

Deliverable A.2-2 :

“DEFINITION OF NUTRIENTS SOLUTION FOR SOILLESS HORTICULTURE PRODUCTION”

Action	A.2	Definition of nutrients solution for soilless horticulture production
Dissemination level¹	CO	
Nature²	R	
Due delivery date	10/2015	
Actual delivery date	06/2016	
Number of pages	47	

Lead beneficiary	CEBAS-CSIC
Contributing beneficiaries	CEBAS-CSIC

Document Version	Date	Author(s)	Comments
1	April, 2016	Francisco Rubio Muñoz, Francisco Garcia Sanchez	

Acknowledgement:

This deliverable was produced under the co-finance of the European financial instrument for the Environment (LIFE) programme during the implementation of the project “LIFE DRAINUSE” (LIFE14 ENV/ES/000538).

¹ Dissemination level: **PU** = Public, **PP** = Restricted to other programme participants, **RE** = Restricted to a group specified by the consortium, **CO** = Confidential, only for members of the consortium.

² Nature of the deliverable: **R** = Report, **P** = Prototype, **D** = Demonstrator, **O** = Other.

Indice

1	Los nutrientes minerales son necesarios para el crecimiento de las plantas	5
1.1	Elementos esenciales	5
1.2	Soluciones nutritivas	12
2	Sistemas de cultivos sin suelo	19
2.1	Necesidad de utilizar sistemas de cultivo sin suelo.....	19
2.2	Cultivos en sustrato	21
2.3	Cultivos a raíz desnuda	25
3	Necesidades de agua y fertirrigación.....	28
3.1	Necesidades de agua.....	28
3.2	Optimización de la fertirrigación.	29
3.3	Calidad de aguas de riego.....	30
4	Conclusiones	44
5	Bibliografía.....	46

Lista de Tablas y Figuras

Tabla 1. Clasificación de todos los elementos necesarios (...)	5
Tabla 2. Clasificación en grupos de acuerdo con su función en la planta.	6
Tabla 3 Elementos minerales clasificados en función de su movilidad (...)	7
Tabla 4. Rango de concentración de los elementos esenciales en (...)	13
Tabla 5. Solución nutritiva Hoagland modificada.	14
Tabla 6. Fertilizantes comúnmente usados en cultivos sin suelo	15
Tabla 7. Composición de algunas disoluciones estándar.	16
Tabla 8 Algunas soluciones nutritivas mencionadas.	16
Tabla 9 Ciclos de cultivo de los principales cultivos hortícolas (...)	28
Tabla 10. Uso eficiente del agua (WUE) en tomate cultivados en diferentes medios.	29
Tabla 11 Calidad de agua de diferentes zonas de la región de Murcia (España)	32
Tabla 12 Cálculo del pHc.	33
Tabla 13 Concentraciones relativas de solutos en el agua (...)	38
Figura 1. Tipos de sustrato utilizados en sistemas de cultivo sin suelo.	22
Figura 2. Detalle de sustratos orgánicos (turba, corteza de madera y fibra de coco).	23
Figura 3. Detalle de sustratos inorgánicos (perlita, lana de roca, arena y sepiolita).	24
Figura 4. Detalle de sistemas de raíz desnuda (NGS, NFT y Raíz Flotante).	26

Deliverable abstract

This deliverable is a small review on plant nutrition on soilless culture. Begins describing the essential nutrients for the plants, commenting its function in the plant, and some symptoms that appear in plant leaves under deficiency or toxicity. It is described the evolution of the nutrients solutions during the last 100 years, presenting the most common nutrients solutions used today. It is shown the advantages of soilless culture, describing the different types of culture system and some of the substrates more used. In the last chapter is discussed the importance of fertirrigation and crop water requirements crop, mentioning the problem of salinity and the water quality for irrigation.

1 Los nutrientes minerales son necesarios para el crecimiento de las plantas

1.1 Elementos esenciales

Un elemento esencial para una planta se define como un elemento cuya ausencia impide completar su ciclo de vida (Arnon y Stout 1939) o el que tiene un papel fisiológico claro (Epstein 1999). Si las plantas se dan estos elementos esenciales, así como de energía de la luz solar, sintetizan todos los compuestos necesarios para un crecimiento normal. Tabla 5.1 enumera los elementos que se consideran esenciales para la mayoría, si no todas, las plantas superiores. Los tres primeros elementos: hidrógeno, carbono y oxígeno, no se consideran nutrientes minerales ya que se obtienen principalmente de agua o dióxido de carbono. Elementos minerales esenciales se clasifican generalmente como macronutrientes o micronutrientes, según su concentración relativa en el tejido vegetal.

Tabla 1. Clasificación de todos los elementos necesarios para las plantas y su concentración adecuada en el tejido.

Element	Chemical symbol	Concentration in dry matter (% or ppm) ^a	Relative number of atoms with respect to molybdenum
Obtained from water or carbon dioxide			
Hydrogen	H	6	60,000,000
Carbon	C	45	40,000,000
Oxygen	O	45	30,000,000
Obtained from the soil			
Macronutrients			
Nitrogen	N	1.5	1,000,000
Potassium	K	1.0	250,000
Calcium	Ca	0.5	125,000
Magnesium	Mg	0.2	80,000
Phosphorus	P	0.2	60,000
Sulfur	S	0.1	30,000
Silicon	Si	0.1	30,000
Micronutrients			
Chlorine	Cl	100	3,000
Iron	Fe	100	2,000
Boron	B	20	2,000
Manganese	Mn	50	1,000
Sodium	Na	10	400
Zinc	Zn	20	300
Copper	Cu	6	100
Nickel	Ni	0.1	2
Molybdenum	Mo	0.1	1

En la tabla 4.2 se muestra una clasificación en la que los nutrientes para las plantas se han dividido en cuatro grupos básicos:

1. El primer grupo de elementos esenciales forma los compuestos orgánicos (carbono) de la planta. Plantas de asimilan estos nutrientes a través de reacciones bioquímicas que involucran oxidación y reducción.

2. El segundo grupo es importante en reacciones de almacenamiento de energía o en mantener la integridad estructural. Elementos de este grupo a menudo están presentes en los tejidos vegetales como fosfato, borato y silicato ésteres en los que el grupo elemental se une al grupo hidroxilo de una molécula orgánica (es decir, azúcar-fosfato).
3. El tercer grupo está presente en el tejido vegetal como iones libres o iones a sustancias como los ácidos pécticos presentes en la pared de célula de la planta. De especial importancia son sus papeles como cofactores de la enzima y en la regulación de potenciales osmóticos.
4. El cuarto grupo tiene papeles importantes en las reacciones que implican a transferencia de electrones.

Tabla 2. Clasificación en grupos de acuerdo con su función en la planta.

Mineral nutrient	Functions
Group 1	Nutrients that are part of carbon compounds
N	Constituent of amino acids, amides, proteins, nucleic acids, nucleotides, coenzymes, hexoamines, etc.
S	Component of cysteine, cystine, methionine, and proteins. Constituent of lipoic acid, coenzyme A, thiamine pyrophosphate, glutathione, biotin, adenosine-5'-phosphosulfate, and 3-phosphoadenosine.
Group 2	Nutrients that are important in energy storage or structural integrity
P	Component of sugar phosphates, nucleic acids, nucleotides, coenzymes, phospholipids, phytic acid, etc. Has a key role in reactions that involve ATP.
Si	Deposited as amorphous silica in cell walls. Contributes to cell wall mechanical properties, including rigidity and elasticity.
B	Complexes with mannitol, mannan, polymannuronic acid, and other constituents of cell walls. Involved in cell elongation and nucleic acid metabolism.
Group 3	Nutrients that remain in ionic form
K	Required as a cofactor for more than 40 enzymes. Principal cation in establishing cell turgor and maintaining cell electroneutrality.
Ca	Constituent of the middle lamella of cell walls. Required as a cofactor by some enzymes involved in the hydrolysis of ATP and phospholipids. Acts as a second messenger in metabolic regulation.
Mg	Required by many enzymes involved in phosphate transfer. Constituent of the chlorophyll molecule.
Cl	Required for the photosynthetic reactions involved in O ₂ evolution.
Mn	Required for activity of some dehydrogenases, decarboxylases, kinases, oxidases, and peroxidases. Involved with other cation-activated enzymes and photosynthetic O ₂ evolution.
Na	Involved with the regeneration of phosphoenolpyruvate in C ₄ and CAM plants. Substitutes for potassium in some functions.
Group 4	Nutrients that are involved in redox reactions
Fe	Constituent of cytochromes and nonheme iron proteins involved in photosynthesis, N ₂ fixation, and respiration.
Zn	Constituent of alcohol dehydrogenase, glutamic dehydrogenase, carbonic anhydrase, etc.
Cu	Component of ascorbic acid oxidase, tyrosinase, monoamine oxidase, uricase, cytochrome oxidase, phenolase, laccase, and plastocyanin.
Ni	Constituent of urease. In N ₂ -fixing bacteria, constituent of hydrogenases.
Mo	Constituent of nitrogenase, nitrate reductase, and xanthine dehydrogenase.

Source: After Evans and Sorger 1966 and Mengel and Kirkby 1987.

Tabla 3 Elementos minerales clasificados en función de su movilidad en el interior de la planta.

Mobile	Immobile
Nitrogen	Calcium
Potassium	Sulfur
Magnesium	Iron
Phosphorus	Boron
Chlorine	Copper
Sodium	
Zinc	
Molybdenum	

1.1.1 Nitrógeno (N)

El nitrógeno es el elemento mineral que las plantas requieren en mayores cantidades. Sirve como un constituyente de muchos componentes de la célula de planta, incluyendo aminoácidos y ácidos nucleicos. Por lo tanto, la deficiencia de nitrógeno rápidamente inhibe el crecimiento de la planta. Si dicha deficiencia persiste, mayoría de las especies muestra clorosis (amarillamiento de las hojas), especialmente en las hojas más viejas cerca de la base de la planta. Bajo deficiencia de nitrógeno grave, estas hojas se vuelven completamente amarillo (o tan) y caen fuera de la planta. Hojas jóvenes no pueden mostrar estos síntomas inicialmente porque el nitrógeno puede ser movilizado de las hojas más viejas. Así una planta de deficiencia de nitrógeno puede tener luz verde hojas superiores y amarillo o marrón hojas inferiores.

1.1.2 Fósforo (P)

El fósforo es con frecuencia un nutriente limitante, particularmente en las regiones tropicales, donde la química del suelo difiere de suelos templados, o en suelos altamente erosionados, donde fósforo ha lixiviado desde hace mucho tiempo lejos. El fósforo es uno de los tres elementos principales en los abonos de césped comerciales, aunque hay creciente evidencia que muchos céspedes y zonas verdes ya tienen suficiente fósforo, y así está siendo gradualmente de algunos fertilizantes comerciales. Fósforo está generalmente disponible como fosfato.

Fósforo juega el mismo papel de químico y bioquímico en plantas como en el resto de los organismos. Es el principal elemento implicado en la transferencia de energía para el metabolismo celular y es un componente estructural de las membranas celulares, los ácidos nucleicos y otros materiales críticos. Las plantas que carecen de suficiente fósforo se caracterizan con frecuencia por fenómenos que aparecen como respuestas de heridas en hojas, como la producción de compuestos pigmentados, dando como resultado el oscurecimiento o color púrpura de las hojas. Retraso en el crecimiento también puede ocurrir, así como lesiones necróticas y otros síntomas.

De fósforo (como fosfato, PO_4^{3-}) es un componente integral de importantes compuestos de células vegetales, incluyendo los intermedios de azúcar – fosfato de respiración y fotosíntesis, y los fosfolípidos que componen las membranas de la planta. Es también un componente de nucleótidos que se utiliza en el metabolismo de energía vegetal (como ATP) y en ADN y ARN. Síntomas característicos de la deficiencia de fósforo incluyen crecimiento atrofiado en las plantas jóvenes y una coloración verde oscura de las hojas, que puede ser incorrecto y contienen pequeñas manchas de tejido muerto llamado **manchas necróticas**. Como en la deficiencia de nitrógeno, algunas especies pueden producir exceso antocianinas, dando a las hojas una coloración ligeramente púrpura. En contraste con la deficiencia de nitrógeno, la

coloración púrpura de la deficiencia de fósforo no está asociada con la clorosis. De hecho, las hojas pueden ser un verdoso oscuro púrpura. Otros síntomas de deficiencia de fósforo incluyen la producción de tallos delgados (pero no leñosos) y la muerte de las hojas más viejas. Maduración de la planta también puede ser retrasado.

1.1.3 Potasio (K)

El potasio es un osmolito primario y un ion involucrado en la dinámica de la membrana de la célula de planta, incluyendo la regulación de los estomas y el mantenimiento de la turgencia y el equilibrio osmótico. También juega un papel importante en la activación y regulación de la actividad enzimática. Potasio es un catión intercambiable del suelo y es absorbido activamente por las raíces de plantas. Es un componente importante de muchos suelos y en última instancia se deriva de la meteorización de los materiales de padre del suelo como silicatos de aluminio de potasio en el suelo. Por las plantas y otros organismos con potasio libres iones en sus células, una vez que un organismo muere, su potasio mueve rápidamente la solución del suelo.

El primer síntoma observable de deficiencia de potasio es clorosis moteada o marginal, que luego se convierte en necrosis, sobre todo en las puntas de la hoja, los márgenes y entre las venas. En muchas monocotiledóneas, estas lesiones necróticas pueden inicialmente se forman en los ápices y márgenes y luego se extienden hacia la base de la hoja. Porque el potasio puede ser movilizado a las hojas más jóvenes, estos síntomas se presentan inicialmente en las hojas más maduras hacia la base de la planta. Las hojas también pueden rizar y arruga. Los tallos de las plantas deficientes en potasio pueden ser delgado y débil, con regiones internodales anormalmente cortas. En maíz deficiencia de potasio, las raíces pueden tener una mayor susceptibilidad a las pudriciones de raíz hongos presentes en el suelo, y esta susceptibilidad, junto con efectos sobre la madre, resulta en una tendencia creciente de la planta doblar fácilmente hasta el suelo.

1.1.4 Azufre (S)

Azufre es otro elemento biológicamente ubicuo, jugando roles estructurales críticos en varios aminoácidos y compuestos involucrados en las transferencias de electrones en la fotosíntesis y la respiración. El sulfuro es también un componente estructural de enzimas especializadas y moléculas relacionadas. Carecer de suficiente azufre a menudo las plantas presentan síntomas como clorosis y crecimiento atrofiado o delgado. A diferencia de las plantas deficientes en nitrógeno o potasio, las plantas deficientes en azufre generalmente primero muestran signos de deficiencia en los tejidos más jóvenes, en vías de desarrollo porque el azufre no se transloca fácilmente dentro de la planta. Azufre se encuentra en dos aminoácidos y es un componente de varias coenzimas y vitaminas esenciales para el metabolismo. Muchos de los síntomas de deficiencia de azufre son similares a los de deficiencia de nitrógeno, como clorosis, retraso del crecimiento y la acumulación de antocianina. Esta semejanza no es sorprendente, ya que el azufre y el nitrógeno son dos componentes de las proteínas.

1.1.5 Calcio (Ca)

El calcio es un catión divalente que juega un papel importante en la estructura de la pared celular, membrana celular relaciones y transducción de la señal en la planta. La mayoría de estas funciones son esencialmente extracelular, que ocurre en las paredes celulares, en lugar de dentro de la membrana celular, aunque el papel del calcio en la integridad de la membrana de la célula se extiende a las membranas intracelulares así.

Los iones calcio (Ca^{2+}) se utilizan en la síntesis de nuevas membranas celulares, particularmente las laminillas medias que separan recién divididas las células. Calcio también se utiliza en el huso mitótico durante la división celular. Es necesario para el funcionamiento normal de las membranas de la planta y se ha implicado como un segundo mensajero para varias respuestas de plantas a señales ambientales y hormonales. En su función como un segundo mensajero, el calcio puede obligar a **calmodulina**, una proteína que se encuentra en el citosol de las células vegetales. El complejo calcio-calmodulina regula muchos procesos metabólicos. Los síntomas característicos de deficiencia de calcio incluyen necrosis de jóvenes meristemáticas regiones, como las puntas de las hojas de las raíces o jóvenes, donde la división celular y formación de la pared son más rápidos. Necrosis en las plantas de crecimiento lento puede ser precedida por una clorosis general y hojas de enlace descendente de los jóvenes. Hojas jóvenes pueden también aparecer deformados. Sistema radicular de una planta de deficiencia de calcio puede aparecer marrón, corto y muy ramificado. Retraso del crecimiento severo se puede producir si las regiones meristemáticas de la planta mueren prematuramente.

1.1.6 Magnesio (Mg)

El magnesio es otro catión divalente pero, a diferencia del calcio, sus funciones son funciones más íntimamente relacionados con intracelular que el papel predominante extracelular de calcio. El magnesio es más mineral de importación en la activación de enzimas. El magnesio también es el elemento estructural central de la clorofila y participa en la síntesis de ácidos nucleicos. La solubilidad del magnesio disminuye con el aumento de acidez y pH alto (alcalino), así. En el caso de pH bajo, deficiencia de magnesio se producirá probablemente en conjunto con metal toxicidad, debido a la mayor solubilidad de los metales a pH bajo. Como magnesio juega un papel crítico en muchos aspectos de la bioquímica de la célula vegetal, no existe ningún patrón único de síntomas de deficiencia de magnesio. Puesto que el magnesio es un componente necesario de la clorofila, las plantas que tienen suficiente magnesio a menudo muestran clorosis. Los síntomas de la deficiencia de magnesio tienden a un campo primero en los tejidos más maduros porque el magnesio es translocatable dentro de la planta. Un síntoma característico de la deficiencia de magnesio es clorosis entre las venas de la hoja, que ocurre primero en las hojas más viejas debido a la movilidad de este elemento. Este patrón de resultados clorosis porque la clorofila en los haces vasculares sigue siendo inafectada por períodos más largos que la clorofila en las células entre los paquetes hace. Si la deficiencia es extensa, las hojas pueden volverse amarillo o blanco. Un síntoma adicional de la deficiencia de magnesio puede ser abscisión prematura de hojas.

