménez, Daniel , coord.
CDD 580

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata
47 N.º 380 / La Plata B1900AJP / Buenos Aires, Argentina
+54 221 427 3992 / 427 4898
edulp.editorial@gmail.com
www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2015
ISBN 978-950-34-1258-9
© 2015 - Edulp

n
naturales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA