MONOGRAFÍAS AGROAMBIENTALES

2

MANUAL DE FERTIRRIGACIÓN SOSTENIBLE

CÁLCULO DE SOLUCIONES NUTRITIVAS EN SUELO Y SIN SUELO

Belarmino Santos Coello y Domingo Ríos Mesa



MANUAL DE FERTIRRIGACIÓN SOSTENIBLE

CÁLCULO DE SOLUCIONES NUTRITIVAS EN SUELO Y SIN SUELO

Gobierno de Canarias

Consejería de Agricultura, Ganadería,
Pesca y Soberanía Alimentaria.
Dirección General de Agricultura
Gobierno de Canarias

Área de Industria, Comercio,
Sector Primario y Bienestar Animal
Cabildo Insular de Tenerife

Edita
Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Soberanía Alimentaria. *Gobierno de Canarias*
Área de Industria, Comercio, Sector Primario y Bienestar Animal. *Cabildo Insular de Tenerife*

Textos
Belarmino Santos Coello
Domingo Ríos Mesa

Maquetación
Iván Marrero López · Distinto Creatividad

Impresión
Gráficas Sabater

Depósito Legal: TF 804-2024
ISBN: 978-15012-36-8

Prohibida la reproducción total o parcial de los textos o imágenes sin la autorización expresa de los autores

PREFACIO

La formulación de las soluciones nutritivas para fertirrigación es una parte importante de la técnica agronómica, siendo uno de los asesoramientos más solicitados al personal técnico. Sin embargo, no se ha dado nunca demasiado protagonismo al cálculo teniendo en cuenta que la forma de expresar esa solución nutritiva o "abonada" debe estar adaptada al sistema de inyección de los abonos y al perfil de las personas que finalmente van a manejar las instalaciones de fertirrigación.

Esta publicación surge a finales de los años 90 del siglo pasado a partir de unos apuntes que se prepararon para un curso de fertirrigación destinado al personal técnico de campo de cooperativas de la zona sur de Tenerife y que se han usado para ayudar en la formación en otros sectores durante los últimos 25 años.

Muchas de las experiencias del trabajo de campo en común con el personal técnico de las Agencias de Extensión Agraria y de las explotaciones de la isla de Tenerife han ayudado a que este libro se haya ido enriqueciendo.

El manejo correcto de la fertirrigación es cada vez más importante con el horizonte del Pacto Verde Europeo y la reducción en el uso de fertilizantes en un 20% y del 50% en el caso de pérdidas de nutrientes. Por otra parte, el Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios establece una serie de normas en la fertilización, como el requerimiento a las explotaciones agrícolas de tener planes de abonado, donde deben figurar claramente las cantidades aportadas de nutrientes, firmado por personal técnico. Finalmente, en zonas sensibles a nitratos, tanto la cantidad total de nitrógeno aportada como la concentración

de nitratos en cada riego debe calcularse de forma que no se sobrepasen los valores legales.

En esta segunda edición hemos intentado corregir los errores de la anterior además de ampliar algunos conceptos y el número de ejemplos resueltos a más de 40. Queremos agradecer las aportaciones y sugerencias de todas las personas que han participado en los cursos de fertirrigación y muy especialmente al personal técnico y a los agricultores con los que hemos trabajado en campo.

Este libro, pretende ser un manual de fertirrigación sostenible para técnicos agrícolas, a la vez que servir de apuntes para los estudiantes que cursen asignaturas de Producción Vegetal del Grado de Ingeniería Agrícola y del Medio Rural y del Master Universitario en Ingeniería Agronómica de la Universidad de La Laguna.

Al final de la publicación se presenta la bibliografía usada para la realización de este manual.

No queremos dejar pasar la ocasión de agradecer a todas las personas que de una u otro manera han colaborado en la redacción de este manual. También nuestro agradecimiento a la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Soberanía Alimentaria del Gobierno de Canarias, y al Área de Industria, Comercio, Sector Primario y Bienestar Animal del Cabildo Insular de Tenerife, por la edición de esta publicación.

Los Autores.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 9

2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMULACIÓN DE SOLUCIONES NUTRITIVAS 13

2.1. Concentración de la solución 13

2.2. Relaciones entre iones 21

2.3. Conductividad eléctrica 27

2.4. pH de la solución nutritiva 31

2.4.1. El pH y los fosfatos 32

2.4.2. El pH y la elección de los quelatos 34

2.4.3. El control del pH mediante el equilibrio de las especies carbonatadas 36

2.4.4. La modificación del pH radicular mediante la relación amonio / nitrato 39

2.5. Temperatura de la solución nutritiva 43

3. FERTILIZANTES 45

3.1. Fertilizantes que aportan macronutrientes 46

3.1.1. Los abonos complejos 54

3.1.2 Los ácidos y la acidificación de soluciones nutritivas 57

3.2.2. Alcalinización de soluciones nutritivas 69

3.2. Abonos con micronutrientes 72

4. CÁLCULO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA 77

4.1 Ajuste de los macroelementos en cultivos en suelo 77

4.1.1. Elección de la concentración de fertilizantes 77

4.1.2. Cálculo de soluciones nutritivas mediante sistemas de ecuaciones 88

4.1.3. Cálculo de soluciones nutritivas mediante tanteo 109

4.2. Ajuste de los macroelementos en cultivos sin suelo 120
4.2.1. Procedimiento general 120
4.2.2. Cálculo de soluciones nutritivas sin suelo con aguas con alta alcalinidad y/o con bajos aportes de nitratos 133
4.3. Ajuste de los microelementos 147
4.4. Cálculo de la CE aproximada de la solución nutritiva 150
4.4.1. Método de los equivalentes 152
4.4.2. Método gravimétrico 154
4.5. Evaluación de los problemas de precipitación 160
4.5.1. Estima de la precipitación de fosfato dicálcico. 161
4.5.2. Estima de la precipitación del sulfato de calcio 164

5. INCORPORACIÓN DEL ABONO EN EL AGUA DE RIEGO 171
5.1. Sistemas de inyección de fertilizantes 171
5.2. Cálculo de las cantidades de abono a utilizar 177
5.2.1. Preparación de soluciones madre para sistemas con una sola cabeza inyectora 186
5.2.2. Preparación de soluciones madre para formular distintas soluciones nutritivas en un mismo automatismo. 191

6. COLOCACIÓN DE LOS ABONOS EN LOS TANQUES 203
6.1. Incompatibilidades químicas en los tanques 203
6.1.1. El número de tanques y la elección de abonos para disolver 206
6.2. La importancia de la solubilidad en las soluciones madre 215
6.3. Otras cuestiones de manejo de los tanques de soluciones madre 226

7. ALGUNAS CONSIDERACIONES PRÁCTICAS SOBRE EL MANEJO DE SISTEMAS DE FERTIRRIGACIÓN 231

8. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA 239

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La fertirrigación es la aportación de los fertilizantes disueltos en el agua de riego. La combinación del riego localizado y de la fertirrigación es una herramienta muy importante para el ahorro de agua y nutrientes en la agricultura. Las ventajas de la fertirrigación son muy importantes:

- Permite el ajuste de las dosis de nutrientes a las necesidades de la planta en cada momento de su ciclo vegetativo.

- Localiza los nutrientes a lo largo de todo el perfil del bulbo explorado por las raíces.

- Permite una mejor asimilación de los nutrientes, al mantenerse relativamente constante la humedad del bulbo

- Los puntos anteriores hacen que la fertirrigación permita tener menores pérdidas de nutrientes por lixiviación y por volatilización, y por lo tanto es normalmente una técnica más sostenible que otras técnicas tradicionales de fertilización.

- Permite una corrección relativamente rápida de deficiencias nutricionales.

- Permite un mejor manejo de aguas salinas.

- El sistema tiene una mayor facilidad de aplicación y ahorro de mano de obra frente a sistemas tradicionales de fertilización, ya que es susceptible de automatización.

Sin embargo, también tiene desventajas:

- Es un sistema normalmente asociado al riego localizado, por lo que tiene costes de instalación relativamente más altos que otros métodos.

- Las ventajas como la mejor dosificación y las menores pérdidas por lixiviación dependen del buen diseño y mantenimiento de la instalación de riego localizado.

- **Para la aplicación correcta de esta técnica y disfrutar de las ventajas arriba citadas, las personas que la utilizan deben tener una adecuada preparación.**

Se podría definir una solución nutritiva como una disolución acuosa que contiene oxígeno y parte o la totalidad de todos los nutrientes completamente disociados en forma disponible para la planta. Dentro de estos nutrientes aportables, se encontrarían los siguientes elementos:

- macroelementos: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre

- microelementos: hierro, manganeso, cobre, cinc, boro, molibdeno y cloro. También se considerarían microelementos al níquel y el vanadio.

El níquel (Ni) y el vanadio (V) son microelementos que normalmente no se aplican en las soluciones nutritivas, debido a que con las propias impurezas de otros fertilizantes se completan sus necesidades. Las aguas de riego tienen concentraciones suficientes y normalmente en exceso de cloro.

- elementos beneficiosos: dentro de estos elementos tendríamos al sodio (Na), silicio (Si), cobalto (Co), selenio (Se) y aluminio (Al). Un elemento beneficioso se caracteriza por:

  - Sólo son esenciales para algunos cultivos (por ejemplo, el cobalto en leguminosas)

  - No son esenciales, pero favorecen el desarrollo de la planta (como el silicio).

El silicio sólo se suele añadir a las soluciones nutritivas en cultivos sin suelo cuando no hay fuentes de ese elemento. Éste sería el caso de determinados sustratos regados con aguas muy pobres en sílice. Este elemento suele aportarse también para mejorar el comportamiento en situaciones de estrés en algunos cultivos.

CAPÍTULO 2

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMULACIÓN DE SOLUCIONES NUTRITIVAS

Aunque esta publicación se centra en el cálculo de soluciones nutritivas, se va a hacer un repaso somero de algunos aspectos importantes a la hora de formular dichas soluciones.

2.1 Concentración de la solución

Los nutrientes son tomados normalmente por la planta disueltos en agua en forma de iones: cationes si tienen carga positiva y aniones si la tienen negativa. La planta toma esos nutrientes en unos rangos de concentración más o menos amplios. La cantidad de iones se puede expresar en la unidad de concentración, además de como masa (mg), en moles y en equivalentes:

- **mol:** se define como la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas partículas elementales (átomos o moléculas) como átomos hay en 0.012 kg de carbono 12. En la práctica, la masa de un mol coincide con la masa atómica o molecular de la partícula elemental.

- **equivalente:** referido a mol, sería el resultado de multiplicar éste por la valencia de la partícula elemental. En las soluciones nutritivas, la valencia coincide con el número de cargas del ión. Actualmente se tiende a usar el término mol de carga (mol_c) en vez de equivalente. En la tabla 1 se presentan las valencias de los iones normalmente presentes en la solución nutritiva.

La concentración de los diferentes nutrientes de la solución (cantidad de soluto en miligramos, milimoles o miliequivalentes por cada litro de disolución) suele venir dada de tres maneras:

- **miligramos por litro (mg/L).** Es una unidad que equivaldría en soluciones nutritivas a partes por millón (ppm). A efectos de cálculo, esta unidad es equivalente a g/m^3. En algunas referencias, para microelementos se usa como unidad microgramos/L (µg/L), equivalentes a partes por billón (ppb).

- **milimoles por litro (mmol/L).** En el caso de los microelementos se usan los micromoles/L (µmol/L).

- **miliequivalentes por litro (meq/L)**, o milimoles de carga por litro ($mmol_c/L$).

En cultivos sin suelo se utilizan las tres unidades de concentración: la primera unidad se encuentra mucho en las publicaciones de los países anglosajones e Israel, la segunda es utilizada por los autores neerlandeses, mientras que la mayoría de las referencias francesas vienen en la tercera. En esta publicación se usará como unidad de concentración mmol/L en el cálculo de soluciones nutritivas para cultivos sin suelo, al ser la unidad más usada por los técnicos de la zona sureste de España y Canarias en cultivo sin suelo.

En el caso de soluciones para cultivos en suelo se podría utilizar como unidad de concentración mg/L. En muchas referencias de fertirrigación en cultivos en suelo, los aportes de nutrientes se refieren a una superficie (g/m^2, g/planta, kg/ha). En este caso, se debe tener en cuenta los aportes de agua al cultivo para calcular las concentraciones.

En algunas referencias, se usa la fórmula del ión entre corchetes cuando se habla de concentración, normalmente referida a mol/L, aunque puede usarse con otras formas de expresar la concentración. Así, por ejemplo $[Ca^{2+}]$ sería la concentración de ión calcio en mol/L.

En la tabla 1 se presenta un listado de los elementos con los que normalmente se pueden encontrar en la solución nutritiva, su masa atómica, la forma iónica más frecuente en la que se presentan, la masa molecular de sus iones y su valencia.