1.1.7 Hierro (Fe)

El hierro es un metal divalente o trivalente de pesado, dependiendo de las condiciones de reducción-oxidación en el suelo. Íntimamente se participa como un componente estructural de hemo y otras proteínas, juega un papel en la activación de algunas enzimas y participa en la síntesis de clorofila.

Las plantas superaran las limitaciones de la absorción de hierro por bajar el pH del suelo y aumento de la solubilidad del hierro y la producción de compuestos de hierro-barrido especializados llamados sideróforos. Sideróforos se mueven en el suelo, se unen con el hierro disponible, y luego son reabsorbidos por la planta. Una vez dentro de la planta, el pseudobactina es despojado de la plancha y luego enviado de vuelta a la tierra para garantizar más hierro.

Plantas deficientes en hierro muestran clorosis entre las nervaduras, primero apareciendo en los tejidos más jóvenes, porque el hierro no se desplaza fácilmente en el cuerpo de la planta. En la deficiencia extrema, incluso el tejido alrededor de las venas se vuelve clorótico, y la hoja entera puede ser amarillo pálido o blanco.

1.1.8 Sodio (Na)

El sodio es un micronutriente para las plantas que se someten a fotosíntesis C4 o CAM, en lugar de fotosíntesis C3. C4 es una forma especializada de la fotosíntesis que es más eficiente en tiempo caliente, seco. CAM es una forma especializada de la fotosíntesis que reduce pérdida de agua por transpiración, típica de cactus y otras plantas del desierto. C3 es el tipo más común de fotosíntesis, típico de plantas, como árboles de arce y la soja. También puede sustituir el sodio de potasio a un grado variable, dependiendo de las especies de plantas (por lo general, las especies que son sal tolerante pueden soportar una mayor tasa de sustitución). Como catión monovalente, es parte del complejo de intercambio catiónico y por lo tanto está disponible en la solución del suelo. Sodio en alta concentración en el suelo puede alterar el potencial de agua de la solución del suelo en comparación con las raíces y así limitar el flujo de agua hacia la planta.

1.1.9 Cloro (Cl)

Cloro elemento se encuentra en plantas como el ion cloruro (Cl^-). El cloro es necesario para dividir el agua en la fotosíntesis, el paso que genera el gas de oxígeno respirado por los animales. Además, cloro puede ser requerido para la división celular en hojas y raíces. El cloro es un anión monovalente en gran parte en suelo derivado de sales en el material de suelo de los padres. Es muy móvil y se lixivia fácilmente, pero sin embargo está disponible en grandes cantidades, y así la deficiencia de cloro es prácticamente desconocida. En casos extremos, las plantas se marchitan o convertirse en severamente atrofiado, además de tener importante clorosis y necrosis. Plantas deficientes en cloro desarrollan marchitamiento de las puntas de la hoja seguidas de necrosis y clorosis de la hoja general. Las hojas también pueden presentar reducción del crecimiento. Finalmente, las hojas pueden tomar un color dorada-amarillenta ("bronceado"). Raíces de plantas deficientes de cloro pueden aparecer atrofiado y engrosadas cerca de las puntas de la raíz. Iones de cloruro son muy solubles y disponibles en los suelos porque mar es barrido por el viento en el aire y se entrega al suelo cuando llueve. Por lo tanto, la deficiencia de cloro es desconocida en plantas crecidas en hábitats nativos o agrícolas. La mayoría de las plantas generalmente absorbe cloro a niveles mucho más altos que los requeridos para el funcionamiento normal.

1.1.10 Boro (B)

Boro es un elemento neutro micronutrientes, generalmente presente en la solución del suelo como ácido bórico. Las funciones precisas del boro en la planta son desconocidas. Se sugiere tener un papel en la síntesis de ácidos nucleicos y la función de membrana general, así como en la integridad estructural de la pared celular. Plantas deficientes en boro muestran fragilidad general del órgano y los meristemas apical a menudo mueren. Las raíces también pueden morir o quebradizo. Este daño a menudo conduce a infección por organismos patógenos, que tienen poca dificultad colonizando la planta ya debilitada. Dominancia apical puede también perderse, causando la planta a ser altamente ramificados; sin embargo, los ápices terminales de las ramas pronto se convertirán en necróticos debido a inhibición de la división celular. Estructuras tales como las frutas, raíces carnosas y los tubérculos pueden presentar necrosis o anomalías relacionadas con la descomposición de la interna tejidos

1.1.11 Manganeso (Mn)

El manganeso es un metal pesado de micronutrientes, las funciones de que zona bastante conocida. Participa en el paso de evolución de oxígeno de la fotosíntesis y función de membrana, así como servir como un importante activador de numerosas enzimas en la célula, una función también puede compartir con magnesio en algunos casos. En particular,

decarboxilasas y deshidrogenasas implicadas en el ciclo del ácido tricarbóxico (Krebs) están activados específicamente por el manganeso. La mejor función definida de manganeso es la reacción fotosintética a través de que el oxígeno se produce agua. Los síntomas de deficiencia de manganeso en gran parte dependen de la especie de planta en que se produzca la deficiencia. En general, las plantas deficientes en manganeso forman lesiones cloróticas y necróticas en las hojas, frutos o semillas. La distribución de los síntomas, ya sea en los tejidos más jóvenes o mayores, depende de la planta en cuestión

1.1.12 Zinc (Zn)

Zinc es otro micronutriente metal pesado que juega un papel crítico en muchas enzimas, que a menudo aparecen en el sitio activo de la enzima o en una posición que regula la estructura de la enzima. Falta de zinc resulta en la incapacidad de la planta para hacer suficientes cantidades de estas proteínas, y así se limitan la extensión y crecimiento general. Zinc también puede participar en la síntesis de clorofila en algunas especies y en la síntesis de proteínas de ADN. Los efectos de la deficiencia de zinc son conocidos y dramático. Específicamente, las plantas deficientes en zinc a menudo mostrar síntomas conocidos como poco crecimiento de hoja o roseta. En el caso de hoja pequeña, las hojas no se ampliar a su tamaño normal, maduro. Plantas de roseta son aquellos en que la elongación del tallo está prácticamente eliminada, para que las hojas parecen crecer desde el mismo lugar en la base del tallo. La deficiencia de zinc también puede resultar en formas de crecimiento atrofiado. Estos síntomas pueden resultar de la pérdida de la capacidad para producir cantidades suficientes de auxina, ácido indolacético. En algunas especies (maíz, sorgo, frijoles), las hojas más viejas pueden salir internervaciones cloróticas y luego desarrollan manchas necróticas blancas. Esta clorosis puede ser una expresión de la necesidad de zinc para la biosíntesis de la clorofila.

1.1.13 Cobre (Cu)

El cobre es un micronutriente que está implicado pesadamente en las transferencias de electrones en reacciones de intercambio de energía dentro de la célula, debido a sus Estados de oxidación variables. Es un componente o un activador de algunas enzimas. El cobre es un metal pesado que se encuentra en el suelo en asociación con varias otras moléculas. Un ejemplo de dicha enzima es la plastocianina, que participa en la transferencia de electrones durante las reacciones de luz de la fotosíntesis. Cuando se encuentra en el cuerpo de la planta, por lo general está limitado a moléculas especiales dentro de la planta para limitar o evitar los efectos tóxicos que pueden surgir de las altas concentraciones. Plantas deficientes en cobre a menudo muestran síntomas de clorosis u hoja del balanceo, aunque hay variabilidad de especies relacionadas. Especies leñosas tienen a veces la corteza que es ampollas, y brotes jóvenes pueden experimentar la muerte. Manchas necróticas aparecen primeras en las puntas de las hojas jóvenes y luego se extienden hacia la base a lo largo de los márgenes de la hoja. Las hojas también pueden ser torcidos o mal formados. En extrema deficiencia de cobre, hojas pueden caerse prematuramente.

1.1.14 Molibdeno (Mo)

Molibdeno es un micronutriente para plantas que forman nódulos radiculares con la fijación de nitrógeno las bacterias, aunque las plantas que no forman nódulos también utilizan trazas de él en una proteína con la absorción y el metabolismo del nitrógeno. Sin embargo, en el caso de especies – formación de nódulo de la raíz, el molibdeno juega un papel estructural en la nitrogenasa enzima fijadora de nitrógeno. Los síntomas de deficiencia de molibdeno en las plantas que no forman nódulos radiculares incluyen necrosis, balanceo de la hoja y a veces clorosis entre las nervaduras. En las plantas que forman nódulos radiculares, resultados de

deficiencia de molibdeno en una pérdida de productivo la fijación de nitrógeno, debido a las bacterias necesitan para el elemento.

1.2 Soluciones nutritivas

El estudio de la hidroponía data desde hace 382 a. C. pero la primera información escrita es de 1600, cuando el belga Jan van Helmont documentó su experiencia acerca de que las plantas obtienen sustancias nutritivas a partir del agua. El primer trabajo publicado sobre crecimiento de plantas terrestres sin suelo fue, *Sylva Sylvarum* (1627) de Francis Bacon. Después de eso, la técnica del agua se popularizó en la investigación. En 1699, John Woodward cultivó plantas en agua y encontró que el crecimiento de ellas era el resultado de ciertas sustancias en el agua obtenidas del suelo, esto al observar que las plantas crecían peor en agua destilada que en fuentes de agua no tan purificadas. Con ello publicó sus experimentos de esta técnica con la menta verde. En 1804, De Saussure expuso el principio de que las plantas están compuestas por elementos químicos obtenidos del agua, suelo y aire. Los primeros en perfeccionar las soluciones nutrientes minerales para el cultivo sin suelo fueron los botánicos alemanes Julius von Sachs y Wilhelm Knop en la década de 1860. El crecimiento de plantas terrestres sin suelo en soluciones minerales (solución nutritiva) se convirtió rápidamente en una técnica estándar de la investigación y de la enseñanza y sigue siendo ampliamente utilizada. Esta técnica ahora se considera un tipo de hidroponía donde no hay medio inerte. Las plantas absorben muchos elementos a través de sus raíces: se han encontrado más de 50 elementos en varias plantas. Sin embargo, no todos se consideran elementos esenciales. Los nutrientes esenciales requeridos por las plantas verdes son exclusivamente inorgánicos. Veinte elementos se cree que son esenciales para el crecimiento de la mayoría de las plantas, y generalmente se clasifican como macronutrientes y micronutrientes como se ha visto en el apartado anterior.

Con los años, se han utilizado muchas formulaciones de soluciones nutritivas. Las primeras formulaciones desarrolladas por Knop en Alemania incluyeron sólo KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, KH_2PO_4 , MgSO_4 y una sal de hierro. En aquel momento se creía que esta solución nutritiva que contenía todos los minerales requeridos por la planta, pero estos experimentos se llevaron a cabo con los productos químicos P (fósforo), K (potasio) y S (azufre), que fueron contaminados con otros elementos que ahora son conocidos por ser esenciales (como boro o molibdeno). mientras que los elementos requeridos en cantidades muy pequeñas, tales como Ni (níquel) y Mo (molibdeno), son necesarios solamente para una o muy pocas enzimas. Los macroelementos esenciales primero fueron reconocidos en el siglo XIX por De Saussure y Boussingault, que demostró por análisis químico que las plantas contienen C, H, O y N. El cultivo hidropónico ha servido como la principal herramienta en la investigación de nutrición de las plantas. Los primeros estudios de Sachs y Knop durante el siglo XIX en Alemania; identificaron N, P, S, K, Ca, Mg y Fe como elementos esenciales. La mayoría de los microelementos esenciales fueron reconocidos en el siglo XX, desde 1930 y más adelante, gracias al desarrollo de más productos químicos altamente purificados y de métodos más sensibles para el análisis de las concentraciones traza. El rango de concentraciones de los elementos esenciales en los tejidos vegetales y las cantidades anuales necesarias para rendimientos máximos se dan en la tabla 4.4.

Tabla 4. Rango de concentración de los elementos esenciales en la solución nutritiva y en el tejido vegetal, así como el consumo anual.

Element	Chemical symbol	Form available to plants	Nutrient solution	Plant tissues	Annual consumption
<i>Macroelements</i>			mg L ⁻¹	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹ y ⁻¹
Calcium	Ca	Ca ⁺²	40–200	2.0–9.4	10–200
Magnesium	Mg	Mg ⁺²	10–50	1.0–2.1	4–50
Nitrogen	N	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	50–200	10–56	50–300
Phosphorus	P	HPO ₄ ⁻² , H ₂ PO ₄ ⁻	5–50	1.2–5.0	5–50
Potassium	K	K ⁺	50–200	14–64	40–250
Sulfur	S	SO ₄ ⁻²	5–50	2.8–9.3	6–50
<i>Micronutrients</i>			mg L ⁻¹	μg g ⁻¹	g ha ⁻¹ y ⁻¹
Boron	B	H ₃ BO ₃ , HBO ₃ ⁻	0.1–0.3	1.0–35	50–250
Copper	Cu	Cu ⁺ , Cu ⁺²	0.001–0.01	2.3–7.0	33–230
Iron	Fe	Fe ⁺³ , Fe ⁺²	0.5–3	53–550	100–4000
Manganese	Mn	Mn ⁺²	0.1–1.0	50–250	100–2000
Molybdenum	Mo	MoO ₄ ⁻²	0.01–0.1	1.0–2.0	15–30
Zinc	Zn	Zn ⁺²	0.01–0.1	10–100	50–500

Excepto el carbono y el oxígeno, que son absorbidos principalmente desde el aire, los nutrientes esenciales son tomados por las raíces. Carbono es tomado también por las raíces, en forma de HCO₃⁻ y oxígeno, como O₂ gaseoso y con hidrógeno en las moléculas de agua. Hidrógeno también es tomado como el ion H⁺. En este capítulo, siguiendo la práctica de la horticultura comercial, definiremos como nutrientes aquellos elementos que son tomados principalmente por las raíces. La mayoría de estos nutrientes se toma como cationes o aniones, a excepción del boro, que es absorbido como ácido bórico o como el ión borato, dependiendo del pH. Así, soluciones nutritivas se componen de bases, ácidos y sales minerales. El nitrógeno es un nutriente único que puede ser absorbido como catión o anión, NH₄⁺ y NO₃⁻, respectivamente. Esta característica de nitrógeno influye en la nutrición de las plantas en general y tiene un fuerte impacto en la fertilización en cultivos hidropónicos.

En 1909, E.A. Mitscherlich desarrolló una ecuación que relaciona el crecimiento con el suministro de nutrientes para las plantas. Observó que cuando las plantas fueron suministradas con cantidades adecuadas de nutrientes todos menos uno, su crecimiento era proporcional a la cantidad de este elemento limitante, que fue suministrado al suelo. El crecimiento de las plantas aumentaba más cuanto más de este elemento se suministraba, pero no en proporción directa a la cantidad añadida. Mitscherlich expresó esto matemáticamente como

$$DY/dx = (A-y) C \quad (1)$$

donde y es el rendimiento, x es la cantidad de nutrientes, A es el rendimiento potencial que se obtendría mediante el suministro de todos los factores de crecimiento en sus cantidades óptimas y C es la constante de proporcionalidad depende del factor de crecimiento individual. Por integración se obtiene

$$y = A (1 - e^{-Cx}) \quad (2)$$

La tabla 4.5 muestra una formulación más moderna para una solución nutritiva. Esta formulación se llama una solución de Hoagland modificada, el nombre de Dennis R. Hoagland, un investigador que era prominente en el desarrollo de la investigación moderna nutrición mineral en los Estados Unidos.

Tabla 5. Solución nutritiva Hoagland modificada.

Compound	Molecular weight	Concentration of stock solution	Concentration of stock solution	Volume of stock solution per liter of final solution	Element	Final concentration of element	
	g mol ⁻¹	mM	g L ⁻¹	mL		µM	ppm
Macronutrients							
KNO ₃	101.10	1,000	101.10	6.0	N	16,000	224
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	236.16	1,000	236.16	4.0	K	6,000	235
NH ₄ H ₂ PO ₄	115.08	1,000	115.08	2.0	Ca	4,000	160
MgSO ₄ ·7H ₂ O	246.48	1,000	246.49	1.0	P	2,000	62
					S	1,000	32
					Mg	1,000	24
Micronutrients							
KCl	74.55	25	1.864	2.0	Cl	50	1.77
H ₃ BO ₃	61.83	12.5	0.773		B	25	0.27
MnSO ₄ ·H ₂ O	169.01	1.0	0.169		Mn	2.0	0.11
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	287.54	1.0	0.288		Zn	2.0	0.13
CuSO ₄ ·5H ₂ O	249.68	0.25	0.062		Cu	0.5	0.03
H ₂ MoO ₄ (85% MoO ₃)	161.97	0.25	0.040		Mo	0.5	0.05
NaFeDTPA (10% Fe)	468.20	64	30.0	0.3–1.0	Fe	16.1–53.7	1.00–3.00
Optional^a							
NiSO ₄ ·6H ₂ O	262.86	0.25	0.066	2.0	Ni	0.5	0.03
Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	284.20	1,000	284.20	1.0	Si	1,000	28

Los nutrientes minerales esenciales para el crecimiento de las plantas deben ser suministrados a través de la solución nutritiva, con la excepción de carbono, tomado desde el aire como CO₂. Para preparar soluciones nutritivas que contienen todos los nutrientes esenciales, fertilizantes inorgánicos se utilizan como fuentes de nutrientes, excepto de hierro, que se agrega en forma quelatada para mejorar su disponibilidad para las plantas. Fertilizantes más utilizados para preparar soluciones nutritivas en cultivos hidropónicos son sales inorgánicas altamente solubles, pero también se utilizan algunos ácidos inorgánicos. Una breve descripción de los fertilizantes solubles en agua utilizada en cultivos hidropónicos se da en la tabla 4.6.

Tabla 6. Fertilizantes comúnmente usados en cultivos sin suelo

Fertilizer	Chemical formula	Percentage in nutrient	Molecular weight (g)	Solubility (kg litre ⁻¹ , 0 °C)
Ammonium nitrate	NH ₄ NO ₃	N: 35	80.0	1.18
Calcium nitrate	5[Ca(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O] NH ₄ NO ₃	N: 15.5, Ca: 19	1 080.5	1.02
Potassium nitrate	KNO ₃	N: 13, K: 38	101.1	0.13
Magnesium nitrate	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	N: 11, Mg: 9	256.3	2.79 (20 °C)
Nitric acid	HNO ₃	N: 22	63.0	-
Monoammonium phosphate	NH ₄ H ₂ PO ₄	N: 12, P: 27	115.0	0.23
Monopotassium phosphate	KH ₂ PO ₄	P: 23, K: 28	136.1	1.67
Phosphoric acid	H ₃ PO ₄	P: 32	98.0	-
Potassium sulphate	K ₂ SO ₄	K: 45, S: 18	174.3	0.12
Magnesium sulphate	MgSO ₄ ·7H ₂ O	Mg: 9.7, S: 13	246.3	0.26
Potassium bicarbonate	KHCO ₃	K: 39	100.1	1.12
Iron chelates	various types	Fe: 6–13	-	-
Manganese sulphate	MnSO ₄ ·H ₂ O	Mn: 32	169.0	1.05
Zinc sulphate	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	Zn: 23	287.5	0.62
Copper sulphate	CuSO ₄ ·5H ₂ O	Cu: 25	249.7	0.32
Borax	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	B: 11	381.2	0.016
Boric acid	H ₃ BO ₃	B: 17.5	61.8	0.050
Sodium octaborate	Na ₂ B ₈ O ₁₃ ·4H ₂ O	B: 20.5	412.4	0.045
Ammonium heptamolybdate	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	Mo: 58	1 163.3	0.43
Sodium molybdate	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	Mo: 40	241.9	0.56

En cultivos hidropónicos comerciales, los fertilizantes necesarios para preparar una solución de nutrientes se mezclan con agua para formar soluciones madre concentradas, que luego automáticamente se mezclan con agua de riego y preparan la solución nutritiva específica para cada cultivo. Estos datos también son esenciales para comprobar y ajustar el estado nutricional en la zona radicular durante el período de cultivo. La composición de soluciones nutritivas y la optimización de la nutrición en hidroponía comercial han sido los principales objetivos de la investigación relacionadas con cultivos hidropónicos en las últimas décadas. El trabajo pionero sobre la composición de soluciones nutritivas fue llevado a cabo por científicos americanos antes de la segunda guerra mundial y dio lugar a la fórmula de Hoagland y Arnon (1950), ampliamente utilizada para fines de investigación aún hoy en día. Esta fórmula se presenta en la tabla 4.5

En la práctica comercial, no es fácil de implementar fórmulas de la solución nutritiva como las indicadas anteriormente. La primera dificultad surge de la composición mineral del agua de riego. En la mayoría de los casos, agua de riego contiene macronutrientes (Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻), micronutrientes (Mn²⁺, Zn²⁺, Cu²⁺, B y Cl⁻) y otros iones no nutritivos (HCO₃⁻, Na⁺) a sensiblemente altas concentraciones.

Cuando la concentración de un elemento de nutrientes en el agua de riego representa una fracción pequeña de la concentración objetivo en la solución nutritiva, el cultivador tiene que deducir la cantidad que ya está disponible en el agua de riego de la cantidad total requerida en la solución nutritiva. La concentración de bicarbonatos (HCO₃⁻) en el agua de riego también es muy importante ya que determina la cantidad de ácido requerida para ajuste del pH.

Además, la concentración de Na⁺ debe tenerse en cuenta, ya que determina la última CE de la solución nutritiva suministrada al cultivo. Sin embargo, puesto que las concentraciones

de estos nutrientes y no nutrientes iones son diferentes en el agua de riego utilizado por cada productor individual, la cantidad de fertilizante necesaria para preparar una solución nutritiva con una composición estándar difiere de productor a productor.

Tabla 7. Composición de algunas disoluciones estándar.

Macronutrient	H&A	S&S (cucumber)	S&S (tomato)	Micronutrient	H&A	S&S (cucumber)	S&S (tomato)
NO ₃ ⁻	14.0	16.00	17.00	Fe	25.00	15.00	10.00
H ₂ PO ₄ ⁻	1.0	1.25	1.50	Mn	9.10	10.00	10.00
SO ₄ ²⁻	2.0	1.375	2.50	Zn	0.75	5.00	4.00
K ⁺	6.0	8.00	8.00	Cu	0.30	0.75	0.75
NH ₄ ⁺	1.0	1.25	1.00	B	46.30	25.00	20.00
Ca ²⁺	4.0	4.00	5.25	Mo	0.10	0.50	0.50
Mg ²⁺	2.0	1.375	2.00				

Tabla 8 Algunas soluciones nutritivas mencionadas.

Sal	<i>g L⁻¹</i>	Referencia	
KNO ₃	1,00	Sachs (1860)	
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,50		
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,50		
CaSO ₄	0,50		
NaCl	0,25		
FeSO ₄	Traza		
Ca(NO ₃) ₂	0,8	Knop (1865)	
KNO ₃	0,2		
KH ₂ PO ₄	0,2		
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,2		
FePO ₄	0,1		
Macronutriente (<i>g L⁻¹</i>)		Arnon y Hoagland (1940)	
KNO ₃	1,02		
Ca(NO ₃) ₂	0,49		
NH ₄ H ₂ PO ₄	0,23		
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,49		
Micronutriente (<i>mg L⁻¹</i>)			
H ₃ BO ₃	2,86	0,6 ml L ⁻¹ añadidos 3 veces por semana	
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1,81		
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0,08		
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0,22		
H ₂ MoO ₄ ·H ₂ O	0,09		
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0,5%		
Ac. Tartárico	0,4%		
	<i>g L⁻¹</i>		Cooper (1996)
KH ₂ PO ₄	0,263		
KNO ₃	0,583		
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	1,003		
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,513		
EDTA Fe	0,079		
MnSO ₄ ·H ₂ O	0,0061		
H ₃ BO ₃	0,0017		
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0,00039		
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0,00037		
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0,00044		

Así, los cálculos tienen que realizarse individualmente para cada cultivador. Otra dificultad es la incapacidad para suministrar una cierta cantidad de un macronutriente independientemente de la fuente de los otros macronutrientes, debido a la falta de los fertilizantes con un solo nutriente (excepto N). Por ejemplo, potasio soluble (K^+) puede agregarse como KOH o como una sal (KCl, KNO_3 , KH_2PO_4 , K_2SO_4 etc.) a una solución acuosa. Sin embargo, la fuente de K en forma de KOH es acompañada por el suministro concomitante de iones OH^- que aumentan el pH de la solución a niveles perjudiciales para las plantas. Del mismo modo, el suministro de potasio sales de resultados en el suministro concomitante de otro elemento en la forma de un anión en una proporción molar fija dependiendo de la Valencia de este anión (normalmente 1:1 o 2:1).

Para superar estas complicaciones y evitar la repetición laboriosa, programas de computadora especiales se han desarrollado para el cálculo de las cantidades de los fertilizantes necesarios para preparar una solución nutritiva con una determinada composición de riego agua. Savvas y este (1999) ha propuesto un programa sencillo que puede ser fácilmente aplicado para calcular la cantidad de fertilizantes necesarios para preparar soluciones nutritivas comerciales cuando una composición de destino está disponible y se conoce la composición mineral del agua de riego. Este programa, que opera a través de una plataforma Microsoft EXCEL®, es accesible libremente a través de la Internet en: www.ekk.aua.gr/excel/index_en.htm

Para calcular la cantidad de fertilizante necesario para preparar una solución nutriente mediante un programa informático, es necesario introducir datos de entrada que describen su composición. Cuando se utiliza un programa basado en el algoritmo propuesto por Savvas y este (1999), la composición de la solución nutritiva tiene que ser definido mediante la selección de valores objetivo para las siguientes características de la solución: conductividad eléctrica (CE) en $dS\ m^{-1}$ – una medida de la concentración total de sal en la solución nutritiva; concentración de K, Ca y Mg, que puede ser introducido como alternativa ya sea como relación mutua (K:CA:mg sobre una base molar, denotada por x) o como concentración fija las concentraciones ($mmol\ l^{-1}$) de N, que puede definirse especificando uno de los siguientes: -un total de nitrógeno relación potasio (total-N/K denotada por R) en combinación con un amonio proporción del nitrógeno total (NH_4-N /total-N denotado por N_r), ambos sobre una base molar - un total de nitrógeno relación potasio (total-N/K en una base molar denotada por R) en combinación con una concentración fija de NH_4-N ($mmol\ l^{-1}$) - una concentración de NO_3-N fija ($mmol\ l^{-1}$) en combinación con un amonio proporción del nitrógeno total (NH_4-N /total-N en una base molar, por N_r); o - una concentración de NO_3-N fija ($mmol\ l^{-1}$) en combinación con una concentración ($mmol\ l^{-1}$) NH_4-N fija de H_2PO_4 - ($mmol\ l^{-1}$) ; Concentración de micronutrientes ($\mu mol\ l^{-1}$), específicamente el Fe, Mn, Zn, Cu, B y Mo.

Si la composición deseada de una solución de nutrientes se da en términos de concentraciones de blanco fijo, la CE de la solución también es fijo y puede ser calculada usando la siguiente relación que se establece por Savvas y col (1999):

$$C = 9.819 E - 1.462$$

donde:

E representa a la EC ($dS\ m^{-1}$)

C representa a la suma de las concentraciones de cationes ($meq\ l^{-1}$) en la solución nutritiva, incluyendo las no nutritivas macrocationes, especialmente la concentración de Na^+ .

En consecuencia, cuando solamente las concentraciones de macronutrientes pero sin macronutrientes razones se dan para definir la composición de la solución nutriente deseado, tiene sentido para seleccionar un destino CE, puesto que el único fijo CE, que calculado por la ecuación 1, es factible. Por el contrario, si la composición deseada de la solución nutritiva se define por la selección de proporciones de macronutrientes de destino, es posible seleccionar cualquier EC deseada

Para calcular la cantidad de fertilizante necesario para preparar una solución nutritiva, es importante presentar también la siguiente información a programa de computadora, además a los datos que describen la composición deseada:

- EC, pH y concentraciones de nutrientes (K, Ca, Mg, N de NO₃, SO₄-S, Mn, Zn, Cu, B, Cl) y no nutritivas de los iones (Na + y HCO₃⁻) en el agua de riego que se utiliza para preparar la solución nutritiva
- Porcentaje de Fe en la Fe-quelato utilizada como fuente de
- P soluble disponible P (KH₂PO₄ o H₃PO₄) y el porcentaje de H₃PO₄ puro en el H₃PO₄ de comercial, si este último se utiliza como fertilizante (comúnmente el 85%) de P
- Porcentaje de HNO₃ puro en el HNO₃ comercial, si este último se utiliza para ajuste de pH durante la preparación de la fuente de
- Disponibilidad de B en la solución nutritiva (véase tabla 1)
- Disponibilidad de Mo
- Volumen disponible las soluciones madre (m³)
- Factor de concentración deseado y definido para un fertilizante especial como la relación de sus concentraciones en la solución y la solución que se suministra a los cultivos (normalmente 100, dictado por la menor solubilidad de los fertilizantes utilizados)

La salida obtenida mediante la aplicación de un programa de computadora para calcular una solución nutritiva comprende el peso del fertilizante (kg de macronutrientes, micronutrientes g) para ser agregado en los tanques de solución madre de dos (A y B) para el volumen dado. Si la composición de la solución nutritiva de blanco como datos de entrada incluye las concentraciones de macronutrientes y no relaciones, el programa también calcula el blanco EC. Los valores de CE y pH se introducen posteriormente en el sistema que controla de la cabeza de la fertirrigación para preparar automáticamente la solución nutritiva fresca diluyendo las soluciones stock.

Como regla general, el fertilizante utilizado como fuente de calcio obedece nitrato de calcio, fosfatos de calcio y sulfatos son fertilizantes poco solubles, y cloruro de calcio tendría como resultado la adición de cloruros en concentraciones indeseables. Magnesio y los sulfatos se añaden en forma de sulfato de magnesio. Si la concentración objetivo de magnesio es mayor que la del sulfato, el magnesio adicional se agrega en forma de nitrato de magnesio. Sin embargo, si la concentración objetivo de sulfato es mayor que el de magnesio, extra SO₄²⁻ es necesario, agrega en forma de sulfato de potasio. Fósforo se agrega como fosfato monopotásico pero también puede ser agregado como ácido fosfórico, dependiendo de la concentración de bicarbonatos en el agua de riego. Amonio se agrega comúnmente como nitrato de amonio. Potasio se añade principalmente como nitrato de potasio, sin embargo, para calcular la cantidad a añadir, la concentración de K origina de la adición de sulfato de potasio y fosfato monopotásico fosfato se deduce la concentración objetivo K. Nitrato-N se añade en forma de nitrato de calcio, nitrato de magnesio, nitrato de potasio, nitrato de amonio y ácido nítrico. La asignación del NO₃-N requerida a los fertilizantes de NO₃-N que se hace referencia arriba depende de las concentraciones objetivo de Ca, Mg, K, SO₄²⁻, H₂PO₄⁻ en la solución nutritiva y la concentración de bicarbonatos en el agua de riego.

La concentración de HCO₃⁻ en el agua de riego determina la cantidad de HNO₃ a controlar el pH pero tiene un impacto también en la adición de H₃PO₄. Al preparar solución nutritiva fresca diluyendo las soluciones madre con riego de agua, el ajuste del pH objetivo implica la conversión de los bicarbonatos en el agua de riego al CO₂ (Savvas y col, 1999). Esta reacción requiere la adición de ácido en un H⁺: cociente de HCO₃⁻ molar de 1: 1. La concentración objetivo P en soluciones nutritivas rara vez supera los 1,5 mmol por litro. Por lo tanto, no es posible añadir más ácido fosfórico que dando por resultado una concentración de P de 1,5 mmol / l en la solución nutritiva. Sin embargo, las concentraciones de bicarbonato en la mayoría de las fuentes de agua de riego en los países mediterráneos son muy superiores a 1,5 mmol por litro. Si la concentración de bicarbonatos en el agua de riego es aproximadamente 0.5 – 1.0 mM mayor que la concentración objetivo P en la solución nutritiva, el ácido nítrico debe ser utilizado para ajustar el pH objetivo, además de ácido fosfórico, o como única fuente de H⁺. Altas concentraciones de HCO₃⁻ en el agua de riego esencialmente acompañan igualmente de

altas concentraciones de cationes, especialmente Ca^{2+} y Mg^{2+} . Así, al preparar una solución nutritiva con agua del grifo con una alta concentración de HCO_3^- , una mayor adición de NO_3^- en forma de HNO_3 para controlar pH es compensada por una disminución fuente de NO_3^- en forma de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Si una alta concentración de HCO_3^- en el agua del grifo es acompañada también por una concentración elevada de Mg^{2+} , menos Mg^{2+} se agrega en forma de MgSO_4 . Luego, el necesario SO_4^{2-} se añade en forma de K_2SO_4 , resultando además reducción de NO_3^- en forma de KNO_3 . Por consiguiente, incluso si la concentración de HCO_3^- en el agua del grifo es alta, no existe ningún riesgo de agregar demasiada NO_3^- a la solución nutritiva cuando HNO_3 se utiliza para ajustar el pH.

En cuanto a micronutrientes metálicos, hierro se agrega como su Fe, mientras que Mn, Zn y Cu se agregan en la forma de sus sales de sulfato. Los fertilizantes B utilizados en cultivos hidropónicos son Octaborato de sodio, tetraborato de sodio y bórax, mientras que los fertilizantes de Mo utilizados son molibdato y amonio hepta-molibdato de sodio. La selección del fertilizante B o Mo depende la disponibilidad actual y precios de mercado y no de la adición de otros nutrientes o la composición del agua de riego.