Tabla 1: Masas moleculares de los iones normalmente presentes en la solución nutritiva

Elemento	masa atómica	forma iónica	masa molecular	Valencia
Nitrógeno (N)	14.0	NO_3^-	62.0	1
		NH_4^+	18.0	1
Fósforo (P)	31.0	$H_2PO_4^-$	97.0	1
		HPO_4^{2-}	96.0	2
Potasio (K)	39.1	K^+	39.1	1
Calcio (Ca)	40.1	Ca^{2+}	40.1	2
Magnesio (Mg)	24.3	Mg^{2+}	24.3	2
Azufre (S)	32.1	SO_4^{2-}	96.1	2
Sodio (Na)	23.0	Na^+	23.0	1
Cloro (Cl)	35.5	Cl^-	35.5	1
Carbono (C)	12.0	HCO_3^-	61.0	1
		CO_3^{2-}	60.0	2
Hierro (Fe)	55.9	Fe^{2+}	55.9	2
Manganeso (Mn)	54.9	Mn^{2+}	54.9	2
Boro (B)	10.8	$B(OH)_4^-$	62.8	1
		H_3BO_3	61.8	0
Cinc (Zn)	65.4	Zn^{2+}	65.4	2
Molibdeno (Mo)	95.9	MoO_4^{2-}	159.9	2

En el caso del fósforo, el carbono y el boro, las diferentes formas iónicas dependen principalmente del pH de la solución en que se encuentren disueltas. En los apartados 2.4.1 y 2.4.3 se tratará con detalle el comportamiento de los fosfatos y de los carbonatos.

Ejemplo 2.1.1: **En la reglamentación de zonas sensibles a nitratos de Canarias se señala un aporte medio de 60 kg/ha de nitrógeno en el mes de junio en un cultivo determinado. Queremos saber la concentración media de Nitrógeno (en mg/L, y en mmol/L) si consideramos un gasto de agua en ese mes de 855 m^3/ha:**

$$\frac{60\frac{kg}{ha}\ N}{855\frac{m^3}{ha}} = 0.0702\ kg/m^3 = 70.2\ g/m^3 = \mathbf{70.2\ mg/L\ N}$$

$$\frac{70.2\ mg/L}{14\ (\text{masa atómica del N})} = \mathbf{5.01\ mmol/L\ N}$$

Esta podría ser la concentración media de N (en mg/L N o en mmol/L) a aportar durante el mes de junio para cumplir la reglamentación para el gasto de agua considerado.

Ejemplo 2.1.2: **En un cultivo de pimiento se recomienda en un momento dado una dosis de abono de 1 gramo/planta y riego. Si en un momento dado estamos aportando una dotación de riego de 1.8 L/planta y riego, calcular la concentración total de abono:**

$$\frac{1{,}0\ \frac{g}{planta.riego}}{1.8\ \frac{L}{planta.riego}} = 0.556\ g/L = \mathbf{556\ mg/L\ de\ abono}$$

Para pasar de una forma de concentración a otra se divide la concentración en mg/L por la masa atómica o molecular y se obtienen los mmol/L. Si se multiplican los mmol/L por la valencia, se obtiene la concentración en meq/L.

$$\frac{\text{mmol}}{\text{L}} = \frac{\frac{\text{mg}}{\text{L}}}{\text{Masa molecular}} \qquad \frac{\text{mmol}}{\text{L}} = \frac{\frac{\text{meq}}{\text{L}}}{\text{Valencia}} \qquad \frac{\text{mmol}}{\text{L}} = \frac{\text{meq}}{\text{L}} . \text{Valencia}$$

$$1000 . \frac{\text{mmol}}{\text{L}} = \frac{\mu\text{mol}}{\text{L}} \qquad \frac{\mu\text{mol}}{\text{L}} = \frac{1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{\text{Masa molecular}}$$

Ejemplo 2.1.3: **¿Cuántos meq/L y mmol/L hay en 80 mg/L de calcio?:**

$$\frac{80 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{40 \text{ (masa atómica Ca)}} = \textbf{2 mmol/L Ca}$$

2 mmol/L Ca . 2 (valencia del calcio)= **4 meq/L Ca**

Ejemplo 2.1.4: **Un análisis de agua da una concentración de 2.1 meq/L de Mg^{2+} y se desea pasar a mmol/L y mg/L:**

$$\frac{2.1 \frac{\text{meq}}{\text{L}}}{2 \text{ (valencia } Mg^{2+})} = \textbf{1.05 mmol/L } \mathbf{Mg^{2+}}$$

1.05 mmol/L . 24.3 (m. atómica Mg) **= 25.5 mg/L Mg^{2+}**

Ejemplo 2.1.5: **Se necesita averiguar la concentración en mg/L y en ppb que equivale a 15 µmol/L de hierro (Fe):**

$$15\ \mu mol/L \cdot \frac{56\ (masa\ \ molecular\ Fe)}{1000} = \mathbf{0.84\ mg/L\ Fe}$$

$$0.84\ mg/L \cdot 1000 = 840\ \mu g/L = \mathbf{840\ ppb}$$

Por otra parte, los macronutrientes se suelen expresar en forma de óxidos en cultivo en suelo, salvo el nitrógeno. Para pasar de mg/L de óxido o ión a mg de elemento y a mmol/L de ión, se pueden usar las reglas de paso de la tabla 2, obtenidas mediante las fórmulas anteriores:

Tabla 2: Paso de unidades de iones a óxidos

mmol ión		mg elemento		mg óxido		mg ion
1 mmol NO_3^-	=	14 mg N- NO_3	=	---	=	62.0 mg NO_3^-
1 mmol NH_4^+	=	14 mg N- NH_4^+	=	---	=	18.0 mg NH_4^+
1 mmol $H_2PO_4^-$*	=	30.97 mg P	=	70.97 mg P_2O_5	=	96.97 mg $H_2PO_4^-$*
1 mmol PO_4^{3-}*		30.97 mg P	=	70.97 mg P_2O_5	=	94.97 mg PO_4^{3-}*
1 mmol K^+	=	39.10 mg K	=	47.10 mg K_2O	=	47.10 mg K^+
1 mmol Ca^{2+}	=	40.08 mg Ca	=	56.08 mg CaO	=	40.08 mg Ca^{2+}
1 mmol Mg^{2+}	=	24.31 mg Mg	=	40.30 mg MgO	=	24.31 mg Mg^{2+}
1 mmol SO_4^{2-}	=	32.06 mg S	=	80.03 mg SO_3	=	96.06 mg SO_4^{2-}

*: La forma del ión va a depender del pH (ver apartado 2.4.1)

Ejemplo 2.1.6: **¿Cuál es la equivalencia en fosforo y en fosfato de 150 mg/L de P_2O_5:**

$\frac{150 \text{ ppm } P_2O_5}{70.97}$ **= 2.11 mmol/L L $H_2PO_4^-$.** **150 .** $\frac{30,97\ (P)}{70,97\ (P_2O_5)}$ **= 65 ppm P.**

Alternativamente; 2.11 mmol/L $H_2PO_4^-$. 30,97 = **65 ppm P**

Ejemplo 2.1.7: **En una analítica se indican unos valores de 73.2 ppm de P, 300 ppm de NO_3^- y 2.5 mmol/L de K. Calcular las correspondencias en óxido**:

$\frac{70,97(P_2O_5)}{30,97\ (P)}$. 73.2 ppm = **168 ppm P_2O_5**

$\frac{14\ (N)}{62\ (NO_3)}$. 300 ppm = **68 ppm N -NO^-_3**

2.5 mmol/L K^+ . 47.1 = **118 ppm K_2O**

Calcular los aportes de fósforo y nitratos en mmol/L:

Para el nitrato: $\frac{300 \text{ ppm nitrato}}{62}$ **= 4,84 mmol/L NO_3^-**

Para el fósforo: $\frac{73,2 \text{ ppm P}}{30,97}$ **= 2.36 mmol/L P**

La forma en que se encuentre el fosfato dependerá del pH (ver apartado 2.4.1)

Ejemplo 2.1.8: **Un agua de riego tiene unas concentraciones de 0.9 meq/L de potasio y 2.5 meq/L de magnesio. Para una dotación de riego de 2500 m^3/ha, calcular los aportes de K_2O y MgO por hectárea procedentes del agua de riego:**

Pasamos de ion a óxido:

0.9 meq/L K^+ = 0.9 mmol/L K^+ (Valencia 1):

0,9 . 47.1 (factor tabla 2 de K a K_2O) = 42.4 mg/L K_2O

2.5 meq/L Mg^{2+} =1.25 mmol/L Mg^{2+} (Valencia 2);

1,25 . 40.3 (factor tabla 2 de Mg a MgO) = 50.4 mg/L MgO

La dotación de riego es 2500 m^3/ha. A partir de este valor ya podríamos calcular los aportes de potasio y magnesio:

42.4 mg/L K_2O = 42.4 g/m^3 . 2500 m^3/ha = 106000 g/ha = **106 kg/ha K_2O**

50.4 mg/L MgO = 50.4 g/m^3 . 2500 m^3/ha = 126000 g/ha = **126 kg/ha MgO.**

El aporte de potasio del agua de riego supone una parte importante de las necesidades de muchos cultivos de ciclo corto.

El aporte de magnesio del agua de riego es mayor que las necesidades de muchos cultivos de ciclo corto exigentes en este nutriente.

2.2. Relaciones entre iones

Existen diversas soluciones nutritivas con concentraciones diferentes de nutrientes que se han formulado a lo largo del tiempo, bien para uso general, como la de Hoagland y Arnon (1938) o la de Steiner (1984) o definidas para distintos cultivos como las citadas por Sonnenveld y Straver (1994), Cadahía (1998), Urrestarazu (2004), Castilla (2005), Van der Lugt (2017), Combrick (2019), entre muchísimas referencias. Como ejemplo, se presentan en las tabla 3 y 4, valores propuestos para fresa (sustrato fibra de coco) y en tomate (sustrato picón) en Canarias en ciclo de invierno

Tabla 3: Solución nutritiva propuesta para Canarias en fresa en ciclo de invierno (Santos et al., 2020)

Periodo	CE	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-
	dS/m	mmol/L						
Trasplante – 3 meses	1.5	8.0	0.5	0.9	4.5	2.7	1.0	0.5
3 meses - fin cultivo	1.3	7.0	0.5	0.7	4.0	2.2	0.6	0.5

Tabla 4: Intervalos de concentración para solución nutritiva propuesta para Canarias en tomate en ciclo de invierno (adaptado de Pérez et al. (2008)

CE	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-
dS/m	mmol/L						
2.5	10 -12	0.5	1.0 – 1.5*	5 - 7	4.0 - 4.5*	1.8 – 2.0	0.5

*: Valores más altos usando picón como sustrato

Tabla 5: Solución nutritiva para plátano en invernadero zona norte Tenerife (Domínguez y Nogueroles, 2012)

Mes	Dosis riego	Nitrógeno (N)	Fosfóro (P_2O_5)	Potasio (K_2O)	Calcio (CaO)
	m^3/ha	kg/ha			
Enero	342	6,7	2,2	10,2	5,3
Febrero	428	6,7	3,2	10,2	4,2
Marzo	599	26,7	11,2	37,8	11,2
Abril	599	26,7	11,8	35,5	7,8
Mayo	684	50,0	22,2	66,7	14,8
Junio	855	50,0	18,5	66,7	14,8
Julio	1026	41,7	13,8	55,5	12,3
Agosto	1198	35,0	11,7	45,3	13,0
Septiembre	1026	35,0	8,8	49,7	19,0
Octubre	770	23,3	7,3	39,3	18,5
Noviembre	684	23,3	7,3	36,8	20,8
Diciembre	342	6,7	2,2	10,7	6,3
Total anual	8554	332	120	464	148

En el caso de soluciones nutritivas para cultivo en suelo, estas soluciones no suelen ser tan fáciles de encontrar, ya que están mucho más adaptadas a las distintas condiciones agroclimáticas y edafológicas. Por otra parte, muchas veces en las soluciones solo se pautan el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Hay ejemplos para distintos cultivos en Bar Yosef (1999), Pomares (2008) o Kafkaki y Tarchitzkyy (2011) entre otros. En el caso particular de Canarias existen soluciones nutritivas o "abonadas" publicadas por Hernández et al. (1980) para distintos cultivos o por Domínguez y Nogueroles (2012) para platanera (un ejemplo estaría en la tabla 5).

Junto con las concentraciones absolutas de cada nutriente hay que tener en cuenta las relaciones entre ellos. Puede haber problemas por precipitación de sales insolubles o por factores limitantes de tipo fisiológico para las necesidades de un determinado cultivo. En el diagrama de Mulder se presentan de forma resumida las relaciones de antagonismo y sinergismo entre los nutrientes (figura 1).

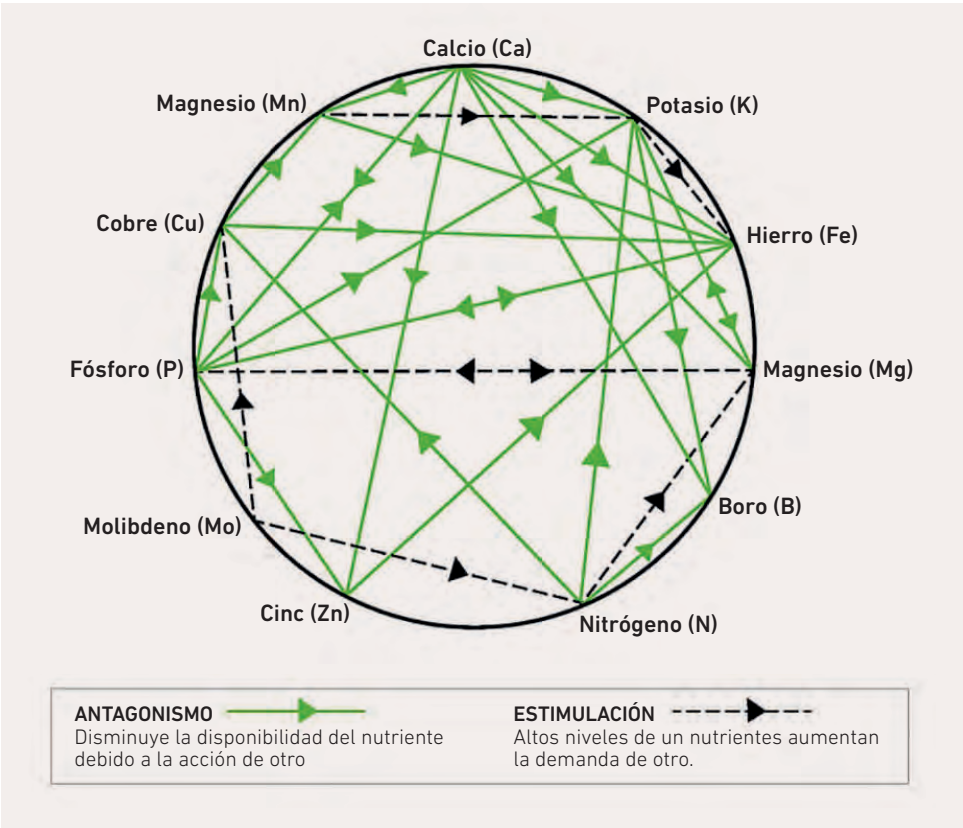


Figura 1: Relaciones entre nutrientes (líneas discontinuas: antagonismos; líneas continuas: sinergismos). (Adaptado de Bariya et al. (2014)).