Un aspecto interesante relacionado con la nutrición de las plantas de cultivo crecido en invernaderos, que ha recibido atención durante las últimas dos décadas, es la inclusión de silicio en la solución nutritiva. Silicio mejora el crecimiento de las plantas sometidas a dos condiciones de estrés abiótico y biótico cuando se suministra a través de la solución nutritiva en hidroponía, aunque parece tener ningún efecto bajo condiciones sin estrés. Silicio se agrega a la solución nutritiva en forma de silicato de potasio líquido ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{KOH}$), que tiene una fuerte reacción alcalina y por lo tanto, debe suministrarse a las plantas de un tanque de solución madre separada. La alta alcalinidad de silicato de potasio es controlada por aumento de la dosis de inyección de HNO_3 durante el proceso de preparación de solución nutritiva. El suministro adicional de nitrógeno en forma de HNO_3 y K en la forma de $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{KOH}$ a la solución nutritiva se compensa con una reducción correspondiente en la inyección de KNO_3 .

2 Sistemas de cultivos sin suelo

2.1 Necesidad de utilizar sistemas de cultivo sin suelo

Los aztecas fueron la primera civilización humana en usar la agricultura hidropónica eficientemente. Esta técnica, mediante el uso de una chinampa, ocupó el 100 % de lo que era el lago de Texcoco, que se convirtió después en la Ciudad de México.

Las soluciones minerales para el aporte de nutrientes requeridas para cultivos hidropónicos no fueron desarrolladas hasta el siglo XIX. Los jardines por cubrimiento de partes de lagos de los aztecas (chinampas) utilizaban tierra. Los Jardines Colgantes de Babilonia eran jardines supuestamente irrigados desde la azotea, pero no hay evidencias de que utilizaran hidroponía. La idea del cultivo de plantas en áreas ambientalmente controladas también existía en Roma. El emperador romano Tiberio introdujo el cultivo del pepino mediante técnicas hidropónicas.

En 1928, el profesor William Frederick Gericke de la Universidad de California en Berkeley, en California, fue el primero en sugerir que los cultivos en solución se utilizaran para la producción vegetal agrícola. Gericke causó sensación al hacer crecer tomates y otras plantas que alcanzaron tamaños notables (mayores que las cultivadas en tierra) en soluciones minerales lo cual lo llevó a la realización de su artículo titulado “Acuicultura: un medio para producir cosechas” (1929). Por analogía con el término geopónica (que significa agricultura en griego antiguo) llamó a esta nueva ciencia hidroponía en 1937, aunque él afirma que el término fue sugerido por el Dr. W.A. Setchell, de la Universidad de California de hydros (agua) y ponos (cultura / cultivo).

Los informes sobre este trabajo y las fervientes afirmaciones de Gericke de que la hidroponía revolucionaría la agricultura provocaron una gran cantidad de peticiones de información adicional. Gericke rehusó desvelar sus secretos, ya que había realizado los estudios en su casa y en su tiempo libre. Este hecho provocó su abandono de la universidad de California. En 1940, escribió el libro, *Complete Guide to Soilless Gardening* (Guía Completa del Cultivo sin Suelo).

Se pidió a otros dos especialistas en la nutrición de las plantas de la universidad de California que investigasen acerca de las afirmaciones de Gericke. Dennis R. Hoagland y Daniel I. Arnon escribieron el típico boletín sobre agricultura en 1938, desacreditando las exageradas afirmaciones hechas sobre la hidroponía. Hoagland y Arnon llegaron a la conclusión de que las cosechas de cultivos hidropónicos no eran mejores que aquellos cultivos cosechados en buenas tierras. Los cultivos estaban limitados por otros factores que los nutrientes minerales, especialmente la luz. Estas investigaciones, sin embargo, pasaron por alto el hecho de que la hidroponía tenía otras ventajas incluido el que las raíces de la planta tienen acceso constante al oxígeno y que la planta puede tener acceso a tanta o a tan poca agua como necesite. Este es uno de los errores más comunes cuando el cultivo es sobre-irrigado o sub-irrigado, la hidroponía es capaz de prevenir que esto ocurra, drenando o recirculando el agua que no absorba la planta. En cultivos sobre tierra, el agricultor necesita tener suficiente experiencia para saber con cuánta agua debe regar la planta. La solución con la que estarán en contacto las raíces debe estar suficientemente oxigenada para que el metabolismo radicular no se vea impedido.

Estos dos investigadores desarrollaron varias fórmulas para soluciones nutritivas. Unas versiones modificadas de las soluciones de Hoagland se siguen utilizando hoy en día.

Uno de los primeros éxitos de la hidroponía ocurrió durante la Segunda Guerra Mundial cuando las tropas estadounidenses que estaban en el Pacífico, pusieron en práctica métodos hidropónicos a gran escala para proveer de verduras frescas a las tropas en guerra con Japón en islas donde no había suelo disponible y era extremadamente caro transportarlas.

En los años 60, Alen Cooper en Inglaterra desarrollo la Nutrient Film Technique (NFT). El Pabellón de la Tierra, en el Centro Epcot de Disney, abierto en 1982, puso de relieve diversas técnicas de hidroponía. En décadas recientes, la NASA ha realizado investigaciones extensivas para su CELSS (acrónimo en inglés para Sistema de Soporte de Vida Ecológica Controlada). También en los 80 varias compañías empezaron a comercializar sistemas hidropónicos. En la actualidad es posible adquirir un kit para montar pequeños sistemas de cultivo hidropónicos hogareños por menos de 200 €. Las técnicas de cultivo sin suelo (CSS) son utilizadas a gran escala en los circuitos comerciales de producción de plantas de tabaco (floating), eliminando así las almácigas en suelo que precisan bromuro de metilo para desinfectar el suelo de malezas, patógenos e insectos. También 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 nuevos medios de cultivo como la perlita, la lana de roca, la fibra de coco o cocopeat, la cascarilla de arroz tostada y otros sustratos apropiados

Cuando los síntomas de deficiencia aguda están relacionados a un determinado elemento esencial, una pista importante es la medida en que un elemento puede ser reciclado de las hojas más viejas a las más jóvenes. Algunos elementos, como nitrógeno, fósforo y potasio, pueden moverse fácilmente de la hoja a hoja; otros, como el boro, hierro y calcio, son relativamente inmóviles en la mayoría de las especies vegetales (tabla 5.4). Si un elemento esencial es móvil, los síntomas de deficiencia tienden a aparecer primero en las hojas más viejas. La deficiencia de un elemento esencial inmóvil será evidente primero en las hojas jóvenes.

Los cultivos sin suelo representan una de las principales soluciones para los problemas de suelo, tiene efectos positivos sobre el medio ambiente y mejora la eficiencia del fertilizante y el uso del agua. En la actualidad, este tipo de cultivo representa una proporción relativamente pequeña (10%) de medios de cultivo.

El cultivo de plantas en sistemas sin suelo in situ se define en la literatura como "cultivos hidropónicos" (Gruda, 2009). Muchos de estos sistemas se basan en el uso de medios de enraizamiento sólido para el cultivo de plantas. Generalmente se llaman "medio de crecimiento" o "sustratos"; sin embargo, se utilizan a veces términos como "sistemas agregados", "soportes" o "rellenado de suelo". Los sustratos se definen como todos aquellos materiales sólidos, excepto el suelo, que solos o mezclados pueden garantizar mejores condiciones que en los suelos agrícolas (para uno o más aspectos). Por lo tanto, los sustratos de diverso origen toman el papel del suelo proporcionando anclaje para el sistema raíz, suministro de agua y nutrientes para la planta y garantizan una adecuada ventilación en el área de la raíz (Gruda et al., 2006).

Los cultivos sin suelo se utilizan en contenedores (sustratos orgánicos, perlita etc.). Sin embargo, a veces se utilizan en forma de preparados cubos (cubos de lana de roca para la producción de plántulas y trasplante), los bolsos y las losas (sustratos a base de turba y lana de roca, respectivamente), tapetes (espuma de poliuretano) y canales (lana de roca); estos tres últimos también se utilizan para la producción de hortalizas en sistemas de cultivos hidropónicos.

La escasez y la baja calidad del agua disponible para la agricultura es un problema en muchos lugares del mundo, en especial en el Sureste de España. Dada la imposibilidad de reutilizar año tras año la tierra donde se cultivaba, por los problemas de estructura y fertilidad del suelo, derivados del uso excesivo de fertilizantes y aguas con alto contenido de sales disueltas, y los problemas de enfermedades de suelo, cada vez se mostraba mayor interés en este tipo de cultivo sin suelo. El área de cultivos sin suelo en el sureste de España está estimada en unas 5.000 ha, correspondiendo la mitad a lana de roca y la otra mitad se reparte entre perlita, arena, fibra de coco y otros sustratos (Urrestarazu, 2004). El interés por la aplicación práctica de estos sistemas ha ido creciendo desde 1925 hasta nuestras fechas, básicamente por la industria de los invernaderos (Resh, 1997). Esta expansión es debida, además de los problemas citados, a la gran demanda de productos vegetales, la extinción en el uso del bromuro de metilo como desinfectante de suelos, el incremento de las zonas urbanizables y el precio de la tierra arable.

Los sistemas de cultivo sin suelo se pueden clasificar en dos grandes grupos dependiendo del medio en el que se desarrollen las raíces: cultivos en sustrato o cultivos a raíz desnuda (en agua o hidropónicos y en aire o aeropónicos). La elección de un material u otro estará determinado por varios factores: la disponibilidad del mismo, la finalidad de la producción, su coste, las propiedades físico-químicas.

2.2 Cultivos en sustrato

Existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos, basados en el origen de los materiales, y pueden ser, naturales (orgánicos e inorgánicos) y sintéticos, y según sus propiedades se clasifican por su actividad química en inertes y químicamente activos; también pueden ser analizados por sus propiedades bioquímicas, biológicas y físicas; dentro de esta última, se estudian la humedad higroscópica, densidad volumétrica, densidad de la fase sólida, porosidad, acidez del sustrato, la conductividad eléctrica (CE), entre otras según lo referido por Martínez y García (1993), Abad (1993), Abad y Noguera (1997), citados por Alarcón (2000). En la figura 1 se pueden ver los tipos de sustrato utilizados en sistemas de cultivo sin suelo.



Figura 1. Tipos de sustrato utilizados en sistemas de cultivo sin suelo.

2.2.1 Sustratos orgánicos

En general los sustratos orgánicos poseen mayor conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico que los sustratos inorgánicos (Sahin y col., 2002ab), dificultando el control de la nutrición mineral del cultivo. Esta mayor capacidad de intercambio catiónico ofrece más flexibilidad en el riego y fertilización, permitiendo una fertilización intermitente, es decir, alternando riegos con solución nutritiva completa con riegos de agua sin fertilizantes, incluso permitiendo abonado de fondo, aunque desde el punto de vista del ajuste de la nutrición mineral, es preferible una fertirrigación continua. La directa proporcionalidad de la capacidad tampón de un sustrato con la capacidad de intercambio catiónico, es la respuesta a que los sustratos orgánicos tengan un mayor poder buffer o tampón comparados con los sustratos inorgánicos, ya que, en ellos, las sustancias húmicas presentes proporcionan capacidad tampón.

Dentro de los sustratos orgánicos los más importantes y utilizados en Europa son las turbas, cortezas de madera y la fibra de coco (Fotografía 1).



Figura 2. Detalle de sustratos orgánicos (turba, corteza de madera y fibra de coco).

2.2.1.1 Turbas

Las turbas están formadas por restos de musgos y otras plantas superiores que se hallan en proceso de carbonización lenta, fuera del contacto con el oxígeno, a causa de un exceso de agua, por lo que conservan largo tiempo su estructura anatómica. Los residuos vegetales pueden depositarse en diferentes ecosistemas lo que daría lugar a la formación de dos tipos de turba: Sphagnum u oligotróficas y herbáceas o eutróficas. Las turbas Sphagnum son los componentes orgánicos más utilizados en la actualidad para medios de cultivos que crecen en macetas, debido a sus excelentes propiedades físico-químicas. Sin embargo, y a pesar de que durante casi 30 años las turbas han sido los materiales más utilizados como sustratos, en los últimos tiempos han sido sustituidos por los inorgánicos debido a alteraciones microbiológicas e interacciones con la disolución nutritiva, rápida descomposición, aireación reducida, etc. Además, las reservas de turba son limitadas y no renovables, por lo que su uso indiscriminado puede originar un impacto medioambiental de importancia.

2.2.1.2 Cortezas de madera

Se trata de un término que incluye a la corteza interna (floema vivo) y a la corteza externa de los árboles. Se pueden utilizar cortezas de diferentes árboles siendo las más utilizadas las de pino. Pueden estar en estado fresco o compostadas, las primeras pueden provocar una deficiencia en nitrógeno (N) y problemas de fitotoxicidad; el compostaje reduce estos problemas. Sus propiedades físicas dependen del tamaño de la partícula, pero la porosidad suele superar el 80-85 %.

2.2.1.3 Fibra de coco Cocopeat

La fibra de coco es un sustrato que ha entrado de manera importante a nivel comercial en la última década (Alarcón y Murcia, 2000). La fibra de coco es un subproducto de la industria del coco (Cocos nucífera) que se encuentra disponible en grandes cantidades en los países productores de cocos. Los subproductos resultantes del desfibrado de la nuez de coco proceden del mesocarpio de la misma y consisten en fibras largas, que se suelen utilizar para diversas actividades de manufactura, más restos de fibras y polvo, de aspecto similar a la turba, que se acumulan como residuo. Son generalmente estos restos de fibras (de longitud inferior a 2 mm) los que suelen utilizarse en mezclas como sustrato y se presentan generalmente prensadas en ladrillos que deben deshacerse y rehumectarse previamente a su uso. Las fibras largas, de longitud superior a 16 mm, se utilizan como sustratos para los cultivos sin suelo ya que tienen buen equilibrio entre retención de agua y capacidad de aireación. Evita las enfermedades fúngicas en las raíces como consecuencia del exceso de humedad. El pH de este producto es estable y controlado, oscila entre 5,5 y 6,5, rango que resulta apropiado para la mayoría de las plantas.

2.2.2 Sustratos inorgánicos

Los sustratos inorgánicos se consideran un medio material donde se desarrolla el sistema radicular del cultivo que presenta un volumen físico limitado y debe encontrarse aislado del suelo, además tiene como funciones mantener adecuada la relación aire y solución nutritiva para proporcionar a la raíz el oxígeno y los nutrientes necesarios y servir de anclaje a la planta (Alarcón y col., 2000).

Dentro de los sustratos inorgánicos más utilizados nos encontramos la perlita, lana de roca, la arena y la sepiolita (Fotografía 2).



Figura 3. Detalle de sustratos inorgánicos (perlita, lana de roca, arena y sepiolita).

2.2.2.1 Perlita

La perlita es un material silíceo de origen volcánico que sometido a altas temperaturas se expande por deshidratación y da lugar a un material granulado, de muy baja densidad aparente, biológicamente estéril y que es apto para utilizarse en agricultura especialmente en el cultivo de hortalizas como el tomate. Otras características físicas son la capacidad de absorción de agua, la densidad aparente y el espacio poroso total. Las características físicas de la perlita están estrechamente vinculadas a la granulometría que presenta el material. El tipo de perlita más utilizado actualmente para el cultivo de hortalizas es la de granulometría comprendida entre 0 y los 5 mm. La forma estandarizada de presentación de la perlita es en sacos de polietileno de 800 galgas de espesor y doble capa (negros por el interior y blancos por el exterior). Las dimensiones del saco son de 120 cm de longitud y un diámetro aproximado de 20 cm con este dimensionamiento se cubica 40 litros de sustrato.

Las principales ventajas de la perlita son:

- Retiene un elevado porcentaje de humedad, durante más tiempo.
- Maximización de los nutrientes del agua, manteniendo los nutrientes solubles sobre las partículas de perlita.
- Facilita un rápido enraizamiento, garantizando una estructura densa de las raíces lo que reduce el impacto del trasplante e incrementa el índice de supervivencia.
- Tiene un pH neutro y mayor capacidad de intercambio catiónico.
- Sustrato liviano

2.2.2.2 Lana de roca

Es un producto mineral transformado industrialmente por temperaturas elevadas. Se trata de un silicato de aluminio con presencia de calcio y magnesio, y trazas de hierro y manganeso. Este sustrato se utiliza principalmente en países europeos como Holanda, Francia, Reino Unido o Dinamarca. Es un material con una porosidad total elevada (superior al 95 %), una alta capacidad de retención de agua fácilmente disponible y gran aireación, sin embargo,

desde el punto de vista químico, es prácticamente inerte, sin ninguna capacidad tampón, lo que exige un perfecto control de la nutrición hídrica y mineral. Por otro lado, presenta el problema de la eliminación de residuos una vez finalizada su vida útil (Raviv y col. 2002).

2.2.2.3 Arena

La arena es un material de naturaleza silíceo y de composición variable, que depende de los componentes de la roca silicatada original. Puede proceder de las canteras, de ríos o ramblas. Es necesario que las arenas estén exentas de limos, arcillas y carbonatos cálcicos (CO_3Ca); de acuerdo con el estudio realizado en Egipto por Abou-Hadid y col., (1987), se observa que cultivos desarrollados tanto en arena como en lana de roca presentan resultados similares. Existen experiencias, realizadas en China, donde se ha utilizado la arena como soporte obteniéndose excelentes resultados (Mancini y Mugnossa, 1993, Fujiyama y Nagal, 1987). En el sudoeste de España, la arena constituye el sustrato más utilizado, aunque su uso está disminuyendo debido a las restricciones legales en materia medioambiental (Martínez y Abad, 1992). En resumen, de las experiencias realizadas en países como España y Egipto puede deducirse que la arena es un buen sustrato y debe ser utilizado en países donde este material se encuentre en abundancia, debido al abaratamiento de los costes y las ventajas de suministro, siempre, teniendo en cuenta los problemas derivados del uso indiscriminado y de arenas de baja calidad.

2.2.2.4 Sepiolita

La sepiolita es un mineral de la arcilla cuya composición está basada principalmente en silicato de magnesio hidratado. En España se ha desarrollado un experimento a escala comercial, en invernaderos de polietileno, para evaluar el comportamiento de la arena, la perlita, la lana de roca y la sepiolita y esta última mezclada con leonardita. Los resultados indican que los rendimientos más altos se obtuvieron con una mezcla de perlita, sepiolita y lana de roca (Martínez y Abad, 1992). Estos autores demuestran las buenas cualidades de la sepiolita en condiciones de elevada salinidad, resaltando la ausencia de contaminantes y su excelente precio.

2.3 Cultivos a raíz desnuda

Los sistemas a raíz desnuda son cultivos donde las raíces están total o parcialmente sumergidas en la solución nutritiva, actualmente son alternativas productivas para la obtención de hortalizas precoces, así como optimizar el rendimiento del cultivo. Esta solución nutritiva está compuesta por todos los nutrientes que son esenciales para el desarrollo de las plantas, y están a una concentración óptima.

En los sistemas a raíz desnuda, se puede realizar un control preciso de la concentración de cada nutriente y de los equilibrios entre ellos, además de mantener unos niveles de pH óptimo para que todos los nutrientes están en disolución y disponibles para las plantas. En estos casos se debe garantizar una buena oxigenación de las raíces y tratar de evitar cualquier infección a través de la solución nutritiva. Los tipos de sistemas a raíz desnuda se muestran en la fotografía 3.

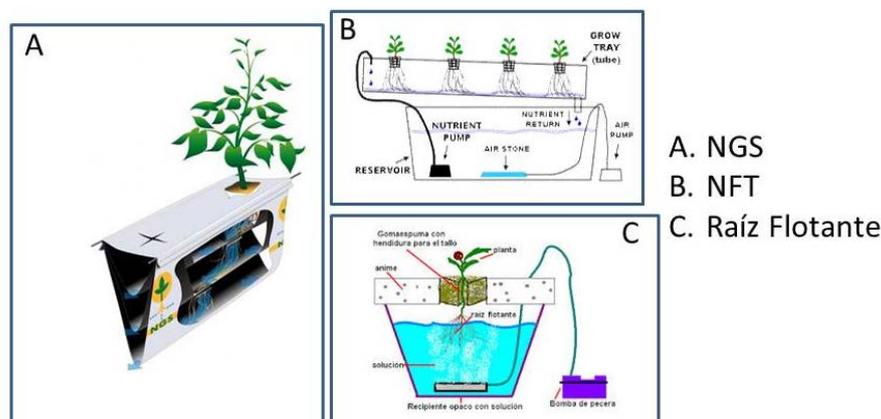


Figura 4. Detalle de sistemas de raíz desnuda (NGS, NFT y Raíz Flotante).

2.3.1 NFT

El sistema NFT (Nutrient Film Technique) se caracteriza por aplicar una técnica de flujo continuo de una película de solución nutritiva, es un sistema de cultivo en agua donde la solución nutritiva circula continuamente por una serie de canales de cultivo donde estos sirven para el sostén y desarrollo de las raíces de las plantas. Por el canal, con una ligera pendiente (0.5 -1.0 %) recorre una película o lámina de unos 3 a 5 milímetros de agua conteniendo la solución nutritiva, luego ésta es recolectada por una tubería de drenaje que está conectada con el tanque. Finalmente, la solución retorna al tanque. Este flujo continuo de solución nutritiva permite que las raíces tengan una buena oxigenación y un adecuado suministro de nutrientes para las plantas Spensley, K; Cooper (1978); Winsor y col. (1978).

Las principales ventajas del sistema NFT son:

- El agua se encuentra muy fácilmente disponible para el cultivo, lo que representa una de las mayores ventajas del sistema, al ser mínimo el gasto de energía que debe realizar la planta en la absorción, pudiendo aprovechar éstas en otros procesos metabólicos.

- La renovación continua de la solución nutritiva en el entorno de la raíz, permite un suministro adecuado de nutrientes minerales y oxígeno.

- Alto nivel de tolerancia a la concentración de nutrientes, con la recomendación de no utilizar bajas concentraciones que provoquen deficiencias de los mismos para las plantas.

- Las producciones suelen ser mayores y más precoces, además de una calidad excelente.

- Ha sido desarrollado para trabajar en circuito cerrado ahorrando agua y nutrientes, a la vez que tiene un bajo impacto ambiental y permite reutilizar el cien por cien de los drenajes.

2.3.2 NGS

El sistema de cultivo NGS® (New Growing System) representa una nueva forma de cultivo sin suelo a raíz desnuda. Fue desarrollado completamente en Almería (España) por la empresa New Growing System. En este sistema las raíces se desarrollan en un conjunto de láminas de polietileno (PE) superpuestas en forma de V donde se hace pasar la solución nutritiva (SN) que circula en un circuito cerrado. Estas láminas están dispuestas de tal forma que

la SN después de recorrer un tramo de la lámina, pasa o cae a la lámina siguiente por medio de unos agujeros o taladros, troquelados en la parte inferior o en las escaleras laterales de dichas laminas.

La SN recorre un largo camino desde que es liberada por el sistema de goteo, hasta que es recogida por la última lámina (colectora), es durante este camino cuando la SN pone a disposición de las raíces: agua, nutrientes y oxígeno. Al mismo tiempo, la SN retira de la rizosfera los iones no asimilados o los compuestos excretados por las raíces y contribuye a renovar los gases que participan en la respiración radical (O_2 y CO_2). En el caso que se emplee una SN calentada (invierno) o refrigerada (verano), la SN facilita el intercambio de calor con el sistema.

La SN es recogida al final de cada línea de cultivo mediante un embudo conectado a un colector que canaliza, por gravedad, los drenajes hacia un depósito de recogida ubicado en el cabezal de riego, donde se reponen el agua y los nutrientes consumidos por la planta. El sistema NGS es un sistema que aprovecha el cien por cien los drenajes. Las principales ventajas de este sistema son:

- Es un sistema sin suelo a raíz desnuda que no precisa de ningún sustrato.
- Permite obtener altas producciones de excelente calidad.
- Permite obtener producciones más precoces.
- Ha sido desarrollado para trabajar en circuito cerrado ahorrando agua y nutrientes.
- Tiene un bajo impacto ambiental y permite reutilizar el cien por cien de los drenajes.
- El movimiento continuo de la solución nutritiva reduce los riesgos de salinidad que aparecen cuando se utilizan aguas de mala calidad o sustratos orgánicos e inertes y se acumulan las sales en éstos.
- Mantiene el sistema radicular perfectamente aireado, lo que se traduce en una producción más abundante.
- Admite la incorporación de cualquier sistema de desinfección de SN.

2.3.3 Floating

El cultivo de raíz flotante es una técnica de cultivo de plantas en soluciones acuosas, donde estas crecen flotando en una placa, cubo o recipiente, teniendo siempre su raíz dentro de la solución nutritiva. El sistema lleva incorporado un electrosoplante u otro mecanismo encargado de incorporar la aireación y mediante el cual se oxigenan las raíces. Las principales ventajas del sistema consisten en:

- Ahorro de agua debido a que es un sistema cerrado y el agua que se reincorpora solo puede ser debido al consumo por la planta o a una acumulación de sales en la solución nutritiva.
- Sencillo control y manejo del sistema, el cual una vez en marcha solo se necesita de un control de la solución nutritiva y de las atenciones culturales al cultivo.
- Mayor producción en menos espacio, debido a que las plantas no necesitan competir por los nutrientes, y así se pueden optimizar las densidades de plantación en la medida en que nos lo permita el desarrollo vegetativo del cultivo.
- Optimización en el uso de fertilizantes ya que solo se usa la cantidad requerida por el cultivo en todo su ciclo vegetativo.
- Menos uso de productos fitosanitarios, casi nulo.
- Obtención de productos con mayor calidad y limpieza.

Es importante destacar que no existe un mejor sistema de cultivo o un sustrato ideal, cada uno presenta una serie de ventajas e inconvenientes y su elección dependerá de las características del cultivo a implantar, de las variables ambientales y de la instalación a utilizar. Lo que sí existe es un manejo ideal para cada tipo de sistema de cultivo o sustrato a emplear.

3 Necesidades de agua y fertirrigación

3.1 Necesidades de agua

Grandes áreas de invernaderos sin calefacción se encuentran en las regiones costeras de la cuenca mediterránea (Pardossi et al., 2004). Generalmente son costo relativamente bajo estructuras cubiertas con plástico, sin sistemas activos de control climático, en que por goteo se utiliza riego con cosechas cultivadas en suelo o sustrato crecido. Estos invernaderos relativamente simples se conocen colectivamente como invernaderos mediterráneos, y más comúnmente se utilizan para la producción de cultivos vegetales. Caracterización de los invernaderos, cultivo condiciones, especies vegetales cultivadas y las prácticas de manejo han sido reportados (Castilla et al., 2004; Pardossi et al., 2004; Castilla y Hernández, 2005). La mayor superficie de invernaderos mediterráneos está situada en el sureste (SE) Costa de España; los principales ciclos de cultivos en esta región y los cultivos se presentan en la tabla 1.

Tabla 9 Ciclos de cultivo de los principales cultivos hortícolas en el área mediterránea

Major cycles	Typical period of cycle	Crops grown
Autumn–spring	August–May	Tomato, eggplant
Summer/autumn–winter	July/Aug./Sept.–Jan./Feb.	Pepper, tomato, cucumber, zucchini
Spring–summer	Jan./Feb./Mar.–May/June	Melon, ^a watermelon, ^a tomato, cucumber, zucchini

Hay cinco aspectos de riego de cultivos hortícolas en invernaderos mediterráneos que deben ser siempre considerados a la hora de planificar los riegos, requisitos de agua del cultivo cantidad de agua utilizada y manejo de riego, programación de riego de cultivos suelo, calendarización del riego de cultivos en función del sustrato y uso eficiente del agua.

En cultivos hortícolas de invernadero, la eficiencia de uso del agua de riego (kg m^{-3} , EUA), expresado como el cociente entre la producción de cultivos comerciales y el suministro de riego cultivo total, es mayor que en cultivos en campo abierto debido a la baja demanda evaporativa dentro del invernadero que reduce los requerimientos de agua y la productividad de cultivos invernadero. La WUE de cultivos de tomate bajo diferentes condiciones de crecimiento (campo abierto, invernadero, suelo, sustrato, etc.) se presenta en el cuadro 6. En los invernaderos de plástico sin calefacción en la cuenca mediterránea, EUA fue similar entre cultivos cultivados en suelo o sustrato y creciente bajo las siguientes condiciones:

- Mejora de la estructura de los invernaderos
- Aumento de la duración de los ciclos de cultivo
- Uso de sistemas con recirculación
- En cultivos sobre sustrato en invernaderos mediterráneos, el requerimiento de agua es igual a la evapotranspiración (ETc) más una fracción de drenaje para evitar la acumulación de sal.
- Un sistema de programación del riego automático es esencial para controlar los frecuentes y pequeños riegos aplicados a cultivos sustrato. Riego frecuente con pequeños volúmenes es necesario debido al volumen de la raíz limitado y capacidad de retención de agua de los sustratos. Los sistemas disponibles son métodos basados en:
 - sensores que activan la irrigación (por ejemplo, sensores de nivel de agua, sensores de agua del suelo adecuados para sustratos)
 - métodos basados en la estimación de requerimiento de agua de datos climáticos (por ejemplo, radiación), o
 - modelos de transpiración que pueden ser integrados en el programador de riego.
- El control de la salinidad de la zona de la raíz es una consideración fundamental para la gestión de riego de cultivos sustrato.

Tabla 10. Uso eficiente del agua (WUE) en tomate cultivados en diferentes medios.

Cropping conditions	Country	WUE (kg m ⁻³)
<i>Open field</i>		
Soil	Israel	17
Soil	France	14
Soil-processing tomato	Spain (Extremadura, Rioja)	7.4–8.5
<i>Unheated plastic greenhouse</i>		
Soil	Israel	33
Soil	France	24
Open substrate	Italy	23
Closed substrate	Italy	47
Soil enarenado- traditional greenhouse	Spain (Almería)	25
Soil enarenado- improved greenhouse	Spain (Almería)	35
Substrate-short season	Spain (Almería)	27
Substrate-long season	Spain (Almería)	35
<i>Glasshouse-climate controlled</i>		
Substrate-open system	Netherlands	45
Substrate-closed system	Netherlands	66

Stanghellini et al. (2003), Pardossi et al. (2004) and Gallardo et al. (2007)

3.2 Optimización de la fertirrigación.

En todos los tipos de cultivo sin suelo, el suelo es sustituido en su función de aportar nutrientes a las plantas por una SN artificial la cual es suministrada al cultivo por un sistema de riego (Savvas, 2001). Para formular la composición de una SN para un cierto cultivo, debe de haber resultados experimentales sobre los requerimientos nutricionales de ese cultivo en particular. Estos datos son esenciales para comprobar y ajustar el estado nutricional de la planta durante el cultivo. Además, incluso cuando se dispone de una correcta SN para un cultivo determinado, que da buenos rendimientos, es esencial aportarla correctamente para un sustrato determinado. La SN debe ser aportada a las plantas siguiendo una eficiente programación del riego con respecto a la cantidad total de agua aportada y la frecuencia de su aplicación. En los últimos años y debido al interés que su aplicación comercial tiene para los agricultores, se han realizado grandes esfuerzos, apoyados por la mejora de los equipos y técnicas analíticas, en la investigación de soluciones nutritivas específicas para cada cultivo en particular (de Kreij, 1996; Resh, 1997; Hanan, 1998).

En el área mediterránea, la práctica totalidad de las parcelas de cultivos sin suelo están bajo invernadero y son, hoy en día, sistemas abiertos a solución perdida, es decir, los lixiviados se dejan percolar en el suelo, bien en el mismo emplazamiento que los sustratos, o bien son canalizados fuera del invernadero donde se desechan. No obstante, cada día se impone con más fuerza la necesidad de regeneración y reutilización de estas aguas de drenaje, e incrementar el uso eficiente de las aguas de riego (Alarcón y col., 1998). Un paso previo a la reutilización de los drenajes es el estudio de adecuación de un sustrato para un cultivo, donde se obtenga información precisa acerca del consumo de agua y nutrientes por las plantas, necesidades de lavado, concentración de nutrientes en los drenajes, estado nutricional del cultivo, etc. Con esta información se podrán crear modelos que integren el manejo del riego, la fertilización y las respuestas de las plantas, y desarrollar estrategias ambientales y económicas óptimas (Klaring, 2001).

Como ya hemos apuntado, a la necesidad de reutilizar las aguas de drenaje, se le suma la necesidad de utilizar aguas con alta CE. Esto requiere un mayor conocimiento de la tolerancia a la salinidad de los cultivos y el empleo de técnicas de fertirriego adecuadas (Shannon y Grieve, 2000). Así pues, en un marco más amplio, la optimización del manejo de los cultivos sin suelo pasa por, encontrar estrategias de riego que hagan un uso eficiente del agua, que contemplen la calidad del agua de riego y que mantengan rendimientos sostenibles sin descender los parámetros de calidad de los frutos (Flowers y col., 2005; Ragab y col., 2005).

Entre las variables a tener en cuenta en el desarrollo de estrategias de riego y que pueden determinar la respuesta del cultivo a la salinidad están, el medio de cultivo, el tipo de sal, estado de crecimiento de la planta (Del Amor y col., 2001), el sistema de riego empleado (Rouphael y col., 2004; Incrocci y col., 2006), y variables como la conductividad eléctrica de la solución nutritiva (CESN), la frecuencia de riego, y la cantidad de nutrientes en la solución requeridas por las plantas (Dorais y col., 2001; Mitchell y col., 1991a; Peet y Willits, 1995; Santamaría y col., 2004; Savvas y col., 2005ab; Silber y col., 2005a; Silber y col., 2005b; Assouline y col., 2006).

En las últimas décadas, el aporte de una SN ha llegado a ser una operación de rutina, no sólo para cultivos hidropónicos o en sustratos, sino también para cultivos que crecen en el suelo (Savvas, 2001). Esta práctica ha permitido un mejor control de la nutrición de las plantas, especialmente, en los cultivos sin suelo, donde la reserva de nutrientes en la zona radicular es restringida. La concentración total de nutrientes se considera como una de las propiedades más importantes de la SN en sistemas sin suelo, ya que determinará la fuerza iónica de esa solución. Si además de conocer la concentración total de sales, conocemos el pH, el contenido de micronutrientes, la proporción entre los macronutrientes, y la composición del agua base, podemos decir que la SN está completamente definida (Savvas y Adamidis, 1999).

Además de definir la SN, es necesario conocer cuál será su manejo óptimo para las condiciones de cultivo. En este sentido, cuando nos enfrentamos a aguas de baja calidad, establecer una programación de riego adecuada conlleva más dificultad que si se aplican aguas de buena calidad (Paranychianakis y Chartzoulakis, 2005). Ello es debido a la escasa información existente del uso del agua por las plantas crecidas en un sustrato determinado bajo condiciones de estrés salino. De este modo, el éxito de la estrategia de riego no sólo dependerá del rendimiento final por planta sino también del consumo de agua por planta.