Abram Steiner (1961; 1988; 1996) definió unas zonas de concentraciones relativas o relaciones entre iones, donde las plantas eran capaces de tomar los nutrientes sin problemas Esas zonas están delimitadas bien por problemas fisiológicos (problemas de absorción por competencia o por toxicidades) o bien por problemas de precipitación en la solución nutritiva. Para ello, trabajó con los porcentajes de la concentración de cada catión o anión (en meq/L) con respecto a la total de cationes o aniones, respectivamente, proponiendo los rangos "universales" expresados en la tabla 6. En dicha tabla también se presentan valores para distintos tipos de cultivos hortícolas.

Tabla 6: Rangos aceptables de relaciones entre iones en soluciones nutritivas (Steiner, 1961; Steiner, 1988; Steiner, 1996)

	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	SO_4^{2-}	Cl^-
	% sobre total cationes				% sobre total aniones			
Rango aceptable "Solución universal"	10 -65	15 - 65	5 - 30	0-15	35-65	3-12	25-45	0-20
Solución universal	35	45	20		60	5	35	--
Cultivos de fruta	50	44	6	--	69	9	22	--
C. de hoja rápidos	38	56	6	--	90	0.5	9.5	--
C. de hoja lentos	67	31	2	--	79	1.5	19.5	--

Este autor construyó dos ábacos triangulares, uno para cationes (Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^+) y otro para aniones ($H_2PO_4^-$, NO_3^- y SO_4^{2-}) representados de forma conjunta en la figura 2 y basados en los datos de la tabla anterior. Hay que hacer notar que el ábaco se construyó para una CE y un pH de la solución determinado (2 dS/m y pH 6.5). Cuando más se alejen los datos de nuestra solución nutritiva de esos valores, menos aplicable serán los datos. Los valores límite del ábaco son ligeramente diferentes a los de la tabla 5.

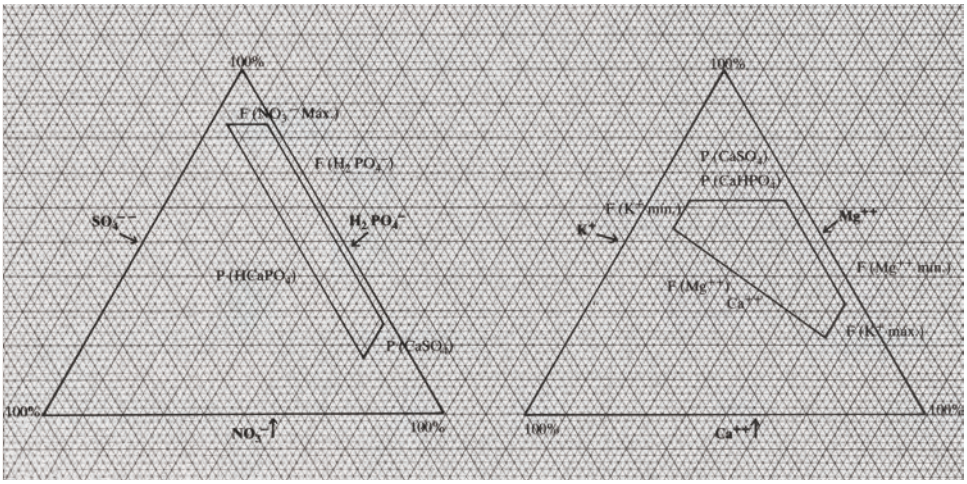


Figura 2: Relaciones óptimas entre iones (pH 6.5, CE 2 dS/m).P: límites por precipitación; F: límites fisiológicos. (Steiner, 1996).

Dentro de cada ábaco se marca una zona aceptable en la cual debe mantenerse una solución nutritiva. Los límites varían ligeramente frente a los rangos de la tabla 5. Para trabajar con el ábaco, se calculan los porcentajes relativos de cada ion. Con ese porcentaje o tasa se entra al ábaco. Se traza **una paralela** al lado del ión que pase por la línea que corresponda a la tasa. Las tasas se leen en los lados del ábaco contiguos al lado del ión. Se hace con los otros dos iones y se obtiene un punto de intersección. Este punto debe situarse en la zona aceptable. El proceso es similar tanto para cationes como para aniones.

Ejemplo 2.2.1: **Partiendo de una solución nutritiva con los valores siguientes, determinar si se encuentran dentro de los valores normales según Steiner:**

ion	K+	Ca 2+	Mg 2+	NO3-	SO42-	H2PO4-
mmol/L	7.0	4.0	1.5	12.0	2.0	1.5

Primeramente, pasamos de mmol/L a meq/L. En el caso del fosfato, asumimos una valencia de 1 para un pH de la solución de 6.0 (ver apartado 2.4.1).

Cationes					Aniones			
	mmol/L	meq/L	tasa			mmol/L	meq/l	tasa
K^+	7.0	7.0	**39**		NO_3^-	12.0	12.0	**69**
Ca^{2+}	4.0	8.0	**44**		SO_4^{2-}	2.0	4.0	**23**
Mg^{2+}	1.5	3.0	**17**		H^2PO_{4-}	1.5	1.5	**9**
		18.0	100				17.5	100

La suma de cationes sería 18 meq/L. La tasa de potasio sería 7/18 = 0.39 = 39%. Y así con el resto de cationes.

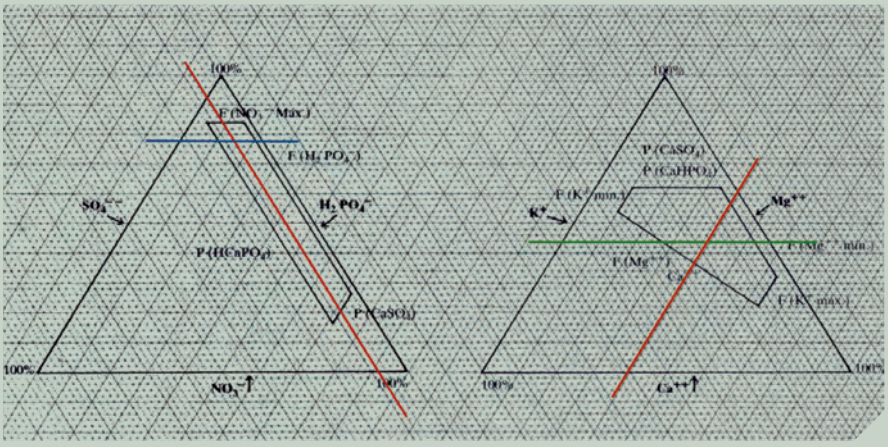
En el caso de los aniones, la suma sería 17.5 meq/L. La tasa del nitrato sería 12.0/17.5 = 0,69 = 69%. Y así con el resto de aniones.

Según los rangos de la tabla 5 para una solución "universal", la solución estaría ligeramente alta de nitratos (más del 65%) y en el límite inferior de magnesio (17-23%).

Si nos referimos a los rangos de la tabla 5 para hortícolas de fruta, la solución está baja de potasio y correcta en lo referente del resto de cationes y a los aniones.

Si lo resolvemos gráficamente: Trazamos la línea de 69% de nitratos (azul) y la línea 9% de fosfatos (roja) en el triángulo de los aniones. La intersección queda dentro del polígono.

Para los aniones, trazamos la línea de 44% de calcio (verde) y la línea 39% de potasio (marrón) en el triángulo de los cationes. La intersección queda dentro del polígono.



Por otra parte, se han definido una serie de relaciones definidas para cultivos determinados entre los diferentes iones. Las más comunes son entre el calcio y el magnesio, y entre el potasio y los dos iones anteriores que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar una solución nutritiva. Algunas de las relaciones más usadas y sus niveles normales en tomate (en mmol/L) son:

$$\frac{Ca}{Mg} = 1.4 - 1.6 \qquad \frac{K}{Ca+Mg} = 0.5 - 1.0 \qquad \frac{K}{Ca} = 1.5 - 2.0$$

$$\frac{SO_4^{2-}}{NO_3^-} \sim 0.3$$

Otra relación importante entre iones es la que existe entre el cloruro y el nitrato. Ambos iones son antagonistas. En aguas con altos contenidos de cloruros, la concentración de nitratos puede subirse para paliar los efectos negativos del primer ion. No resulta sencillo establecer un valor recomendable, ya la concentración de nitratos tiene unos límites fisiológicos dados, mientras que la de cloruros viene impuesta por la del agua de riego.

Cuando en un cultivo en suelo se habla de equilibrios entre nitrógeno, fósforo y potasio (y en algunos casos calcio y/o magnesio) también se está trabajando con las relaciones entre nutrientes y sus interacciones para el mejor desarrollo de un cultivo dado en unas condiciones agroclimáticas, fenológicas y agronómicas dadas.

2.3. Conductividad eléctrica

Otro factor importante en el diseño de una solución nutritiva es la cantidad total de iones disueltos en agua, que normalmente se suele representar por la conductividad eléctrica de la solución nutritiva. La CE se suele expresar en dS/m, mS/cm o mS/cm (1dS/m = 1 mS/cm = 1000 mS/cm). En algunas publicaciones se usa la presión osmótica (PO) de una forma similar a la CE para expresar la cantidad de solutos de una solución nutritiva. Normalmente se usa la conversión:

PO (bar) = 0.36 CE (dS/m)

La CE nos da una indicación de la concentración total de la solución nutritiva, de una forma fácil y rápida. Hay que tener en cuenta que la CE refleja tanto la concentración de los iones añadidos como los presentes en el agua de riego de origen. A la hora de establecer una CE para una solución nutritiva hay que tener en cuenta:

- A menor conductividad, más fácilmente la planta captará el agua (la salinidad crea una "resistencia" a la entrada del agua a la planta, al producirse una diferencia de potencial osmótico mayor). Eso supone un gasto menor de energía por parte de la planta para la absorción de agua

- Al suministrarse los nutrientes vía riego, hay que tener en cuenta que va a haber una subida de la CE con respecto a la del agua.

- En ciertas fases de determinados cultivos, se puede utilizar una CE diferente de la óptima, para controlar el crecimiento vegetativo..

- Trabajar con CE relativamente altas en algunos cultivos puede mejorar la calidad de la fruta.

Normalmente se establece una CE para la solución nutritiva que concilie todo lo anterior, que en esta publicación se denominará CE consigna. Esta CE es el resultado de los iones procedentes del agua de riego y de los aportes de abono. Por tanto, en función de la salinidad del agua de riego, se puede aportar más o menos abonos, para una determinada CE consigna.

Más adelante, se explicarán diferentes métodos de estimación de la CE de una solución nutritiva en función de los aportes de nutrientes (ver apartado 4.4). Por otra parte, el control de este parámetro es muy importante para el seguimiento de la solución nutritiva, recomendándose la toma de datos diarias de CE en cultivos sin suelo, mientras que en suelo tendría que hacerse como mínimo siempre que se cambie la solución nutritiva (Ríos y Santos, 2012).

En cultivo sin suelo, las soluciones nutritivas están formuladas para alcanzar una CE que se supone que es la apropiada para el cultivo en función de sus necesidades de nutrición. En todo caso, las soluciones se formularon para unas calidades de agua determinadas, sin tener en cuenta iones presentes como el Na^+, el Cl^- o una alta alcalinidad (concentración de CO_3^{2-} + HCO_3^-).

En cultivo en suelo, la CE no suele estar marcada de forma tan estricta. Normalmente existen datos de tolerancia a la CE en el extracto saturado. Se podría considerar que la CE del extracto saturado es aproximadamente 1.5 veces más alta que la del agua de riego, considerando un 10-15% de lavado y un cierto patrón de extracción de agua en el perfil del suelo.

Tabla 7: Tolerancia a la CE en extracto saturado de algunos cultivos (Ayers y Westcot, 1985, Maas y Grattan, 1999, Casas y Casas, 1999, Méndez, com.per.)