Aumentando la frecuencia de riego se previene la formación de zonas en el entorno radicular lo suficientemente secas como para restringir la absorción de nutrientes entre los sucesivos eventos de riego, descendiendo el gradiente de concentración entre la SN y el medio radicular, y disminuyendo el papel de la difusión en el transporte de nutrientes hacia la raíz (Silber y col., 2003). Se conoce que el riego con alta frecuencia mantiene la humedad en el sustrato y previene la concentración de sales en el sustrato minimizando los efectos adversos de la sal en las plantas (Boman y col., 2005; Helalia y col., 1996; Paranychianakis y Chartzoulakis, 2005).

3.3 Calidad de aguas de riego

3.3.1 Introducción

El agua es un recurso vital, pero limitado, para la vida del hombre en el planeta Tierra. A través de la historia, las civilizaciones más florecientes siempre se han desarrollado a lo largo o cerca de los cursos de agua. Es, sin embargo, en el último siglo, como consecuencia del aumento notable de la población mundial, cuando la escasez de agua, tanto para aumentar la producción de alimentos, como para abastecer la creciente demanda de los núcleos industriales y urbanos, ha puesto de manifiesto la importancia de la misma.

En las zonas áridas y semiáridas del mundo, y desde las más primitivas civilizaciones, el riego ha sido una práctica común y necesaria para la obtención de cosechas económicamente rentables. Sin embargo, la escasez de recursos hídricos de buena calidad, ha llevado en muchas de estas zonas a lo largo de la historia, al uso para el riego sin ningún tipo de limitación, de aguas con contenidos medios o elevados en sales solubles, y ha sido por lo tanto el factor más importante que ha contribuido a la salinización de extensas superficies de tierras fértiles y a la pérdida de su productividad. De aquí la necesidad de una regulación del uso de los recursos hídricos que detengan la salinización de los suelos y, en consecuencia, el deterioro de los recursos edáficos.

Actualmente, el agua escasea y no hay mucho donde elegir. De aquí que se estén haciendo grandes esfuerzos dirigidos al uso para el riego de recursos hídricos no convencionales, tales como aguas residuales, de drenaje, salinas, etc. Sin embargo, el éxito o fracaso del uso de tales recursos para el riego y la minimización de sus efectos sobre la productividad del suelo y los rendimientos de los cultivos, requieren una mejor comprensión de la compleja interacción suelo-agua-planta. En la actualidad hay una preocupación social desde un punto de vista ecológico, no solo por la escasez de este preciado líquido, sino también por el constante y progresivo deterioro de la calidad del mismo.

El hombre a través de los tiempos ha sido consciente de la importancia de la calidad del agua para el riego agrícola, y ya desde finales del siglo pasado existen criterios relacionados con su evaluación. La legislación al respecto tiene que adaptarse a la realidad para fijar los criterios de calidad de las aguas para los usuarios. El uso más extensivo que el hombre realizará en el futuro de las aguas naturales, magnifica los problemas actuales de su calidad. Las características que determinan la calidad de un agua varían en función de que su uso sea doméstico, industrial o agrícola, aunque todos los usuarios compiten por las mismas fuentes. Por ello, en este apartado se discuten algunos de los importantes factores que deben ser considerados para establecer los criterios específicos y adecuados para evaluar la calidad de las aguas para el riego agrícola.

3.3.2 Componentes del agua que determinan su calidad.

Las aguas utilizadas para el riego, independientemente que procedan de ríos, manantiales, pozos o residuales de ciudades o industrias, contienen cantidades variables de sales en disolución. La cantidad y clase de estas sales son los principales factores que determinan la calidad de un agua de riego. En el caso de aguas residuales procedentes de poblaciones, un análisis de los componentes microbiológicos de las mismas, será necesario para evaluar su aspecto sanitario.

Las principales sales presentes en las aguas más comúnmente utilizadas para el riego son cloruro, sulfato, carbonato y bicarbonato de sodio, calcio, magnesio y potasio. El boro también es un componente común de todas las aguas. Es frecuente, en determinadas condiciones puntuales encontrar aguas con nitrato, fosfato, amonio, pesticidas, herbicidas, metales pesados, etc., como consecuencia de aplicaciones intensas de fertilizantes, tratamientos fitosanitarios o por los vertidos de productos contaminantes a los cauces fluviales.

Las sales presentes en las aguas de riego presentan propiedades muy distintas en lo referente a solubilidad, movilidad y toxicidad y cuando se disuelven en agua pierden su identidad y se separan en iones. Por ello es normal en un análisis químico de un agua presentar la composición de la misma en función de las concentraciones de cationes y

aniones. En la Tabla 6.1. se presenta para su comparación el análisis de aguas de pozos y cauces fluviales representativos de la Región para uso agrícola.

Tabla 11 Calidad de agua de diferentes zonas de la región de Murcia (España)

	CE	SD	RASa	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl
	(dSm ⁻¹)	(gL ⁻¹)		mmol L ⁻¹						
AGUAS DE POZO										
Alhama	0.8	0.5	1.0	1.7	3.0	0.8	0.0	6.4	1.0	1.5
Fortuna	1.5	1.0	16.6	1.5	1.5	13.5	0.2	4.4	2.6	10.0
Abanilla	1.9	1.2	19.5	2.5	2.2	18.5	0.1	3.6	2.8	18.0
Murcia	2.4	1.5	7.2	5.1	4.9	7.6	0.1	9.3	4.7	7.5
Blanca	3.0	2.4	17.1	4.4	5.6	21.1	0.4	4.4	9.8	16.0
Cieza	3.6	2.9	14.9	14.1	13.1	23.5	0.3	10.8	16.7	32.0
Lorca	4.3	3.4	13.6	11.7	10.2	20.9	0.4	5.9	24.0	12.5
Cartagena	5.3	4.2	14.8	5.0	9.8	18.3	0.2	9.6	12.0	20.0
Torrepackeco	6.6	5.3	34.9	8.4	8.3	48.9	.9	6.4	17.7	40.0
Mazarron	8.6	6.9	36.3	13.8	19.1	71.7	1.0	3.9	41.7	53.5
AGUAS FLUVIALES										
Rio Segura (Nacimiento)	0.3	0.2	0.2	1.1	.6	.2	0.1	2.3	0.3	0.5
Rio Segura (Archena)	1.5	1.0	7.2	3.0	2.0	6.8	0.1	3.6	3.1	7.0
Rio Quipar	3.1	2.5	10.2	11.7	6.8	24.3	0.3	4.6	15.1	13.0
Merancho de Santomera	5.2	4.1	20.4	7.7	11.7	30.0	0.9	5.6	15.6	30.0
Trasvase	1.1	0.7	5.8	2.3	2.2	6.1	0.1	3.2	3.1	5.0
Los Alcazares Depuradora	8.0	6.4	32.2	7.8	13.6	51.0	0.6	5.4	16.7	56.5

El Boro, aunque suele estar presente en pequeñas concentraciones en la mayoría de las aguas, también es conveniente determinarlo debido a su elevada toxicidad. Otros parámetros que deben ser determinados son : la conductividad eléctrica (CE expresada en dS/m) que da una idea del contenido total de sales, el pH para conocer la acidez o alcalinidad y la relación de adsorción de sodio (RAS) que es el índice tradicionalmente utilizado para evaluar la sodicidad del agua de riego .Otros parámetros útiles que nos pueden orientar acerca de la calidad de un agua son el total de sólidos disueltos (TSD), expresados en g de sal L⁻¹, que se puede calcular aproximadamente multiplicando la CE en dS m⁻¹ por 0.640 en aguas no muy salinas y por 0.8 en aguas muy salinas, la suma total de cationes (TC) o aniones (TA), en mmol L⁻¹, que se calcula multiplicando la CE en dS m⁻¹ por 10. En determinados casos también es conveniente determinar otros componentes que se sospeche que puedan estar presentes o ser la causa de problemas

El cálculo del RAS se determina a partir de la siguiente formula:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

Las concentraciones de Na, Ca y Mg tienen que estar expresadas en meq L⁻¹

Cuando se consideran los procesos de disolución y precipitación de sales, se calcula el RAS ajustado, cuya fórmula es:

$$\text{RAS}_a = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}} [1 + (8.4 - \text{pH}_c)]$$

El valor del pH_c se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{pH}_c = (\text{pK}'_2 - \text{pK}'_c) + \text{p}(\text{Ca} + \text{Mg}) + \text{p}(\text{AlK})$$

donde pK'₂ y pK'_c son los logaritmos negativos de la segunda constante de disociación del H₂CO₃ y del producto de solubilidad del CaCO₃ respectivamente, ambos corregidos para la fuerza iónica (Bower et al.1965). p (Ca + Mg) y p (AlK) son los logaritmos negativos de las concentraciones de Ca + Mg y de CO₃ + HCO₃ respectivamente. En la Tabla 2 se presentan los valores de (pK'₂ - pK'_c), p (Ca + Mg) y de p (AlK) para las correspondientes concentraciones de iones (Bower et al. 1965).

Ejemplo. Para el cálculo del RAS ajustado del análisis del agua de Abanilla de la Tabla 1 tenemos que el pK'₂ - pK'_c se obtiene del valor de la suma en meq L⁻¹ de las concentraciones de Na + Ca + Mg en su correspondiente columna (5.0+4.4 +18.5 = 27.9). En nuestro ejemplo será 2.39.

El (Ca + Mg) se calcula a partir de la suma de las concentraciones de ambos iones y sustituyendo en su correspondiente columna (5.0 +4.4= 9.4). En nuestro caso será 2.30. El valor del p (AlK) se determina a partir de la suma de CO₃ + HCO₃ (0+3.6 =3.6) y su valor en nuestro ejemplo es de 2.40.

Sustituyendo los correspondientes valores en la ecuación, nos da un pH_c de 7.09. Por lo tanto, el valor del RAS ajustado será de 19.5.

Tabla 12 Cálculo del pH_c.

Concentración (meL ⁻¹)	(pK' ₂ - pK' _c)	p(Ca+ Mg)	p(AlK)
0.1	2.00	4.30	4.00
0.5	2.11	3.60	3.30
1	2.13	3.30	3.00
2	2.16	3.00	2.70
4	2.20	2.70	2.40
6	2.23	2.52	2.22

8	2.25	2.40	2.10
10	2.27	2.30	2.00
15	2.32	2.12	1.82
20	2.35	2.00	1.70
25	2.38	1.90	1.60
30	2.40	1.82	1.52
35	2.42	1.76	1.46
40	2.44	1.70	1.40
50	2.47	1.60	1.30

3.3.3 Criterios de calidad de un agua de riego

La calidad de un agua para riego debe ser evaluada en base a unos criterios indicativos de su potencialidad para producir en el suelo unas condiciones que puedan resultar peligrosas o adversas para el cultivo de plantas o de los animales o personas que las consuman.

Los criterios más comúnmente utilizados para la evaluación de la calidad están asociados a: 1) *salinidad*, basado en el efecto general de las sales sobre los cultivos, efecto osmótico, y está relacionado más a la cantidad total de sales que a los distintos iones individuales de la misma. 2) *sodicidad*, este es un criterio que pone de relieve el posible efecto adverso de la cantidad de sodio de cambio sobre el suelo cuando la relación de la concentración de Na^+ a la de $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$ es elevada, así como el efecto tóxico directo del sodio sobre las plantas, y 3) *Balance iónico*, que incluye la posible toxicidad desde un punto de vista nutricional, principalmente de los iones cloruro y sodio y en muchos casos también del boro. En este apartado también se consideran las relaciones $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$ o la posible presencia de elevados niveles de nitrato.

3.3.4 Origen de las sales del agua de riego

En todas las aguas utilizadas para el riego, bien sean de río, manantiales, subterráneas o de cualquier otra procedencia, del contenido total de sales, una parte de las mismas se puede considerar *natural* y otra parte se puede considerar *antropogénica o provocada* por el hombre.

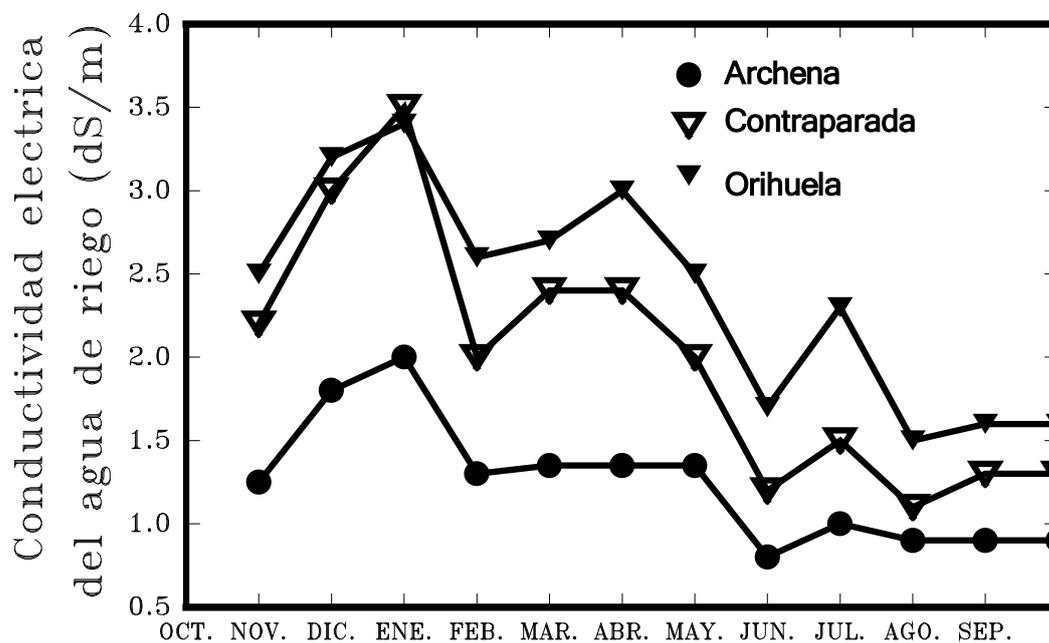
La salinidad natural de las aguas procede de la disolución de los materiales de los cauces por donde discurren, o en el caso de las subterráneas, por donde se ha producido la infiltración. De aquí que su contenido en sales dependa de las propiedades físico-químicas de dichos materiales. Al ser un proceso natural, el hombre puede influir poco o casi nada en el contenido de estas sales de origen natural. Sin embargo, las aguas suelen contener otra salinidad adicional como consecuencia de las actividades del hombre, bien sean de tipo industrial, urbano o agrícola, y es lo que se llama salinidad antropogénica o provocada.

Salinización industrial. Esta forma de salinización de las aguas de riego, producida por los vertidos de residuos industriales, se caracteriza por la gran diversidad de sustancias químicas y por la alta toxicidad de algunos de sus componentes. Este proceso se puede realizar bien por vertido directo a los cauces o porque muchas veces este tipo de residuos se almacenan en estanques, depósitos subterráneos, etc., que con lo cual con el tiempo pueden contaminar los acuíferos.

Salinización urbana. Los residuos procedentes de los núcleos urbanos que se vierten directamente sobre los ríos o en fosas sépticas son una fuente de contaminación. La intensidad de la mismas dependerá del volumen y de la naturaleza de los residuos. En este tipo de residuos, una atención especial merece la posible presencia de gérmenes patógenos por su incidencia en el aspecto sanitario. Cuando los residuos son sólidos, después de una lluvia intensa, los lixiviados de los mismos pueden alcanzar los cauces superficiales e incluso pueden ser percolados a los acuíferos. En zonas con bajas temperaturas durante el invierno, el aporte salino para el deshielo de las calles y carreteras también puede ser importante.

Salinización agrícola. Este tipo de salinización está muy extendido y además va en aumento como consecuencia no solo del aumento de la cantidad de fertilizantes aplicados para obtener cosechas más abundantes, sino también a la reutilización de las aguas para riego. En la Fig 1 se presenta un ejemplo de como la calidad del agua del río Segura va disminuyendo a medida que se acerca a su desembocadura, como consecuencia del vertido de los drenajes de los riegos de la parte alta de su cauce. En la figura Archena está más cerca del nacimiento y Orihuela más cerca de su desembocadura.

Aparte de este tipo de contaminación, el aporte de sales procedentes de compuestos nitrogenados, fosforados y potásicos puede ser también importante, principalmente la de nitrato. Otro aspecto de este tipo de salinización agrícola es la correspondiente a la aplicación de herbicidas, insecticidas, etc., por la toxicidad de alguno de estos compuestos.



3.3.5 Salinidad

La salinidad de un agua de riego se considera la suma de los cationes Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} y de los aniones Cl^- , SO_4^{-2} y HCO_3^- . Otros componentes, tales como K^+ , NO_3^- , B, etc., no se toman en cuenta cuando se considera este criterio para evaluar la calidad. Las aguas naturales utilizadas para el riego agrícola, cualquiera que sea su procedencia, generalmente no suelen presentar una concentración de sales lo suficientemente elevada

como para producir un efecto perjudicial inmediato en las plantas. Normalmente la concentración de sales, en este tipo de aguas, suele variar entre 0.1 y 4 g L⁻¹, de modo que cuando en un cultivo se apliquen 5.000 m³/ ha/año, estaremos añadiendo al suelo entre 500 y 20.000 kg de sales.