Cultivo	CE (dS/m) para rendimiento potencial			
	100%	90%	75%	50%
Hortícolas				
Calabacín	4.7	5.8	7.4	10.0
Calabaza	3.2	3.8	4.8	6.3
Brócoli *	2.8	3.8	5.4	7.9
Coliflor *	2.7	3.5	4.7	5.9
Tomate	2.5	3.5	5.0	7.6
Pepino	2.5	3.3	4.4	6.3
Melón *	2.2	3.6	5.7	9.1
Sandía	2.0	2.5	3.5	4.5
Col	1.8	2.8	4.4	7.0
Papa	1.7	2.5	3.8	5.9
Millo	1.7	2.5	3.8	5.9
Batata	1.5	2.4	3.8	6.0
Pimiento	1.5	2.2	3.3	5.1
Lechuga	1.3	2.1	3.2	5.1
Cebolla	1.2	1.8	2.8	4.3
Berenjena	1.1	2.5	4.7	8.3
Zanahoria	1.0	1.7	2.8	4.6
Habichuela	1.0	1.5	2.3	3.6
Fresa	1.0	1.3	1.8	2.5

Cultivo	CE (dS/m) para rendimiento potencial			
	100%	90%	75%	50%
Subtropicales				
Mango	2.0	2.6	3.5	5.0
Papaya	2.0	2.6	3.5	5.0
Naranjo**	1.7	2.3	3.3	4.8
Plátano	1.2	1.5	1.9	2.6
Aguacate**	1.0	1.2	1.4	1.8

*: En algunas referencias, los valores son más bajos. **: Depende del patrón

En la tabla 7 se presentan datos de CE en el extracto saturado para un 100, 90, 75 y 50% de producción potencial (la producción potencial sería la que se podría alcanzar teniendo sólo a la CE como factor limitante) recopilados de varias fuentes para diferentes cultivos. Estos valores pueden variar para una misma especie:

- En función de las condiciones agroclimáticas: Cuanta mayor demanda evaporativa tenga un cultivo determinado, menor tolerancia a la salinidad ya que se dificulta la absorción de agua.

- De los iones presentes: A efectos del cultivo, no es lo mismo una alta CE causada por sales de sodio que por las de calcio.

- En algunos casos, la tolerancia depende del cultivar o patrón utilizado. Por ejemplo, en general, los cultivares de lechuga tipo Romana parecen tener una tolerancia mayor a la salinidad que los de tipo Iceberg. Otro ejemplo sería el uso de patrones antillanos en aguacate cuando se va a plantar con condiciones de salinidad.

Los datos presentados en la tabla 7 están basados normalmente en ensayos realizados con riegos de baja frecuencia, por lo que cuándo se utiliza riego localizado de alta frecuencia, donde la tolerancia a la salinidad sería algo mayor, se podría considerar, de forma aproximada, que los valores en extracto saturado dados podrían asimilarse a los de la solución nutritiva aplicada.

2.4. pH de la solución nutritiva

El control del pH del suelo en agricultura es importante por varias razones.

- A pH extremos (ácidos o alcalinos) pueden aparecer daños directos a las raíces. Esto es especialmente importante en cultivos sin suelo sin sustrato o con sustratos con baja capacidad tampón.

- El pH del suelo influye en sobremanera en el desarrollo de la fracción microbiológica del suelo, lo que define finalmente su fertilidad.

- El pH puede hacer que los nutrientes pasen a forma no asimilables por las plantas, bien por procesos de insolubilización y solubilización o por volatilización, como el caso del nitrógeno ureico y amoniacal.

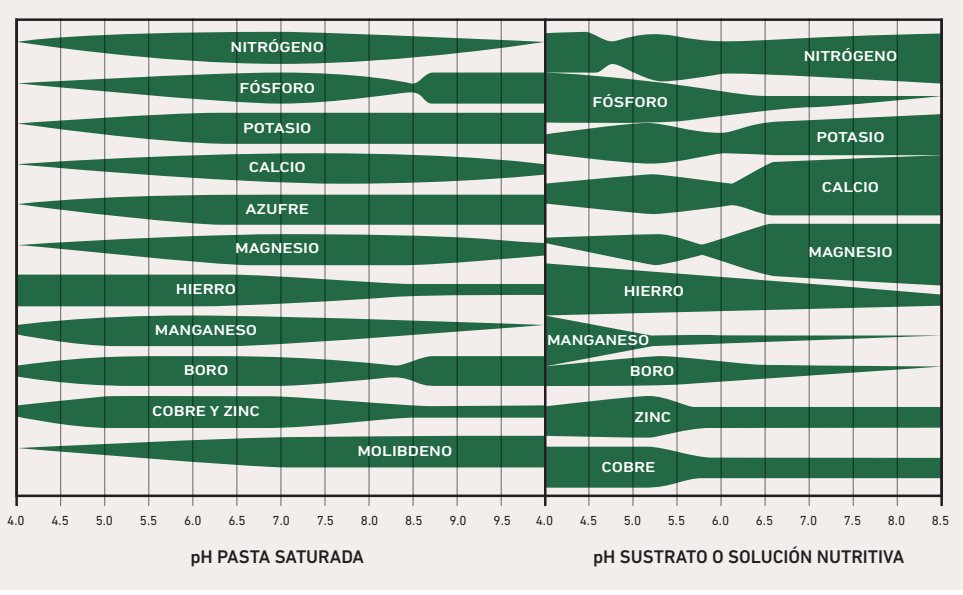


Figura 3: Disponibilidad de los nutrientes en función del pH. A la izquierda para suelos minerales y a la derecha para sustratos. (Bailey, 1996).

Una forma gráfica de observar la influencia del pH en la disponibilidad de los nutrientes es mediante el diagrama de Troug (figura 3), que representa gráficamente la disponibilidad de un nutriente a un pH determinado mediante el grosor de una barra: mayor grosor, más disponibilidad. Normalmente se suele encontrar en bibliografía el aplicable a suelos, pero también existen diagramas más adaptados a cultivos sin suelo. En general, se considera que un pH entre 5.5 y 6.0 sería el óptimo para una solución nutritiva de cultivo sin suelo, mientras que este valor podría subir a un entorno de 6.5 cuando se está fertirrigando suelos.

El pH de la solución nutritiva puede influir bastante en el del suelo o sustrato, en función de su poder tampón y, en algunos sustratos, de la frecuencia de riego. El control de pH en cultivos sin suelo es muy importante ya que normalmente se trabaja en un medio con una capacidad de tamponar el pH bastante baja. Los suelos tienen una alta capacidad tampón que permite un control más laxo de este parámetro.

Centrándonos en los procesos de insolubilización, éstos se producen, además de en el suelo, durante la preparación de la solución nutritiva o en las conducciones. La formación de precipitados en la solución nutritiva, además de alterar las concentraciones de nutrientes disponibles para el cultivo, puede causar obturaciones parciales o totales en los emisores que provocan bajadas de la uniformidad de aplicación de riego muy importantes.

Los problemas más frecuentes de insolubilización por pH en soluciones nutritivas serían debidos a la formación de fosfato de calcio o de compuestos con microlementos no solubles. La precipitación de carbonato cálcico también puede ser un problema en soluciones nutritivas aguas bicarbonatadas donde no se controla el pH.

2.4.1. El pH y los fosfatos

El fosfato en una solución puede encontrarse como ácido fosfórico sin disociar (H_3PO_4), ión dihidrogenofosfato ($H_2PO_4^-$), hidrogenofosfato (HPO_4^{2-}) y fosfato (PO_4^{3-}) en función del pH.

$$\mathbf{H_3PO_4} \text{ (ácido sin disociar)} \leftrightarrow \mathbf{H_2PO_4^-} \leftrightarrow \mathbf{HPO_4^{2-}} \leftrightarrow \mathbf{PO_4^{3-}}$$

En la figura 4 se presentan las concentraciones relativas de cada ión o especie fosfatada en función del pH. A pH 0, todo el fósforo estaría como H_3PO_4 sin disociar. Subiendo hasta pH 4.2, todo el fósforo estaría como $H_2PO_4^{2-}$, habiendo cedido un hidrogenión. A pH 7.2, un 50% del P seguiría como como $H_2PO_4^{2-}$, mientras que el otro 50% ya habría cedido el 2º hidrogenión, quedando como HPO_4^{2-}. A pH 9,6, todo el P estaría como HPO_4^{2-}.

Si consideramos que los pH en el entorno de las raíces están entre 4 y 9, la raíz tomará bien $H_2PO_4^-$ o HPO_4^{2-}. La planta es capaz de tomar ambas formas, pero el ion HPO_4^{2-} precipita con el calcio muy fácilmente, disminuyendo el fósforo asimilable. Teniendo en cuenta que siempre habrá calcio presente, el propio del agua de riego y el que se pueda añadir en la solución, la precipitación de $CaHPO_4$ puede ser un problema si no se controla el pH, especialmente cuando se pretende trabajar con concentraciones altas de fósforo y de calcio.

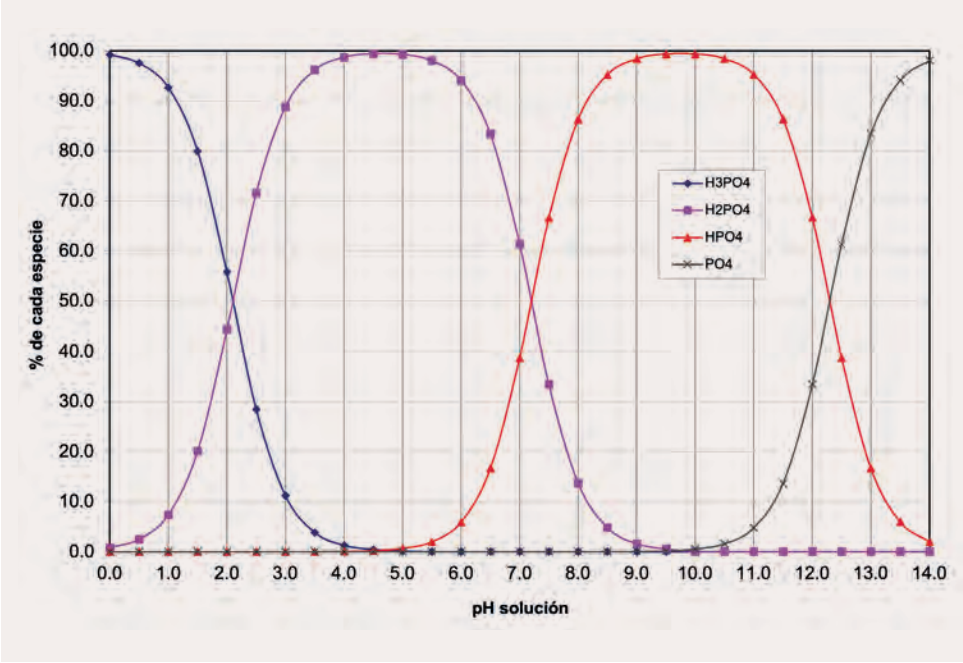


Figura 4: Reparto de las especies fosfatadas en función del pH (De Rijck y Schrevens, 1997; Lemaire et al. 2005).

2.4.2. El pH y la elección de los quelatos

Además de la interacción entre calcio y fosfatos disponibles, los nutrientes que más se ven afectados por el pH en el medio radicular son los microelementos hierro, cobre, cinc y manganeso, que comienzan a tener problemas de disponibilidad por la planta a pH mayores de 6.5 (figura 3). Por ello, normalmente estos iones se añaden en forma de quelatos (en especial el hierro), que los hacen disponibles a pH algo más altos (ver apartado 3.2).

El pH, a su vez, también controla la estabilidad de los quelatos, especialmente en el caso del hierro. Entre los quelatos de hierro más conocidos, el EDTA deja de ser estable a pH mayores de 6 a 6.5, el EDDHA es estable entre 4 y 9 y el DTPA es estable hasta pH 7-7.5 (Figura 5). La estabilidad va bajando con el tiempo. En cultivos sin suelo, con una alta frecuencia de riego, puede ser menos importante la estabilidad del quelato con el tiempo que en suelos con muy bajas frecuencias, donde el quelato debe tener más tiempo secuestrado el hierro.

Por otra parte, la estabilidad también baja bastante a pH muy ácidos: los quelatos tipo EDDHA dejan de ser estables por debajo de pH 3.0 - 3.5 y por debajo de 1.0 – 2.0 para los EDTA y DTPA (Figura 25). Esto debe tenerse en cuenta cuando se elige en qué tanque de solución concentrada se colocarán los microelementos (ver apartado 6.1).

En algunos casos, los quelatos muy estables pueden presentar problemas, al ser la concentración libre de hierro muy baja para ser absorbida fácilmente por las raíces. Por ello, en muchos productos comerciales para fertirrigación se suele utilizar una mezcla de a mezcla de EDTA o DTPA, menos estable con algo de EDDHA, más estable.

Además de con el hierro, el tipo de quelato en el caso del manganeso también puede presentar algún problema en suelos o sustratos con pH alto. Los quelatos de otros metales (Cu y Zn), normalmente en forma de EDTA, son estables en los pH normales en soluciones nutritivas. De todas formas, la afinidad de los quelatos por estos elementos no es demasiado alta, pudiéndose desplazar por el calcio o el magnesio presente en los suelos.

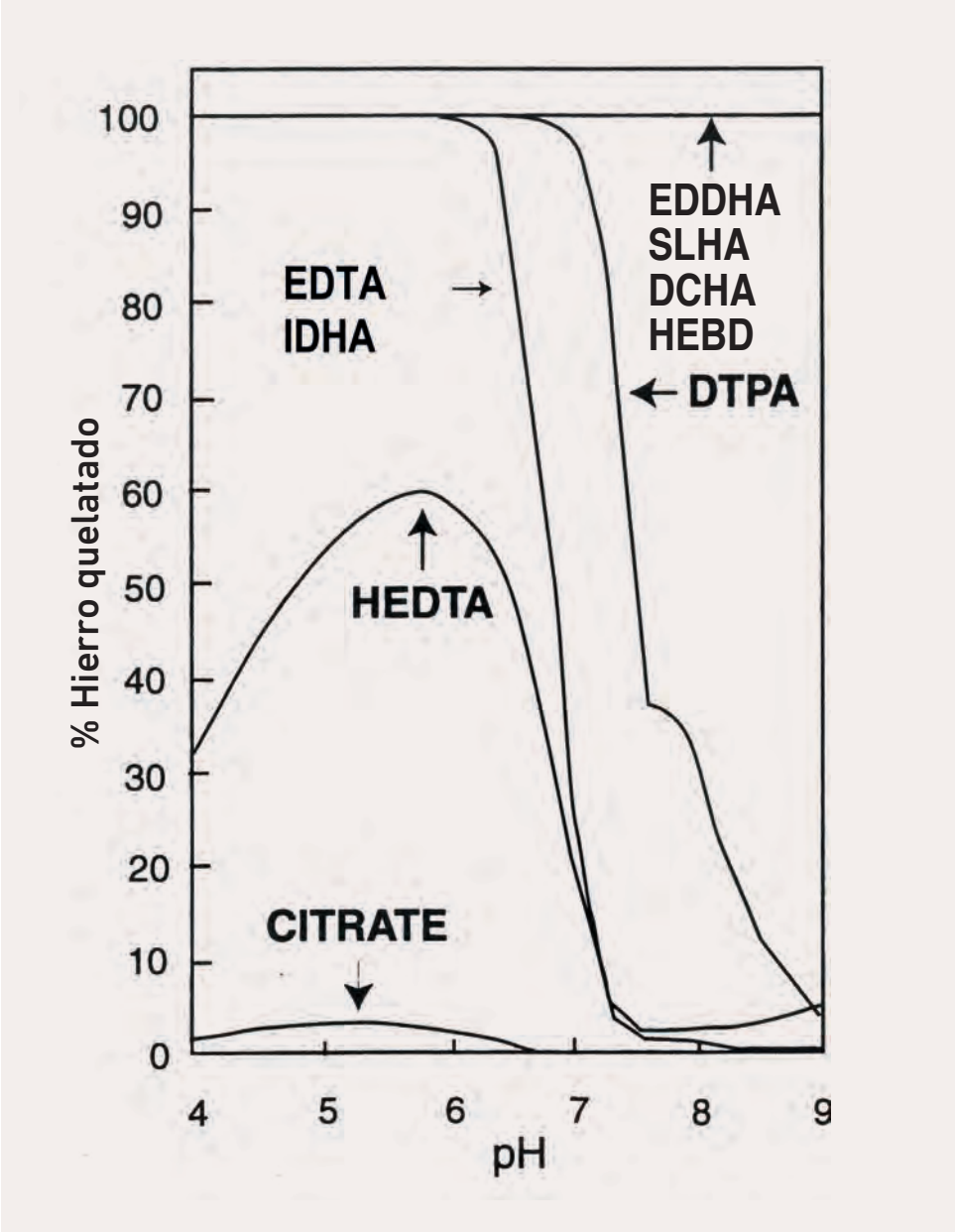


Figura 5: Comparación de la estabilidad de diferentes quelatos de hierro con el pH (Adaptado de Norvell, 1983)

2.4.3 El control del pH mediante el equilibrio de las especies carbonatadas

El pH de un agua de riego y de una solución nutritiva está influido principalmente por los contenidos relativos de bicarbonatos y carbonatos.

$$\mathbf{CO_3^{2-}} \leftrightarrow \mathbf{HCO_3^-} \leftrightarrow \mathbf{H_2CO_3}\ (CO_2\ \text{disuelto}) \leftrightarrow \mathbf{CO_2\ atmosférico}$$

La última parte del equilibrio sería el paso de CO_2 disuelto en agua a CO_2 en la atmósfera.

Existe una relación directa entre el pH y las cantidades relativas de cada uno de los iones anteriores (las llamadas especies carbonatadas). En la figura 6 se representa la evolución del pH en función de las especies carbonatadas.

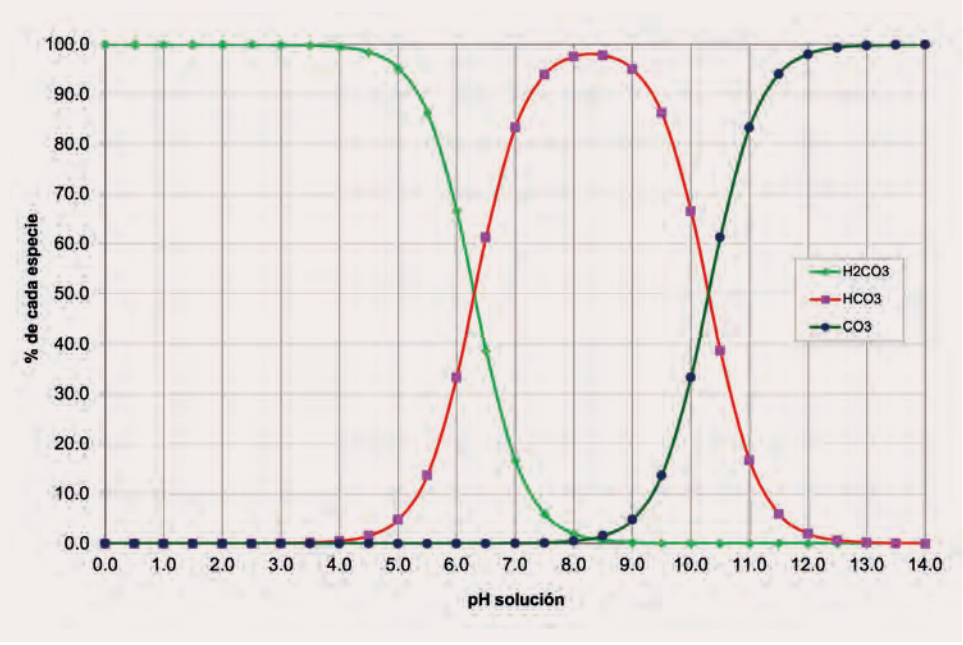


Figura 6 Reparto de las especies carbonatadas en función del pH (Lemaire et al. 1989; De Rijck y Schrevens, 1997)

La reacción de paso de diferentes especies carbonatadas es reversible, pudiendo ir en una dirección u otra. Debido a la última parte del equilibrio, el pH puede cambiar con el tiempo debido a ese CO_2 disuelto en agua. Es normal que el valor de pH suba aproximadamente media unidad desde la adición de ácido en los cabezales hasta que llega la solución a los emisores. Suele ser frecuente que suba hasta en una unidad cuando se usan aguas con contenidos medios o altos de bicarbonatos.

Por lo tanto, se puede bajar el pH de la solución nutritiva adicionando compuestos ácidos que van convirtiendo HCO_3^- y CO_3^{2-} en CO_2 disuelto en agua que luego pasa a la atmósfera. Este proceso también funciona a la inversa (adición de bases). A la suma de bicarbonatos y carbonatos se suele denominar alcalinidad del agua. Normalmente la neutralización de la alcalinidad se controla indirectamente mediante la medida de pH intentando llevar la solución a un valor óptimo (ver apartado 2.4). El valor máximo de pH a considerar para evitar

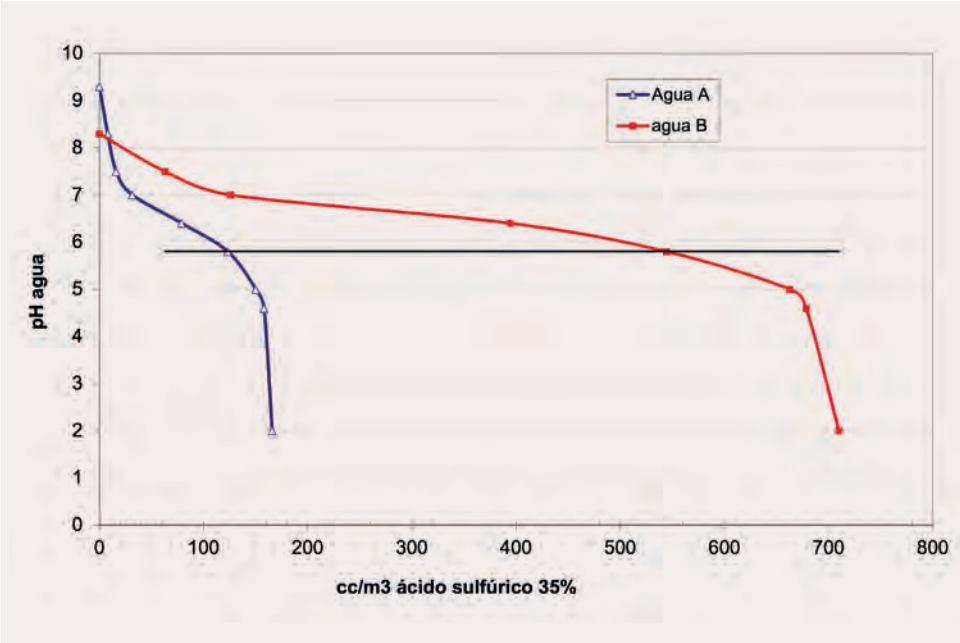


Figura 7: Curva de neutralización de dos aguas El agua A tiene un pH de 9.3 y 1.2 meq/L de alcalinidad y el agua B tiene un pH de 8.3 y 5.1 meq/L. (Reed, 1996)

problemas de precipitación sería el pH de equilibrio, calculado en función de la posibilidad de precipitación de carbonato de calcio insoluble. Este valor suele venir calculado en muchas analíticas de agua y se puede calcular fácilmente usando la metodología expuesta en Ayers y Westcot (1985) entre otras muchas referencias.

Para saber cuánto ácido hace falta añadir para llegar al pH deseado se puede trabajar con una curva de neutralización del agua de riego (ver figura 7) o bien eliminar una cantidad determinada de alcalinidad. A efectos prácticos se considera un pH de la solución nutritiva entre 5.5 y 6.0 cuando la concentración de bicarbonatos es de aproximadamente 0.5 mmol/L, Algunos autores señalan que se llega también a esos valores de pH cuando se neutraliza un 75 a un 80% de los bicarbonatos presentes. Esta regla puede utilizarse siempre que estemos en valores intermedios de concentración de ese ion (2 a 6 meq/L). Con valores bajos de bicarbonatos, esta regla puede llegar a concentraciones peligrosamente bajas (menos de 0.5 mmol/L).

Para conseguir el pH deseado se añaden tantos meq/L de ácido como meq/L de bicarbonatos y carbonatos se deseen eliminar (ver apartado 3.1.2). La cantidad de ácido a utilizar depende de la alcalinidad presente y no del pH actual del agua. Puede ocurrir que un agua con alta alcalinidad tenga un pH más bajo que una con baja alcalinidad. En la figura 7 se presentan dos curvas de neutralización: el agua A, con mayor alcalinidad (5.1 meq/L) y un pH inicial de 8.3, requiere más de 4 veces más ácido para alcanzar un valor objetivo de pH 5.8 que el agua B, de menor alcalinidad (1.2 meq/L) y un pH inicial de 9.3.

En todo caso, siempre que haya una adición de ácido, debe dejarse una concentración de bicarbonatos mínima de 0.5 mmol/L para mantener una capacidad tampón suficiente para evitar que una pequeña adición de ácido baje el pH a valores muy ácidos. En la figura 7, se observa como a partir de pH 5.5, las bajadas de pH son muy bruscas para adiciones de ácido bajas.

Algunas aguas de riego tienen carbonatos además de bicarbonatos (si el pH del agua es superior a 8,2 suele indicar la presencia de carbonatos). Esto supone un aporte extra de ácido, ya que, en primer lugar, esos carbonatos pasan a bicarbonatos. Para neutralizar 1 mmol/L de carbonatos necesitaríamos 2 mmol/L de hidrogeniones procedentes de los ácidos.

Si el agua tiene una alta alcalinidad, la acidificación puede llegar a ser antieconómica por las altas cantidades de productos a aplicar o tener problemas de manejo importantes por la adición de los aniones nitrato, fosfato, sulfato o cloruro de los compuestos ácidos. Las aguas con una alcalinidad superior a 8.0 meq/L comienzan a ser difíciles de manejar a la hora de bajar el pH hasta un valor de 5.5 – 6.0 (ver apartado 4.2.2).

En aguas con un contenido de bicarbonatos menor de 0.5 mmol/L, lo cual es muy poco frecuente, salvo aguas desaladas sin postratamiento, cualquier adición de un ácido podría hacer que el pH cayera bruscamente. Para evitar esto hay que aportar una base (normalmente bicarbonato o hidróxido de potasio) o mezclar con una pequeña cantidad de agua con bicarbonatos (ver apartado 3.1.3). En estos casos, puede ser conveniente ajustar la cantidad de bicarbonatos a un valor entre 0.5 y 1.0 mmol/L para asegurar un valor tampón mínimo.

2.4.4. La modificación del pH radicular mediante la relación amonio / nitrato

La planta es capaz de modificar el pH del entorno radicular por la absorción diferencial de los iones presentes en la disolución. De forma muy simplificada, si la planta toma aniones (por ejemplo, NO_3^-), la raíz libera OH^- para mantener el equilibrio de cargas (ver figura 8), alcalinizando la solución. La absorción de cationes (por ejemplo, NH_4^+) produce, por el contrario, una acidificación al liberar iones H^+ la raíz. Si la planta toma más cationes que aniones, baja el pH y si toma más aniones que cationes, sube el pH.