A medida que aumenta la cantidad de sales aportadas al suelo, disminuye el desarrollo de las plantas, ya que se reduce la capacidad de las mismas para absorber agua. La intensidad de este efecto, a su vez, dependerá de la solubilidad de las sales, siendo el cloruro y sulfato de sodio y magnesio, el bicarbonato de sodio y el cloruro de calcio las que contribuirán de un modo más notable a la salinidad del suelo. La incidencia de estos iones solubles sobre la menor disponibilidad de agua para las plantas es lo que se conoce como efecto osmótico. La disponibilidad del agua del suelo para la planta depende de la fuerza con que las partículas de aquel la retengan, *potencial mátrico* y de la cantidad de sales disueltas en el agua, *potencial osmótico*,

La disminución del contenido de agua del suelo se produce por evaporación y por la transpiración de las plantas. En ambos procesos lo que se pierde es casi agua sola, quedando las sales solubles en el suelo, lo que hace que disminuyan los potenciales mátrico y osmótico, esto es, se hacen más negativos. En la Figura 2 se ilustra este proceso.

Al disminuir el contenido de agua la concentración de sales aumenta, aunque el valor absoluto de las mismas no varíe. De aquí la importancia de mantener una humedad más o menos constante en el suelo para atenuar este proceso. La cantidad de agua de riego que se necesita para satisfacer las necesidades de los cultivos se puede calcular a partir del balance hídrico en la zona de raíces. Los cambios en el balance hídrico en el suelo se pueden expresar mediante la siguiente ecuación:

$$V_a = V_r + V_f + V_{ll} - V_e - V_t - V_d$$

de donde, V_a es el agua que hay almacenada en el suelo, V_r , es el agua aportada por el riego, V_f es el agua que asciende por capilaridad de la capa freática, V_{ll} , es el agua de lluvia, V_e es el agua perdida por evaporación del suelo, V_t , es el agua transpirada por los cultivos, V_d es el agua eliminada por drenaje.

La ecuación que expresa los cambios en las sales acumuladas en el suelo Q_s , se representa por la siguiente formula:

$$Q_s = V_r C_r + V_f C_f + V_{ll} C_{ll} + S_d + S_a - V_d C_d - S_c - S_p$$

donde S_d representa las sales disueltas por el agua de los minerales del suelos, S_a , las sales añadidas al suelo con el abonado o cualquier otra enmienda, S_c , las sales absorbidas por los cultivos y S_p las sales precipitadas. Los demás términos tienen el mismo significado que en la ecuación anterior.

De la primera ecuación, si la suma de los tres primeros términos ($V_r + V_f + V_{ll}$) es menor que la suma del agua perdida por evaporación y transpiración ($V_e + V_t$), el déficit de agua se suple con la extracción de agua de la reserva del suelo y se reduce si lo hay el drenaje. Con el tiempo el agua acumulada, V_a , se agota, lo cual conduce también a una disminución de la evapotranspiración. En estas condiciones, al no haber drenaje, las sales acumuladas conducen a una salinización gradual y continua de la zona de raíces. A medida que aumenta la concentración de las sales, aumenta también el efecto osmótico de las mismas sobre las plantas y si este proceso continuo finalmente las plantas mueren.

Para evaluar un agua de riego desde el punto de vista del contenido total de sales, hay que considerar una serie de factores externos tales como cantidad de agua aplicada en cada riego y frecuencia del mismo, tipo de suelo, tolerancia del cultivo a la salinidad, etc. Factores todos ellos interrelacionados entre sí. Por ello la calidad de un agua no es un valor absoluto, sino que depende de las condiciones específicas en que se va a utilizar.

3.3.6 Fracción y necesidad de lixiviación o lavado

Aunque en cultivos sin suelo la fracción de lixiviación tal y como se entiende cuando estamos cultivando en suelo es menos importante, adquiere una importancia enorme el concepto porcentaje de drenaje. Este se define como el tanto por ciento de agua que drena después de cada riego. Cuando estamos usando aguas de baja calidad un manejo óptimo del porcentaje de drenaje es crucial para evitar un aumento de la salinidad en la rizósfera. La teoría que a continuación describimos puede ser útil para el manejo de aguas salinas en cultivos sin suelo también.

La necesidad de eliminar las sales de la zona de raíces de la plantar, con lo cual evitamos la salinización del suelo, nos lleva al concepto de fracción de lixiviación (FL) que se define como el % del agua aplicada en el riego que pasa a través de la zona de raíces. La lixiviación que se necesita para mantener viable una agricultura en regadío, depende de la concentración de sales del agua de riego, del suelo y de la capa freática, de la tolerancia del cultivo a la salinidad, del clima, del tipo de suelo y del manejo del agua. El único modo económico para controlar la salinidad del suelo es asegurar un flujo neto de agua hacia abajo a través de la zona de raíces.

La ecuación que representa el balance de sales de un modo simplificado queda de la siguiente forma $V_r C_r + V_{II} C_{II} = V_d C_d$. Para ello se ha considerado que la cantidad de agua que asciende por capilaridad es insignificante y la diferencia entre los términos siguientes $(S_d + S_a) - (S_c + S_p) = 0$

De la ecuación simplificada, si el primer término es mayor que el segundo habrá una salinización del suelo, mientras que si el segundo es mayor que el primero ello no ocurrirá. En esta forma simple, dicha expresión se puede escribir como: $V_a C_a = V_d C_d$, y la FL se calcula del siguiente modo:

$$FL = \frac{V_d}{V_a} = \frac{C_a}{C_d} = \frac{CE_a}{CE_d}$$

donde FL es la fracción de lixiviación, V_d volumen de agua eliminado por drenaje, V_a volumen de agua aplicada (riego + lluvia), C_a es el contenido de sales en el agua aplicada, C_d el contenido de sales en el agua de drenaje, CE_a conductividad eléctrica del agua aplicada y CE_d conductividad eléctrica del agua de drenaje. De aquí para que un suelo no se salinice se tiene que cumplir el principio de que las sales que entren con el riego tiene que ser igual o menor de las que se eliminan por drenaje. La CE puede sustituir al contenido de sales C, especialmente cuando la mineralización y precipitación de las sales es insignificante.

La relación entre la FL y la salinidad de la zona de raíces es más importante en el manejo de la salinidad del suelo. La fracción mínima de lixiviación que representa la cantidad de agua de riego en exceso que debe pasar por la zona de raíces para que no aumente la concentración de sales en la zona de raíces de un cultivo para que no haya

disminución de rendimiento, es lo que se conoce como necesidad de lixiviación (NL) y se expresa por la fórmula:

$$NL = \frac{V * d}{V_a} = \frac{C_a}{C * d} = \frac{CE_a}{CE * d}$$

el * indica los valores requeridos. Como la CE es fácilmente determinada y está casi linealmente relacionada con la concentración de sales, la NL se expresa normalmente como una relación de las CE. Por ello la calidad de un agua de riego depende del suelo, de los cultivos, del agua disponible, del sistema de riego, de la experiencia del agricultor en alcanzar la NL y de la disminución de rendimiento que pueda ser tolerada.

Se han propuesto diversos métodos empíricos, para relacionar la CEd* con algún parámetro fácilmente medible de la salinidad del suelo. Bernstein (1964) supone que la CEd* es la conductividad eléctrica del extracto de saturación para el que el rendimiento en experimentos de tolerancia se redujo al 50%. Posteriormente, van Schilfgaarde et al. (1974) proponen que el valor sea considerado el doble de la conductividad eléctrica del extracto de saturación para rendimiento cero. Rhoades (1974) admite que la CEd* puede calcularse a partir de la siguiente fórmula: $CEd^* = 5CE_{umbral} - CE_{agua}$. Finalmente, Hoffman y van Genuchten (1983), comparan estos tres métodos para calcular CEd*, con otro, donde la NL se presenta como función de la CE del agua aplicada y del umbral de tolerancia a la salinidad del cultivo.

La calidad de un agua de riego desde el punto de vista de salinidad puede ser establecida relacionando la CEr, la FL, la media de la CE de la disolución del suelo CE_d a la capacidad de campo CE_{cc}, la CE_s y la tolerancia del cultivo a la salinidad (Rhoades, 1984). Si dividimos la zona de raíces en cuatro partes iguales, y asumimos que la pérdida de agua por evapotranspiración es de 0.4, 0.3, 0.2 y 0.1 desde el cuarto más superficial al más profundo, la CE_{cc} se calcula a partir de la de la CEr y del factor de concentración F_c, que es igual a 1/ FL en la parte más profunda de la zona de raíces. En la Tabla 3 se presenta la concentración relativa de solutos del agua del suelo comparada a la del agua de riego en relación a la profundidad de la zona de raíces y a la FL.

Tabla 13 Concentraciones relativas de solutos en el agua del suelo a la capacidad de campo comparada a la del agua de riego en relación a la profundidad en la zona de raíces y a la fracción de lixiviación.

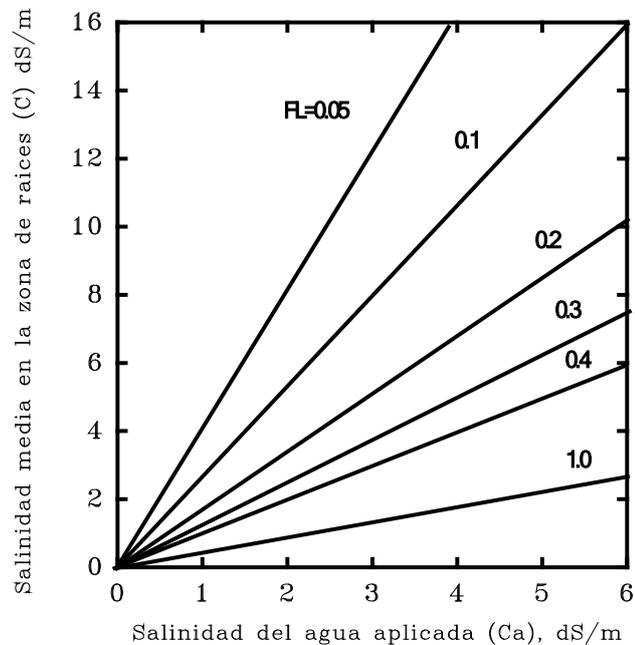
Zona de raíces		0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	40	1.61	1.56	1.47	1.39	1.32	1.25
2	70	3.03	2.70	2.27	1.96	1.72	1.54
3	90	7.14	5.26	3.57	2.70	2.17	1.82
4	100	20.00	10.00	5.00	3.33	2.50	2.00
Media F _c		5.58	3.76	2.58	2.06	1.74	1.54

Si tenemos en cuenta que la CE_s es alrededor de la mitad del valor de la CE_{cc}, los valores de F_c para calcular la CE_s a partir de la CE_{ar} son 2.79, 1.88, 1.29, 1.03, 0.87 y 0.77 para FL de 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 y 0.50 respectivamente.

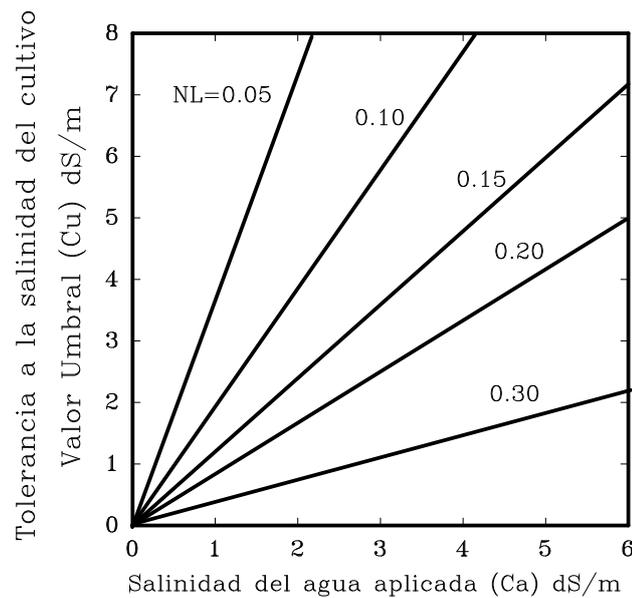
Hoffman y van Genuchten (1983) determinaron la linealidad de la salinidad media de la zona de raíces al resolver una ecuación continua para el flujo vertical unidimensional del agua a través del suelo y asumiendo una función exponencial de la absorción de agua. Cuando se alcanza el equilibrio en la ecuación del balance de sales, se puede introducir la concentración de sales en los cálculos. La linealidad media de la concentración de sales de la zona de raíces C como una relación de la concentración de sales del agua de riego C_r es:

$$\frac{C}{C_r} = \frac{1}{FL} + \frac{\delta}{zFL} + \ln \left[FL + (1-FL)e^{-\frac{z}{\delta}} \right]$$

siendo FL la fracción de lixiviación, Z la profundidad de la zona de raíces, d una constante empírica cuyo valor es $0.2z$. En la Fig se ilustra esta relación.



La relación entre la salinidad del agua aplicada, el valor umbral de la tolerancia a la salinidad del cultivo y la necesidad de lixiviación se representan en la Fig.



Ejemplo. Si queremos calcular la NL cuando regamos plantas de tomate con un agua de $CEar = 3 \text{ dS m}^{-1}$, siendo el valor umbral de este cultivo 2.5 dS m^{-1} y consideramos el agua aportada por la lluvia insignificante, utilizando la Fig. ultima, se deduce fácilmente que la $NL=0.2$.

Si la aportación de la lluvia la consideramos importante, debemos utilizar la ecuación $Va Ca = Vr Cr + VII CII$. La C significa contenido de sales, que en este caso es la CE y V es el volumen de agua y a,r,y II indican agua aplicada, de riego y de lluvia respectivamente. Vr es desconocido hasta que conozcamos la NL. Si el riego se aplica en función de la evapotranspiración y este valor es de 750 mm y la lluvia de 150 mm, entonces podemos considerar que $Vr = 900 \text{ mm}$. Por otra parte como $CII = 0$ y $Va = Vr + VII$, de la primera ecuación $Ca = Vr Cr / Vr + VII$ sustituyendo los correspondientes valores $3 \times 900 / 150 + 900 = 2.6$. Esto es la CE del agua aplicada es de 2.6 dS m^{-1} después de haber tenido en cuenta la dilución debida al agua de lluvia. Con este valor la $NL = 0.18$,

De todos estos conceptos se deduce que no se puede establecer una clasificación absoluta de un agua de riego, ya que excepto para algunos casos extremos ninguna agua para riego agrícola tiene una calidad inherente. Siempre la calidad real de un agua viene determinada en el contexto de las condiciones específicas de su uso, debido a que de este modo se consideran los numerosos factores externos que influyen en la calidad de la misma.

Han sido varias las clasificaciones que considerando unos parámetros u otros han evaluado la calidad del agua para uso agrícola. Algunas de ellas han sido tan específicas que incluso se han referido a un solo cultivo. Sin embargo, una característica común de todas ellas era que ninguna tenía en cuenta el drenaje ni tampoco la tolerancia del cultivo a la salinidad.

A modo orientativo, un agua se considera de calidad baja cuando el rendimiento de un cultivo regado con la misma se reduce más de un 25 %. Una clasificación arbitraria, pero que nos puede orientar acerca de los problemas que puede originar un agua en el suelo y en los cultivos con ella regados, es la que considera buena cuando la

CE es menor de 1.5 dS m^{-1} , media cuando la CE varía entre 1.5 y 3.5 dS m^{-1} y baja cuando la CE es mayor de 3.5 dS m^{-1} .

De una evaluación de más de 3000 análisis de agua para riego realizados en el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, el 8% de las mismas tenía una CE menor de 1.5 dS m^{-1} , el 37 % la CE estaba comprendida entre 1.5 y 3.5 dS m^{-1} y el 55 % tenía una CE mayor de 3.5 dS m^{-1} . (Martínez et al. 1987). Estos datos ponen de relieve la importancia que tiene en la Región de Murcia el aprovechamiento y manejo de los recursos de buena calidad y sin posibilidad de elección en muchos casos.

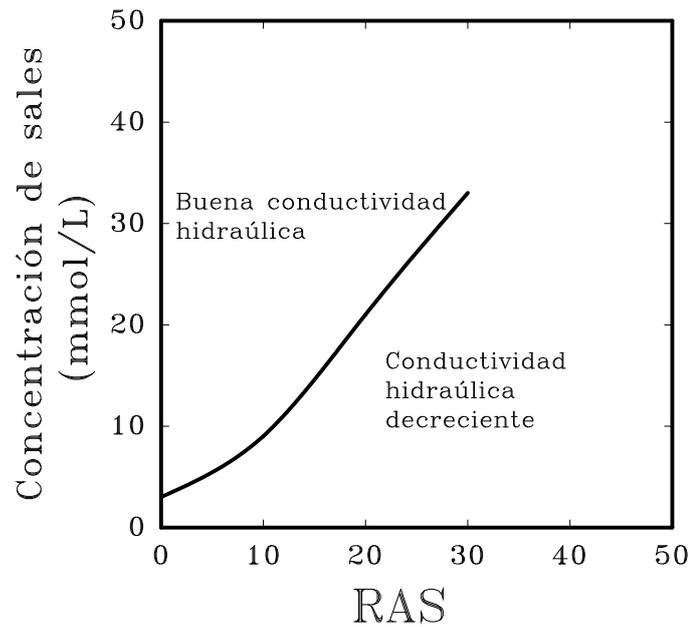
3.3.7 Sodicidad

En un agua para riego, además de la salinidad, para evaluar su aptitud para el riego es necesario considerar el grado en que los suelos absorberán el Na^+ aportado por el agua a través del proceso de intercambio catiónico. A diferencia de la salinidad, el exceso de Na^+ no altera la absorción de agua por las plantas, pero modifica la infiltración de la misma en el suelo. Por ello, el desarrollo de las plantas se puede afectar, no solo por la toxicidad del Na^+ , sino también por la falta de agua disponible para las mismas.