Aproximadamente, en condiciones normales, el 70% de los iones absorbidos por la planta corresponde al nitrógeno en sus dos formas. Las plantas absorben el amonio con gran facilidad y selectividad frente a otros cationes. Cuanto más amonio esté presente en la solución nutritiva, menos nitratos se absorben. Esto hace que baje el pH del entorno radicular, al tomar la planta más cationes que aniones (ver figura 8).

Por lo tanto, el pH en el entorno radicular se puede cambiar manipulando la relación NH_4^+/NO_3^- especialmente en cultivo sin suelo. Subiendo el primero, se logra una acidificación y haciendo lo mismo con el segundo, lo contrario. Estas modificaciones se pueden usar en algunos cultivos que alcalinizan fuertemente la zona radicular como la rosa (subiendo la relación NH_4^+/NO_3^-) o en momentos

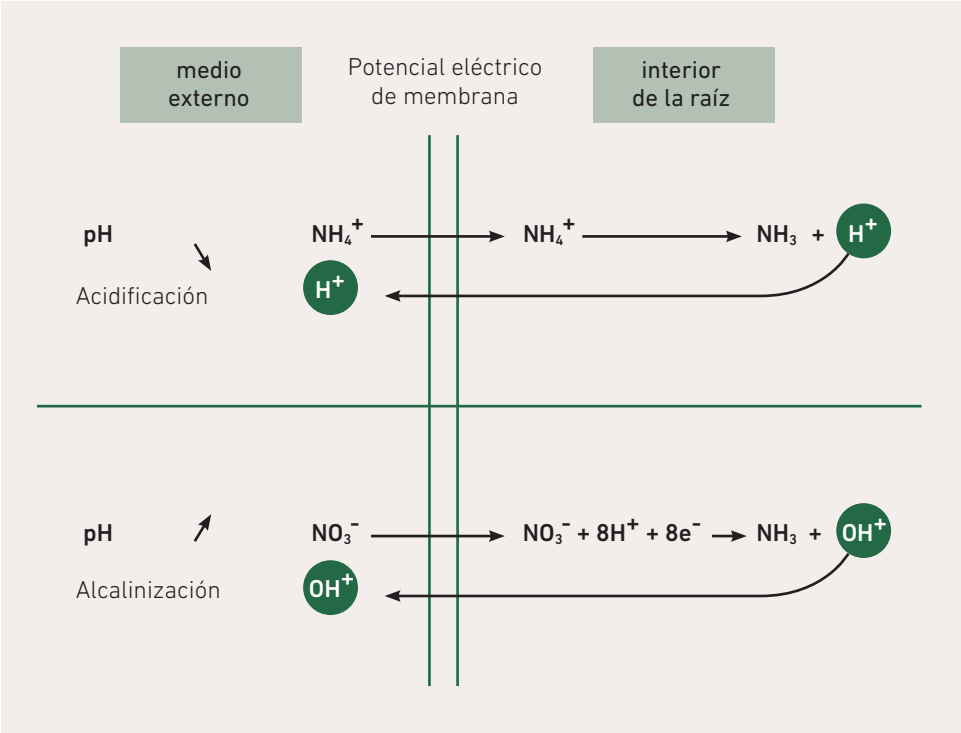


Figura 8: Modificación del pH de la solución nutritiva por mecanismos fisiológicos (Lemaire et al., 2005).

puntuales de descompensación de la absorción de iones, como el llenado de frutos en melón, por ejemplo (eliminando el NH_4^+de la solución). Por otra parte, en suelos y en sustratos con un cierto grado de uso, donde ya hay microorganismos, la nitrificación puede también acidificar la solución al liberarse iones H^+ en el paso de NH_4^+ a NO_3^-

Este fenómeno se observa mucho más fácil y rápidamente en cultivos sin suelo que en suelos, que tienen una capacidad tampón mucho más alta y donde la acidificación de suelos por la adición de abonos amoniacales suele ser un proceso a más largo plazo.

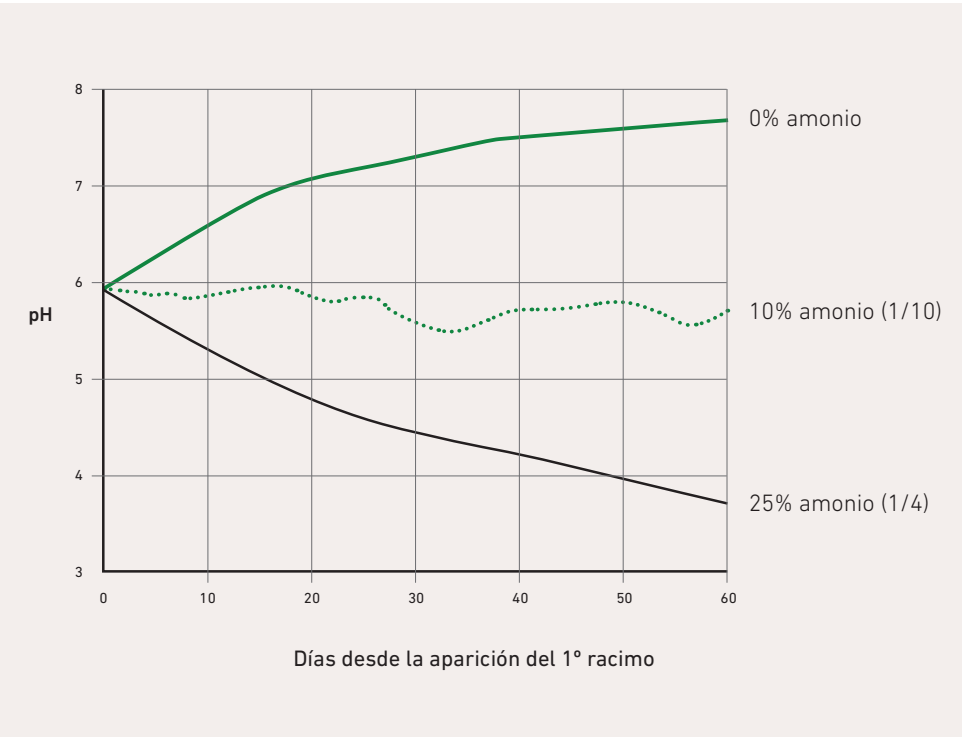


Figura 9: Evolución de una solución nutritiva con diferentes porcentajes de nitrógeno amoniacal sobre el nitrógeno total sobre el pH del sustrato (Ross, 1998)

En la figura 9 se observa la evolución del pH de los drenajes en un cultivo sin suelo en función de la relación NH_4^+/NO_3^- aportada. Usando una relación 1/10 el pH se mantiene en valores estables mientras que con una relación ¼, se va aumentando la acidez en el sustrato. Si no se aporta nitrógeno amoniacal, la solución del suelo en las cercanías de la raíz tiende a alcalinizarse.

A la hora de manejar la relación amonio/nitrato hay que considerar varios factores:

- El amonio a altas concentraciones puede llegar a ser tóxico para la planta. Este problema puede agravarse si la temperatura de la raíz es alta. Este problema sólo se observa en cultivos sin suelo. En el suelo, la microbiota del suelo convierte rápidamente el amonio en nitrato.

- El amonio es un antagonista del potasio, el magnesio y el calcio, influyendo de forma negativa en la calidad de la fruta en cultivos como el tomate o la fresa y en la aparición de problemas asociados a la traslocación de ese último elemento como la necrosis apical o el tip-burn.

- En algunas especies adaptadas a suelos con pH bajos, como el arándano, suelen tener una mayor preferencia por el nitrogeno amoniacal que por el nítrico, siendo recomendables altas relaciones amonio/nitrato.

- En condiciones de baja actividad radicular, como la causada por bajas temperaturas, puede no ser conveniente un aporte alto de nitrógeno nítrico ya que se lavará sin que las raíces lo absorban. Si se aporta como amoniacal puede adsorberse en el suelo. En estos casos y usando fertirrigación, puede ser conveniente ajustar a la baja la cantidad de N por la baja actividad del cultivo.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, en cultivo sin suelo se suele recomendar emplear en hortícolas una relación NH_4^+/NO_3^- máxima en el entorno de 1/10, siempre que las condiciones de luminosidad sean altas, teniendo que ser algo menor con radiaciones bajas. En algunas condiciones donde los cultivos tienden a alcalinizar mucho el medio y en sustratos de alto pH, se puede llegar a una relación máxima de 1/5. En estos casos hay que vigilar especialmente la evolución diaria del pH, intentando mantener la cantidad total de nitrógeno aportado y tener en cuenta posibles problemas de antagonismo con otros iones (calcio, potasio y magnesio).

El valor de la relación NH_4^+/NO_3^- aportada en cultivo en suelo puede subir ya que habrá una nitrificación del amonio aportado. Sin embargo, no se recomienda pasar del 20% de N amoniacal en momentos en que el NH_4^+ puede ser problemático por riesgos asociados a posibles antagonismos con otros cationes. Si no hay problemas de ese tipo, la cantidad de N amoniacal a aportar puede ser mayor.

2.5. Temperatura de la solución nutritiva

La temperatura influye por una parte en la capacidad de absorción de agua y nutrientes en el entorno de la raíz. Temperaturas muy altas o bajas provocan un menor crecimiento de las raíces. Por debajo de 12ºC, la absorción de iones por las raíces de tomate o de pepino se ve muy limitada. Por encima de 29ºC, la absorción vuelve a estar limitada. En cultivos sensibles como el pepino, temperaturas de la raíz por debajo de 8ºC llegan a dificultar incluso el flujo de agua hacia el resto de la planta.

Por otra parte, la temperatura es uno de los factores más importantes en la solubilidad. Casi todos los fertilizantes sólidos usados en fertirrigación aumentan su solubilidad según lo hace la temperatura del agua (ver apartado 6.2). En el caso de los gases, el efecto es el contrario (mayor temperatura, menor solubilidad). En nuestro caso los gases disueltos a considerar serían el CO_2 procedente de la neutralización de la alcalinidad y el oxígeno.

En medios con baja aireación, tanto sustratos como suelos, y muy especialmente en cultivos en agua (NFT, NGS, etc) una parte importante de la demanda del oxígeno de las raíces se suministra a partir de esa fracción soluble. Se suele considerar que debe haber al menos 9 ppm de O_2 disuelto para la mayoría de las especies cultivadas. En la tabla 8 se presenta la variación de la solubilidad del oxígeno en agua destilada en función de la temperatura.

Tabla 8: Relación entre la temperatura del agua y el oxígeno disuelto (altura nivel del mar, agua pura).

Temperatura (ºC)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Temperatura (ºC)	Oxígeno disuelto (mg/L)
10	11,3	22	8,7
12	10,8	24	8,4
14	10,3	26	8,1
16	9,9	28	7,8
18	9,6	30	7,6
20	9,1	32	7,3

La temperatura de la solución puede ser un problema en cultivos hidropónicos en agua (NGS, NFT, bandejas flotantes, etc.), siendo necesario en algunos casos un sistema de refrigeración en verano o sistemas de oxigenación complementarios. Por otra parte, la solubilidad del oxígeno también se ve afectada por la salinidad del agua: según aumenta la salinidad, menor será el porcentaje de oxígeno disuelto. La estrecha relación entre la concentración de oxígeno disponible y la temperatura debe tenerse en cuenta a la hora de aplicar oxigenación complementaria a las soluciones nutritivas.

La temperatura de la solución nutritiva puede ser un parámetro muy importante en cultivos sin suelo sin sustrato, donde no hay ningún efecto tampón que suavice los efectos de la temperatura de la solución nutritiva.

CAPÍTULO 3

FERTILIZANTES

Los fertilizantes usados en la elaboración de soluciones nutritivas deben tener como característica fundamental su solubilidad. En la etiqueta tienen que especificarse las denominaciones "cristalino soluble" o "soluble para fertirrigación". La elección de los abonos para confeccionar una solución nutritiva dada depende de cinco factores principales:



Figura 10: Sacos de diferentes abonos utilizados en fertirrigación

1. la disponibilidad de ese fertilizante en la zona.

2. Las características químicas en función del agua disponible y del suelo o del sustrato.

   El mejor ajuste posible en la solución nutritiva en la que se vaya a trabajar

3. El precio del fertilizante.

4. Las peculiaridades del cabezal de fertirrigación y de la persona que lo maneje.

3.1. Fertilizantes que aportan macronutrientes

Los abonos simples que contienen los macroelementos (N, P, K, Ca, Mg y S) que suelen usarse en fertirrigación vienen listados en la tabla 9, con su fórmula química, su peso molecular y su reacción al disolverlos en agua (ácida o alcalina).

En la tabla se han incluido tanto el cloruro potásico como el cálcico. Estos fertilizantes no son usados prácticamente en la confección de soluciones nutritivas en España, pero sí en el norte de Europa. En algunos casos, el uso de KCl y $CaCl_2$ puede ayudar bastante en la confección de soluciones nutritivas en cultivos no sensibles al cloruro, como el tomate y otras solanáceas y en aguas con bajo contenido de Cl^-.

Por lo referente a las presentaciones comerciales, los abonos normalmente utilizados para la elaboración de soluciones nutritivas son sólidos, salvo los ácidos. El cloruro de calcio puede presentarse comercialmente también como producto líquido. Tanto para el nitrato como para el sulfato potásico existen formulaciones comerciales con reacción ácida y alcalina.