El porcentaje de sodio de cambio (PSC), que se define como la fracción de las posiciones de adsorción con carga negativa que estén ocupadas por el Na^+ . Si entre el 10 y el 20 % o más, de la capacidad de intercambio catiónico de un suelo está ocupado por Na^+ , las condiciones físicas del mismo se pueden deteriorar. Valores altos de PSC producen una disminución de la permeabilidad del suelo con la consiguiente dificultad para la infiltración del agua, aire, etc. Otros aspectos tales como germinación, enfermedades y control de malas hierbas, pueden requerir una atención especial en suelos de baja permeabilidad.

El parámetro más comúnmente utilizado para evaluar el peligro potencial de sodicidad de un agua de riego es el RAS. Aguas con valores elevados de este parámetro producen un PSC alto en el suelo debido a que el Na^+ del agua de riego desplaza al Ca^{+2} y al Mg^{+2} del complejo de cambio del suelo hasta que se alcanza un equilibrio entre el RAS del agua y el de la disolución del suelo. El PSC de un suelo puede ser estimado a partir del RAS del agua de riego por medio de la fórmula $\text{PSC} = 1.475 \text{ RAS} / (1 + 0.0147 \text{ RAS})$.

El peligro potencial de sodicidad de un agua es a menudo evaluado en función del RAS y la salinidad. Para un mismo valor del RAS, la disgregación de las partículas del suelo por un agua diluida es mucho mayor que la de una más salina. En la siguiente Figura se ilustra la relación entre el contenido de sales y el PSC para mantener la permeabilidad estable de un suelo.



El valor del RAS calculado del análisis de un agua superficial, normalmente representa el RAS del agua de riego sobre la superficie del suelo. Sin embargo, cuando consideramos el RAS en zonas más profundas tenemos que considerar la posibilidad de precipitación o disolución de CaCO_3 . Si consideramos que ninguno de estos procesos ocurre durante el periodo de riego, entonces cuando se alcanza el equilibrio, el RAS del agua de drenaje (RAS_{ad}) y el RAS_{ar} están relacionados por la ecuación

$$\text{RAS}_{ad} = \frac{1}{\sqrt{FL}} \text{RAS}_{ar}$$

ya que los valores del RAS aumentan con la raíz cuadrada de la concentración, que aumenta en el agua de drenaje según el factor de concentración $1/FL$. Sin embargo, el valor del RAS_{ad} resultante del uso del RAS_{ar} depende también de las reacciones del carbonato de calcio presente. Por esta razón para tener en cuenta estos fenómenos, se utiliza el RAS ajustado y la expresión que resulta es de la forma

$$\text{RAS}_{ad} = \frac{1}{\sqrt{FL}} \text{RAS}_{ar} [1 + (8.4 - \text{pHc}^*)]$$

Valores de pHc^* por encima de 8.4 indican una tendencia a disolver CaCO_3 del suelo, mientras que valores por debajo de 8.4 indican una tendencia a precipitar CaCO_3 del agua de riego. Al aumentar la FL se reduce la precipitación de CaCO_3 de las aguas y se favorece la disolución del mismo del suelo.

Un mayor ajuste de esta ecuación se obtiene cuando se tienen en cuenta todos estos procesos de mineralización, que varían con la fracción de lixiviación utilizada. El coeficiente que comprende todos estos cambios se recoge en la siguiente expresión

$$RAS_{ad} = \frac{y(1 + 2FL)}{\sqrt{FL}} RAS_{ar} [1 + (8.4 - pH_c^*)]$$

donde los valores de FL e y varían entre 0 y 1.

Los valores de primer paréntesis en esta ecuación son 2.06, 1.36, 1.03, y 0.83 para valores de FL de 0.1, 0.2 0.3 y 0.4 respectivamente. Esta ecuación se usa para predecir el PSC en el fondo de la zona de raíces, que en gran medida dependen de la FL alcanzada. En esta ecuación, el coeficiente y tiene un valor empírico cuyo valor es de 0.7, siendo constante para la mayoría de los suelos de las zonas áridas (Rhoades, 1968).

Con estas dos ecuaciones se puede estimar el PSC mínimo en la superficie y el máximo en la zona de raíces y por lo tanto conociendo los valores de PSC permitidos por las plantas cultivadas en unas determinadas condiciones de uso, nos puede indicar la calidad del agua de riego.

Otros parámetros utilizados para evaluar la calidad desde el punto de vista de sodicidad son % de sodio posible y el carbonato sódico residual (CSR) (Eaton (1950)). El primer parámetro se define utilizando la expresión:

$$\%Na_{posible} = \frac{Na \times 100}{Ca + Mg + Na - CO_3 - HCO_3}$$

y el CSR se define como $(CO_3 + HCO_3) - (Ca + Mg)$

Eaton al definir estos conceptos considera que los CO_3 y HCO_3 son precipitados cuantitativamente en el suelo al límite del contenido de Ca^{+2} y Mg^{+2} en el agua de riego. Sin embargo, como hemos visto antes, esto no es totalmente cierto, sino que esta precipitación varía con la FL y la concentración de CO_2 en la atmósfera del suelo.

Los rangos de los parámetros más corrientemente utilizados para evaluar la sodicidad de un agua de riego son para el RASaj: cuando es menor de 8 el agua es buena, entre 8 y 16 es media y mayor de 16 es baja. Para el carbonato sódico residual, los correspondientes valores son, menos de 1.5, entre 1.5 y 2.8 y más de 2.8 respectivamente. De las aguas de la Región de Murcia antes citadas, entre el 73 y el 99% se pueden considerar adecuadas, cuando los parámetros de sodicidad empleados son el RAS o el CSR.

3.3.8 Balance iónico

Algunas aguas de riego, aún con contenido total de sales y RAS bajos, pueden no ser adecuadas para el riego debido a la presencia de determinados iones, tales como Cl^- , Na^+ y B que, aún en concentraciones relativamente pequeñas, pueden ser absorbidos y acumulados en cantidades excesivas por las plantas produciendo una toxicidad específica en las mismas.

La toxicidad del Cl^- y Na^+ ha sido establecida para ciertas plantas, aunque es difícil discernir entre los efectos tóxicos y los desequilibrios nutricionales que los mismos producen en las plantas, ya que en la mayoría de los casos van solapados y dependen de la especie de planta utilizada. Concentraciones de Na^+ menores de 0.25,

entre 0.25 y 0.6 y mayores de 0.6 g L⁻¹ hacen que las aguas se consideren como de calidad buena, media o baja respectivamente. Los correspondientes valores para el Cl⁻ son: menos de 0.3, entre 0.3 y 0.7 y mayores de 0.7 g L⁻¹. Para el B, estos rangos están comprendidos entre menos de 1, entre 1 y 3.5 y más de 3.5 mg L⁻¹.

Otro aspecto que tenemos que considerar es la relación de Mg⁺²/Ca⁺². Valores elevados de la misma pueden producir una deficiencia de Ca⁺², independientemente de que la concentración de este elemento en el agua sea elevada. Las necesidades de Ca⁺² también son mayores a pH bajos. Directrices específicas para las relaciones de cationes no se pueden establecer, debido a que cada cultivo varía ampliamente respecto a la composición catiónica.

También es conveniente considerar los llamados elementos traza, que pueden estar presentes en las aguas y en la disolución del suelo a concentraciones muy bajas del orden de pocos mg L⁻¹, incluso en el rango de ng L⁻¹. Algunos son esenciales para las plantas y los animales, pero a elevadas concentraciones resultan tóxicos. No hay prácticamente los suficientes datos para determinar los criterios de calidad de estos elementos en el agua de riego. Las recomendaciones que usualmente se indican están basadas en experimentos en cultivos hidropónicos, en arena, etc. Las concentraciones máximas (en mg L⁻¹) recomendadas de los siguientes elementos traza para el riego agrícola son: 0.01 para el Cd y Mo, 0.02 para el Se, 0.05 para el Co, 0.1 para As, Be Cr, y V, 0.2 para el Cu, Mn y Ni, 0.5 para el Zn, 2.5 para el Li, y 5 para el Pb.

4 Conclusiones

En el presente estudio se describe el estado actual de la producción de plantas hortícolas en cultivos sin suelo en relación a la nutrición mineral de las plantas. Uno de los aspectos críticos y por tanto de suma importancia en la producción de hortícolas en cultivos sin suelo es la composición de la solución nutritiva, y el manejo que se hace de esta a lo largo del ciclo de cultivo. Se comienza definiendo que se entiende por nutriente esencial, pasando a enumerar y describir cada uno de los once nutrientes esenciales para prácticamente la totalidad de las plantas cultivadas. Estos son nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio, y magnesio, llamados macronutrientes por se necesitan a concentración relativamente elevadas. El otro grupo de denominados micronutrientes serían el hierro, cobre, manganeso, zinc, boro y molibdeno. Se describe el papel que tienen estos elementos en la planta, así como síntomas de deficiencia o de toxicidad. Una vez definidos los componentes que debe llevar una solución nutritiva, se describen la composición de las soluciones nutritivas más utilizadas, así como las sales o fertilizantes más utilizados para su preparación.

El siguiente apartado que determina en parte la solución nutritiva óptima que se debe utilizar es el sistema de cultivo. Las plantas desarrolladas en cultivos sin suelo pueden crecer sobre sustratos, tales como arena, perlita, fibra de coco etc o a raíz desnuda, en sistemas hidropónicos como NFT, NGS o cultivos flotantes, donde las raíces están en contacto directamente con la solución nutritiva o sumergidas en la misma.

La solución nutritiva tiene dos componentes fundamentales, los nutrientes minerales esenciales y el agua. En la tercera parte del estudio se habla de las necesidades de agua, de la optimización de la fertirrigación y de la calidad agronómica del agua. Este último aspecto es fundamental ya que uno de los problemas más importantes que amenaza la producción agrícola es la salinidad. Este problema es característico de zonas áridas y semiáridas, donde la pluviometría es escasa y la calidad de las disponibles para riego de media o baja. Se describen los parámetros principales que definen la calidad del agua como la conductividad eléctrica, la presión osmótica, el SAR etc. Los equilibrios óptimos en una solución nutritiva deben definirse teniendo en cuenta la calidad del agua de riego, la especie cultivada, el sistema de cultivo, el

sustrato empleado, la etapa de desarrollo del cultivo y las condiciones climáticas existentes (estación donde se desarrolla el cultivo).

5 Bibliografía

- Abad, M., Martínez, M.D., Cegarra, J. Roig, A., Navarro, A.F., y Martínez, J., 1993. El compost de residuos y subproductos orgánicos como componentes de los medios de cultivo de las plantas ornamentales cultivadas en maceta. *Actas de Horticultura* 10:1191-1196.
- Abad, M., Noguera, P. y Noguera, V., 1997. Crecimiento de plantas ornamentales de hoja en sustratos de cultivo a base de fibra de coco. *Actas de Horticultura* 17:76-81.
- Abou-Hadid, A.F.; Al-Beltagy, A.S.; Burrage, S.W. (1987). Comparison of hydroponic systems for tomato. *Egypt Journal of Horticulturae* 14, 19-130.
- Alarcón, A. L.; Madrid, R.; Romojaro, F. and Molina, E. 1998. Calcium forms in leaves of muskmelons (cv. Revigal) plants tested with different calcium compounds. *Journal of Plant Nutrition*, 21(9): 1897-1912.
- Alarcón, A. L.; Madrid, R.; Egea, C. and Guillén. 1999. Calcium deficiency provoked by the application of different forms and concentrations of Ca⁺² to soil-less cultivated muskmelons. *Scientia Horticulturae*, 81: 89-102.
- Alarcón, A.L.; Murcia, F. (2000). Cultivo en fibra de coco. En: *Tecnología para cultivos de alto rendimiento, Novedades Agrícolas. Eds., (Murcia, España), 245-253.*
- Boman, B J., M. Zekri and E. Stove. 2005. Managing salinity in citrus. *HortTechnol.* 15:108-112.
- Bower, T. G. R. (1965, July 2). Stimulus variables determining space perception in infants. *Science*, 149, 88–89.
- Castilla, N.; Hernández, J.; Aboud-Hadid, A.F. 2004. Strategic crop and greenhouse management in mild winter climate areas. ISHS International Horticultural Congress. Symposium -16. Toronto. Canada. *Acta Horticulturae*, 633: 183-196.
- Castilla, N.; Hernández, J. 2005. The plastic greenhouse industry of Spain. *Chronica Horticulturae*, 45(3): 15-20.
- De Kreij C. 1996. Interactive effects of air humidity, calcium and phosphate on blossom-end rot, leaf deformation, production and nutrient contents of tomato. *Journal of Plant Nutrition* 19: 361–377.
- Del Amor, F. M., V. Martínez, and A. Cerda. 2001. Salt tolerance of tomato plants as affected by stage of plant development. *Hortscience* 36 (7):1260-1263.
- Dorais, M., A. P. Papadopoulos, and A. Gosselin. 2001. Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie* 21 (4):367-383.
- Flores, P., M. A. Botella, A. Cerda, and V. Martínez. 2004. Influence of nitrate level on nitrate assimilation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants under saline stress. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 82 (2):207-213.
- Fujiyama, H. y Nagal. 1987. Effects of fertilizar and irrigation method on growth and nutrient uptake of tomato. *Soil Sci. pH nutrient.* 33(3): 461-470.
- Gruda, N. & Schnitzler, W.H. 2006. Wood fiber substrates as a peat alternative for vegetable production. *Eur. J. Wood Prod.*, 64: 347–350.
- Gruda, N. 2009. Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables? *J. Applied Botany & Food Quality*, 82: 141–147.
- Gruda, N., Prasad, M. & Maher, M.J. 2006. Soilless Culture. In: R. Lal (ed.) *Encyclopedia of soil sciences*. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA.
- Helalia, A.M., O.A. Tahir and Y.A. Al-Nabulsi, 1996. The influence of irrigation water salinity and fertilizer management on the yield oh alfalfa (*Medicago sativa*). *Agric. Water Manage.*, 31: 105-114.
- Hoffman, G.H., Van Genuchten, M.Th., 1983. Soil properties and efficient water use: water management for salinity control. In: Taylor, H.M., Sinclair, T.R. (Eds.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 73-85.

- Mancini, L. y Scarascia Mugnossa, G. (1993). Yield y quality of Chinese cabbage grown on sand culture y NFT system, *Acta Horticulturae* 361, 578-582.
- Martínez, P.F.; Abad M. (1992). Soilless culture of tomato in different mineral substrates. *Acta Horticulturae* 323, 1-259.
- Mitchell, J. P., C. Shennan, S. R. Grattan, and D. M. May. 1991. TOMATO FRUIT YIELDS AND QUALITY UNDER WATER DEFICIT AND SALINITY. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 116 (2):215-221.
- Paranychianakis, N. V., and K. S. Chartzoulakis (2005), Irrigation of Mediterranean crops with saline water: From physiology to management practices, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 106, 171–187, doi:10.1016/j. agee.2004.10.006.
- Pardossi A, Tognoni F, Incrocci L (2004) Mediterranean greenhouse technology. *Chron Horticult* 44(2):28–34
- Peet, M. M., D. H. Willits, and R. Gardner. 1997. Response of ovule development and post-pollen production processes in male-sterile tomatoes to chronic, sub-acute high temperature stress. *Journal of Experimental Botany* 48 (306):101-111.
- Ragab R, Malash N, Abdel Gawad G, Arslan A, Ghaibeh A (2005a) A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management. 1. The SALTMED model and its calibration using field data from Egypt and Syria. *Agric Water Manag* 78:67–88
- Raviv, M.; Wallach, R.; Silber, A.; Bar-Tal, A. (2002). Substrates y their analysis. Hydroponics productions of vegetables and ornamentals. *Embryogenesis Published Athens, Greece* 25-102.
- Roupshael, Y., and G. Colla. 2004. Modelling the transpiration of greenhouse zucchini crop grown under Mediterranean climate using the Penman-Monteith equation and its simplified version. *Australian Journal of Agricultural Research* 55:931-937.
- Savvas, D. and C. Adamidis, 1999. Automated management of nutrient solutions based on target electrical conductivity, pH, and nutrient concentration ratios. *Journal of Plant Nutrition* 22 (9): 1415-1432.
- Savvas, D., 2001. Nutritional management of gerbera (*Gerbera jamesoni*) grown in a closed soilless culture system. *Acta Horticulturae*, 554: 175-182.
- Savvas, D., V.A. Pappa, G. Gizas, and A. Kotsiras. 2005. NaCl accumulation in a cucumber crop grown in a completely closed hydroponic system as influenced by NaCl concentration in irrigation water. *Euro. J. Hort. Sci.* (in press).
- Sahin, U.; Anapali, O.; Hanay, A. (2002b). The effect of consecutive applications of leaching water applied in equal, increasing or decreasing quantities on soil hydraulic conductivity of saline sodic soil in the laboratory. *Soil Use and Management* 18, 152-154.
- Spensley, K.; Winsor, G.W.; Cooper, A.J. (1978). Nutrient film technique-crop culture in flowing nutrient solution. *Outlook on Agriculture* 9, 299-305.
- Urrestarazu, M. 2004. Bases y sistemas de cultivos sin suelo. En: Tratado de cultivo sin suelo. Ed. Urrestarazu. Pp. 305-368. 3ª ed. Mundi-Prensa. Servicio de Publicaciones, Universidad de Almería.