Tabla 9: Fertilizantes simples usados para realizar soluciones nutritivas

Fertilizante	Fórmula química del producto fertilizante	M. molecular g/mol	Reacción en agua
Ácido nítrico	HNO_3	63.0	Ácida
Nitrato cálcico	$5Ca(NO_3)_2.10H_2O.NH_4NO_3$	1080.5 / 216.1*	Ligeramente ácida
Nitrato potásico	KNO_3	101.0	Ligera. Ácida / Ligera. alcalina
Nitrato amónico	NH_4NO_3	80.0	Ligeramente ácida
Nitrato de magnesio	$Mg(NO_3)_2.6H_2O$	256.3	Ligeramente ácida
Sulfato amónico	$(NH_4)_2SO_4$	132.0	Ligeramente ácida
Urea	$CO(NH_2)_2$	60,0	Ligeramente alcalina
Fosfato monoamónico	$NH_4H_2PO_4$	115.0	Algo ácida
Fosfato diamónico	$(NH_4)_2HPO_4$	132.1	Ligeramente alcalina
Urea fosfato	$H_3PO_4.CO(NH_2)_2$	158.1	Acida
Ácido fosfórico	H_3PO_4	98.0	Acida

Fertilizante	Fórmula química del producto fertilizante	M. molecular g/mol	Reacción en agua
Fosfato monopotásico	KH_2PO_4	136.1	Algo ácida
Fosfato dipotásico	K_2HPO_4	174,2	Ligeramente alcalina
Sulfato potásico	K_2SO_4	174.3	Ligera. Ácida / Ligera. alcalina
Cloruro potásico	KCl	74.6	Ligeramente alcalina
Bicarbonato potásico	$KHCO_3$	100.1	Alcalina
Hidróxido potásico	KOH	56.1	Alcalina
Sulfato de magnesio**	$MgSO_4.7H_2O$	246.3	Neutra
Cloruro cálcico	$CaCl_2.\ 2H_2O$	147.1	Ligeramente alcalina
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	98.1	Ácida

*: Masa molecular referida a 5 átomos de Calcio / Masa molecular referida a 1 átomo de Calcio
**: Hay varios sulfatos magnésicos: La epsomita ($MgSO_4.7H_2O$), soluble y la kieserita ($MgSO_4.H_2O$), muy poco soluble

Como expresan las fórmulas siguientes, si se tiene la concentración de un fertilizante en mmol/L, multiplicándola por la masa molecular se calculan los mg/L de fertilizante puro.

mmol/L . Valencia = meq/L fertilizante **mmol/L . M. molecular = mg/L**

Ejemplo 3.1: **Determinar la cantidad de meq/L y mg/L de 3.5 mmol/L de sulfato potásico**

3.5 mmol K2SO4 . 2 = 7 meq/L K2SO4

3.5 mmol K2SO4 .174.3 = 610.1 mg/L

En la tabla 9 está la fórmula molecular del nitrato de calcio que se vende normalmente como fertilizante, que contiene además nitrato amónico y agua de cristalización, suministrando por cada mmol de fertilizante, 5 de calcio, 11 de nitrato y 1 de amonio. El peso molecular sería de 1080.5 g/mol, referido a una molécula con 5 átomos de calcio y de 1080.5 / 5 = 216.1, referida a 1 átomo de calcio. En esta publicación usaremos como peso molecular 216.1 g/mol, de forma que cada mmol/L de fertilizante aportaría 1 mmol/L de calcio, 11/5 mmol/L de nitrato y 1/5 mmol/L de amonio. El aporte de amonio de este fertilizante debe tenerse en cuenta en cultivo sin suelo ya que puede resultar significativo.

Ejemplo 3.2: **Se desea saber cuántos mmol/L y mg/L de nitrato cálcico son necesarios para aportar 4 mmol/L de calcio:**

Si usamos 1080,5 como masa molecular (5 mmoles de Ca por mmol de fertilizante)

4 mmol/L Ca . = **0.8 mmol/L nitrato cálcico**;
0.8 . 1080.5 **= 864.4 mg/L abono**

Si usamos 216.1 como masa molecular (1 mmol de Ca por mmol de fertilizante),

4 mmol/L Ca = **4 mmol/L nitrato cálcico;**
4 . 216.1 = **864.4 mg/L abono**

En ambos casos, llegamos a la misma cantidad de abono en mg/L.

¿Cuántos mmol/L de amonio y nitrato se aportan con esos 4 mmol/L de calcio?:

4 mmol/L Ca aportan: $4.\frac{1}{5}= \mathbf{0.8\ mmol/L\ NH_4^+}$ $4.\frac{11}{5}= \mathbf{8.8\ mmol/L\ NO_3^-}$

También está comercialmente disponible nitrato de calcio "sin amonio", prácticamente sin nitrato amónico en su formulación. Los productos comerciales tienen un 17% de nitrógeno y un 23,5% de calcio (Ca), lo que sería equivalente a un producto a base de nitrato de calcio anhidro ($Ca(NO_3)_2$). Este producto tiene la consideración de comburente que no tendría el $5Ca(NO_3)_2.10H_2O.NH_4NO_3$.

La urea no se usa frecuentemente en fertirrigación salvo en momentos determinados y en algunos cultivos. Este abono tiene la característica que no aumenta la CE de la solución (pero sí la presión osmótica), por lo que no podría inyectarse en función de este parámetro cuando se trabaja con automatismos de fertirrigación. Sin embargo, la urea aumenta el potencial osmótico de la solución del suelo y por lo tanto dificulta la absorción de agua como el resto de fertilizantes.

La urea tiene el problema de la posible volatilización de amoniaco en suelos de pH alcalino, aunque con la incorporación en fertirrigación se limitan esas posibles emisiones. La volatización de amoniaco es uno de los problemas a solucionar con medidas específicas de mitigación en la normativa.

Por otra parte, la urea no se usa en cultivo sin suelo ya que no suele tener tiempo en hidrolizarse en amonio antes de ser lavada en los drenajes y la absorción radicular de nitrógeno ureico es relativamente baja. Además, en el caso de hidrolizarse, como se comentó en el apartado 2.4.4, la adición de nitrógeno amoniacal (como el procedente de la urea) en cultivo sin suelo suele realizarse en concentraciones bajas.

Para el cálculo de soluciones nutritivas en suelo, normalmente se trabaja con las riquezas en N, P_2O_5, K_2O, CaO y MgO de las sales simples, al venir normalmente las necesidades de nutrientes en esta forma. En muchas referencias norteamericanas, las riquezas de los abonos vienen expresadas de forma elemental (N, P, K, Ca, Mg) lo que puede llegar a confusión. En la figura 11 se observa como un abono 15-5-30 (N- P_2O_5- K_2O) equivaldría a un 15-2.2-24.9 (N-P-K).

En la tabla 10 vienen reflejadas las riquezas en nitrógeno (como nitrógeno amoniacal y nítrico), fósforo y potasio de los principales fertilizantes simples usados en fertirrigación.

Tabla 10: Riquezas usuales de los fertilizantes usados para aportar nitrógeno, fósforo y potasio

Fertilizante	% N			% P2O5	% K2O	% otros
	total	nítrico	amoniacal			
Ácido nítrico	12 – 12.5*	12 - 12.5	0	0	0	0
Nitrato cálcico	15.5	14.4	1.1	0	0	26 – 27 CaO
Nitrato potásico	13 – 13.5	13 - 13.5	0	0	46 – 46.5	0
Nitrato amónico	33.5 – 34.5	16.75	16.75	0	0	0
Urea	46	0	46**	0	0	0
Nitrato de magnesio	11	11	0	0	0	15.7 MgO
Sulfato amónico	21	0	21	0	0	22 S
Fosfato monoamónico	12	0	12	60 – 61	0	0
Fosfato diamónico	18	0	18	46	0	0
Urea fosfato	17.5 – 18.0	0	17.5 - 18**	44	0	0
Ácido fosfórico	0	0	0	44 – 72*	0	0
Fosfato monopotásico	0	0	0	52	34 – 34.5	0
Fosfato dipotásico	0	0	0	41	54	0
Sulfato potásico	0	0	0	0	50 - 53	18 S
Cloruro potásico	0	0	0	0	60	50 Cl

* variable en función de la densidad y riqueza. **procedente de urea

Ejemplo 3.4: **Se está trabajando en una solución nutritiva con una concentración de 100 mg/L de P como urea fosfato. Calcular la cantidad de abono necesaria, así como el aporte de nitrógeno que se está realizando.**

En primer lugar, pasamos de P a P_2O_5 para poder luego trabajar con las riquezas.

$$100 \text{ mg/L P}. \frac{70{,}97 \ (P_2 \ O_5)}{30.97 \ (P)} = 229 \text{ mg/L } P_2O_5$$

Sabiendo la riqueza en P_2O_5 de la urea fosfato (44%), calculamos cuanto abono es necesario para aportar 229 mg/L de P_2O_5:

$$229 \frac{100}{44} \quad \textbf{520 mg/L urea fosfato}$$

Ya con la cantidad de abono calculada y su riqueza en nitrógeno (18%), determinamos el aporte de N :

$$520. \frac{18}{100} = \textbf{94 mg/L N amoniacal } (\textbf{N-NH}_4^+)$$

Ejemplo 3.5: **En un momento dado se está aportando 300 mg/L de nitrato de calcio. Calcular los aportes de nutrientes (CaO, N total, nítrico y amoniacal) así como la concentración de Ca^{2+} en mmol/L y en meq/L.**

$300 . \frac{27}{100}$ = **81 mg/L CaO**

$300 . \frac{15.5}{100}$ = **46.5 mg/L N total**

De los 46.5 mg/L de nitrógeno total, tendríamos:

$300 . \frac{14,4}{100}$ = **43.3 mg/L N nítrico ($N\text{-}NO_3$)**

$300 . \frac{1,1}{100}$ = **3.3 mg/L N amoniacal ($N\text{-}NH_4$)**

En cultivo en suelo, se suele considerar a efectos prácticos el aporte de N del nitrato de calcio en su totalidad como nítrico, debido a la baja cantidad de N amoniacal, (Por cada 100 mg/L de nitrógeno aportado, 93 mg/L está en forma nítrica y 7 mg/L en amoniacal).

Por último;

$$\frac{300}{216,1 \text{ (masa molecular nitrato de calcio)}} = \textbf{1.39 mmol/L nitrato de calcio =}$$

1.39 mmol/L Ca^{2+}

1.39 mmol/L Ca . 2 (valencia del Ca) =**2.78 meq/L Ca**

Ejemplo 3.6: **En una parcela de 5000 m^2se está aportando 1 kg de nitrato potásico y 0.5 kg de fosfato monoamónico, nitrato de calcio y de nitrato amónico. Calcular los aportes de N, P_2O_5, K_2O y CaO:**

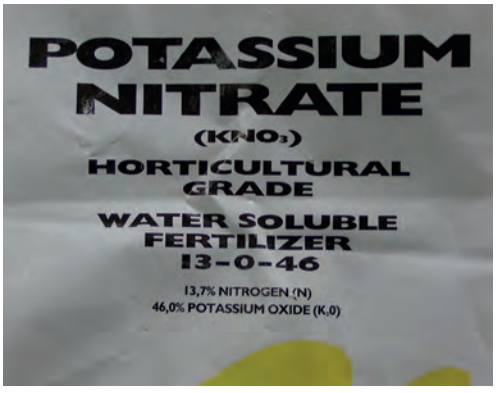
Trabajando con los porcentajes de la tabla 9, usamos la siguiente tabla para facilitar el proceso:

El cálculo para el fosfato monoamónico sería:

500 g fosfato monoamónico . 0.61 =305 g P_2O_5 y 500 . 0.12 = 78 g N/5000 m^2

El proceso sería similar en el resto de fertilizantes:

Fertilizante	Cantidad (gramos/5000 m2)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Fosfato monoamónico (12-61 -0)	500	60	305	0	0
Nitrato calcio (15.5-0-0-27CaO)	500	78	0	0	135
Nitrato potasio (13-0-46)	1000	130	0	460	0
Nitrato amónico (34.5 -0-0)	500	173	0	0	0
Totales		**441**	**305**	**460**	**135**



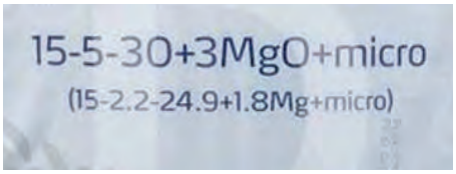


Figura 11: Etiquetas con las riquezas de un fertilizante simple (izquierda) y de un complejo (derecha)

3.1.1. Los abonos complejos

Además de las sales simples, se comercializan abonos complejos altamente solubles que se pueden utilizar para la confección de soluciones nutritivas, con distintas riquezas de N, P_2O_5 y K_2O (Figura 11). La elección del equilibrio entre N, P_2O_5 y K_2O dependerá fundamentalmente del estado de desarrollo del cultivo. De forma muy sucinta se podrían establecer varios tipos de equilibrios:

- Establecimiento o Principios de cultivo: Tienen una alta cantidad de fósforo frente a nitrógeno y potasio, con una proporción 1:2:1 o 1:3:1 (N:P_2O_5:K_2O) (15-30-15, 13-40-13, etc).

- Crecimiento: Se suelen usar en algunos cultivos hortícolas en pleno cultivo, donde se superpone el crecimiento vegetativo activo, la floración y el cuaje de fruta. La proporción está en el entorno 1:1:1 (18-18-18, 19-19-19, 20-20-20, 15-15-15, etc).

- Vegetativos: Presentan una relación parecida entre nitrógeno y potasio y el fósforo algo más bajo (17-6-18, 17-5-19, 15-10-15, 20-10-25, etc).

- Fructificación: Tienen una alta proporción de potasio frente al fósforo y en menor medida frente al nitrógeno (15-5-30, 20-5-30, 13-5-26, 13-6-26, 20-6-28, 15-5-24, 15-0-20, etc).

- Además del equilibrio N:P_2O_5:K_2O, hay varias cuestiones importantes a la hora de elegir un complejo:

- El origen del nitrógeno, que puede ser nítrico, amoniacal o amídico (procedente de urea). La proporción de nitrógeno nítrico está normalmente entre un 30 y un 70% del total (aunque en algunos se puede encontrar tanto un 100% de nitrógeno nítrico como un 100% de nitrógeno amoniacal y ureico).

- La formulación con otros nutrientes. Además de la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio, muchos de los complejos suelen venir formulados con magnesio (expresados como MgO) y con microelementos. La incorporación de magnesio se suele deber a que los abonos se formulan teniendo en cuenta las características de suelos y aguas con altos contenidos de

calcio y bajos de magnesio. En otros casos, los equilibrios se formulan para cultivos exigentes en este elemento.

En zonas como Canarias, donde las aguas normalmente tienen unos niveles de magnesio suficientes incluso para cultivos exigentes, este nutriente en los complejos no es un elemento tan importante. En función de los aportes del agua de riego y del análisis de suelo, puede tener que disponerse, bien de una fuente complemventaria de calcio (normalmente nitrato de calcio) o buscar complejos con calcio (expresado como CaO). La oferta de complejos con calcio es relativamente limitada y suele tener un mayor precio por kg.

El uso de fertilizantes complejos no es nada frecuente en cultivos sin suelo al no soler existir formulaciones adecuadas, por el ajuste de la relación NH_4^+/ NO_3^- y por la necesidad de acidificar. Sin embargo, en el caso de cultivo en suelo, el uso de fertilizantes complejos facilita mucho la confección de soluciones nutritivas, sobre todo en explotaciones pequeñas y con equipos de fertirrigación sencillos. Por otra parte, el precio suele ser superior al uso de abonos simples y en algunos casos, los equilibrios disponibles no se adaptan a condiciones particulares en las explotaciones (cultivo, suelo), como se verá posteriormente (apartado 4.4.3).

Ejemplo 3.6: **Se está aplicando una dosis de 1000 mg/L un abono complejo 14-6-28-6CaO. El producto tiene un 11.5% de N nítrico y un 2.5% de N ureico.**

Calcular la solución nutritiva que se estaría aportando en mmol/L:

Calculamos los aportes de nutrientes como óxidos:

$1000.\frac{14}{100}$ **=140 mg/L N**; $1000.\frac{6}{100}$ **= 60 mg/L P_2O_5**; $1000.\frac{28}{100}$ =

280 mg/L K_2O; $1000.\frac{6}{100}$ **= 60 mg/L CaO**

Si queremos saber los aportes como iones, usaríamos los factores de la tabla 2:

$1000.\frac{11,5}{100}$= 115 mg/L N nítrico**;**

$\frac{115}{14}$ **= 8.21 mmol/L NO_3^-**

$1000.\frac{2,5}{100}$= 25 mg/L N ureico**;**

Si suponemos que transcurre el tiempo necesario en el suelo /sustrato para que ocurra el paso de N ureico a N amoniacal:

$\frac{25}{14}$ **= 1,79 mmol/L NH_4^+**

Seguimos con el resto de nutrientes del complejo:

$\frac{60}{70,97}$ **=0.85 mmol/L $H_2PO_4^-$**

$\frac{280}{47,1}$ **=5.94 mmol/L K^+**

$\frac{60}{56,08}$ **=1.07 mmol/L Ca^{2+}**

Viendo las concentraciones **y sin tener en cuenta los valores del agua de riego**, puede ser complicado realizar una solución nutritiva para cultivo sin suelo sólo con ese equilibrio ya que tendríamos relaciones entre iones nada óptimas:

$\frac{NH_4^+}{NO_3^-} = 0.22$ En cultivo sin suelo debería tener un valor máximo de 0.1

$\frac{K}{Ca} = 5,6$ en cultivo de tomate y otras solánaceas de fruto debería tener un valor máximo de 2. Habría que calcularla sumando los valores de Ca del agua para ver si baja a valores aceptables.

3.1.2 Los ácidos y la acidificación de soluciones nutritivas

Como se comentó en el apartado 2.4.3, en el caso que se deba bajar el pH se usan compuestos ácidos. De forma comercial se usan normalmente ácido nítrico y fosfórico y en menor medida, ácido sulfúrico. En casos muy puntuales se podría usar ácido clorhídrico (que aporta cloruros) o ácidos orgánicos (ácido acético o cítrico). En este último caso, hay que tener en cuenta que se trata de ácidos débiles por lo que sería muy recomendable realizar curvas de neutralización del agua de riego con el producto que vayamos a utilizar.

Los ácidos propiamente dichos se presentan comercialmente como líquidos de riqueza y densidad variable (ver tabla 11 y figura 13).

Tabla 11: Riqueza y densidad de algunos ácidos comerciales usados en fertirrigación

Ácido	Riqueza en nutriente		Riqueza en ácido	Densidad
	% (peso)			g/cm3
Ácido fosfórico	52	P_2O_5	72	1.59
	54		75	1.57
	56		77	1.60
	57		78	1.61
	58		80	1.63
	59		82	1.65
	62		85	1.69
	72.4		100	1.87
Ácido nítrico	12.4	N	56	1.33
	12.5		60	1.34
	13.0		60	1.33
	15.0		68	1.37
Ácido sulfúrico	--		97	1.84
	--		98	1.87

En el caso del ácido sulfúrico, algunas empresas ofrecen la posibilidad de suministrar el producto más diluido de las concentraciones comerciales más corrientes para disminuir los riesgos de manejo. Los ácidos se pueden adquirir en envases pequeños, normalmente de 25 litros, en algunos casos en envases de 1000 L o como granel.

Los dos factores que van a influir en la capacidad de neutralizar bicarbonatos de un ácido dado van a ser su valencia y su riqueza en ácido:

La valencia sería equivalente al número de mmol/L de bicarbonatos destruidos por cada mmol/L de ácido añadido. Esta valencia depende principalmente del número de iones hidrógeno que reaccionan.

En el caso del ácido nítrico y del sulfúrico, la reacción es rápida y completa: La valencia del ácido nítrico es 1: por cada mmol/L de HNO_3 aportado se neutra-

liza un mmol/L de bicarbonato. La valencia del ácido sulfúrico es 2: por cada mmol/L de H_2SO_4 aportado se neutralizan 2 mmol/L de bicarbonatos.

Como se explicó en el apartado 2.4.1, la cantidad de hidrogeniones, y por tanto la valencia del ácido fosfórico es dependiente del pH final de la solución nutritiva (ver figura 12). En la tabla 12 se muestran los porcentajes calculados de cada especie para los pH normales en soluciones nutritivas.

Tabla 12: Porcentajes de cada especie de fosfato presentes en función del pH y valencia aproximada en los intervalos normales en soluciones nutritivas

pH	especie fosfatada (% P total)				Valencia aproximada
	H_3PO_4	$H_2PO_4^-$	HPO_4^{2-}	PO_4^{3-}	
5,50	0,0	98,0	2,0	0,0	1,02
5,75	0,0	96,6	3,4	0,0	1,03
6,00	0,0	94,1	5,9	0,0	1,06
6,25	0,0	89,9	10,1	0,0	1,10
6,50	0,0	83,4	16,6	0,0	1,17
6,75	0,0	73,8	26,2	0,0	1,26
7,00	0,0	61,3	38,7	0,0	1,39
7,25	0,0	47,1	52,9	0,0	1,53
7,50	0,0	33,4	66,6	0,0	1,67

Vemos que a pH 5,5 no queda nada de fosfato total como ácido sin disociar lo que supone que cada molécula ha cedido ya un hidrogenión, un 98% del fosfato total está como $H_2PO_4^-$ y solo un 2% ya ha pasado a HPO_4^{2-}. Si consideramos 100 moléculas de fosfato, todas han cedido ya un hidrogenión y sólo 2 han cedido el 2º, por lo que consideramos una valencia de 1,02.

En función de lo anterior y a efectos de cálculo, la valencia del ácido fosfórico se supone 1 a valencia 5.5 – 6.0 (valor al que se regulan las soluciones en cultivo sin suelo).

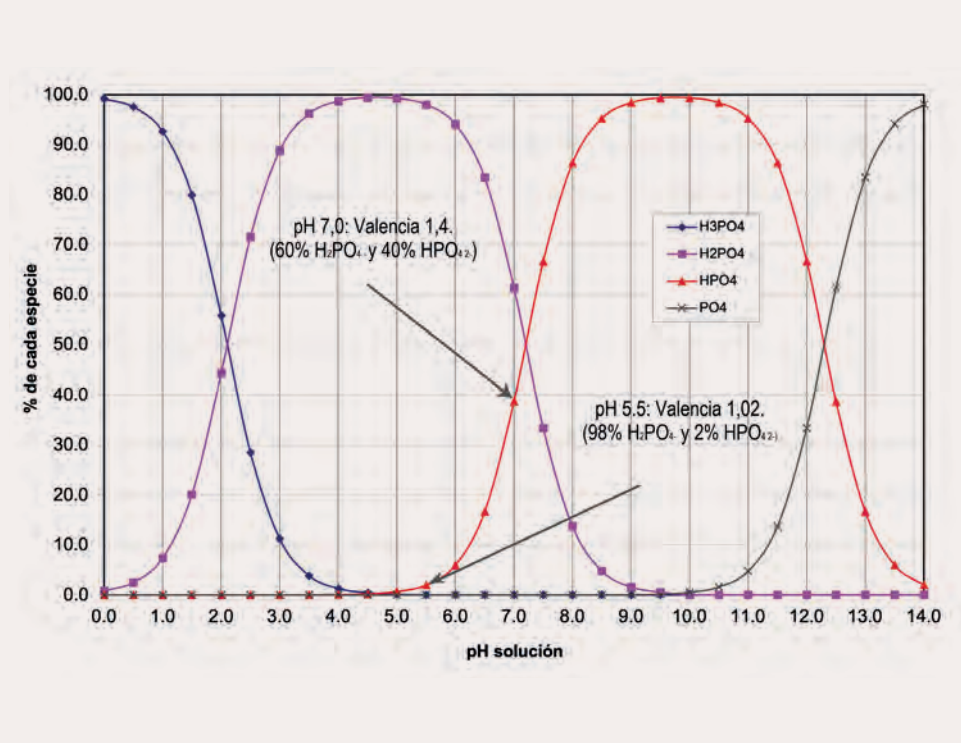


Figura 12: Valencia del ácido fosfórico en función del pH

El segundo factor que influye en la capacidad de neutralización de la alcalinidad sería la riqueza del ácido comercial. Cuando se habla de riqueza, puede hacerse como porcentaje en peso de nutriente (% N o % P_2O_5) o como porcentaje en peso de ácido puro. El porcentaje de ácido puro es imprescindible para poder calcular la cantidad de bicarbonatos a destruir.

El porcentaje de ácido puro, de nutriente (en su caso) y la densidad están directamente relacionados

Como un indicativo de lo anterior se dan las capacidades de neutralización de distintos ácidos, a su vez con distintas riquezas (entre paréntesis se indica el porcentaje de ácido puro y la densidad):



Figura 13: Envases de 25 litros de ácido nítrico

Para neutralizar 1 mmol/L de HCO_3^- necesitamos:	84.0 cm^3 HNO_3 (56%; 1.34 g/cm^3) / 1000 L de solución nutritiva
	78.7 cm^3 HNO_3 (59%; 1.36 g/cm^3) / 1000 L
	82.6 cm^3 H_3PO_4 (75%; 1.58 g/cm^3) / 1000 L (a pH 5.5: valencia 1)
	68.0 cm^3 H_3PO_4 (85%; 1.69 g/cm^3) / 1000 L (a pH 5.5: valencia 1)
	27.2 cm^3 H_2SO_4 (98%; 1.84 g/cm^3) / 1000 L

Por otra parte, desde el punto de las variaciones de la CE por la adición de ácidos, hay una sustitución de un miliequivalente de bicarbonato por la del catión correspondiente al ácido añadido, al neutralizar el agua de riego. Sin embargo, la actividad química de cada uno de los cationes de los ácidos es diferente. En la figura 14 se presentan los cambios de CE al neutralizar a

pH 5.3 de soluciones de bicarbonatos de concentración creciente con ácido nítrico, fosfórico y sulfúrico:

- El nitrato tiene una mayor actividad que el bicarbonato, subiendo la CE según va subiendo la adición de ácido. Para una adición de 5 mmol/L de ácido nítrico (que neutralizan 5 mmol/L de bicarbonatos) supondría una subida de 89 µS/cm (0.09 dS/m).

- El fosfato tiene menor actividad que el bicarbonato, bajando muy ligeramente la CE según va subiendo la adición de ácido. La adición de 2 mmol/L de ácido fosfórico (que ya sería un valor muy alto) baja la CE en 1 µS/cm (0.001 dS/m).

- El ion sulfato tendría el comportamiento más particular: según sube la concentración de ión, el incremento de la CE va bajando hasta llegar a ser negativo, de ahí la forma de la curva en la gráfica. La adición de 5 mmol/L de ácido sulfúrico (que neutralizarían 10 mmol/L de bicarbonatos) supondría una subida de la CE de 19 µS/cm (0.02 dS/m).

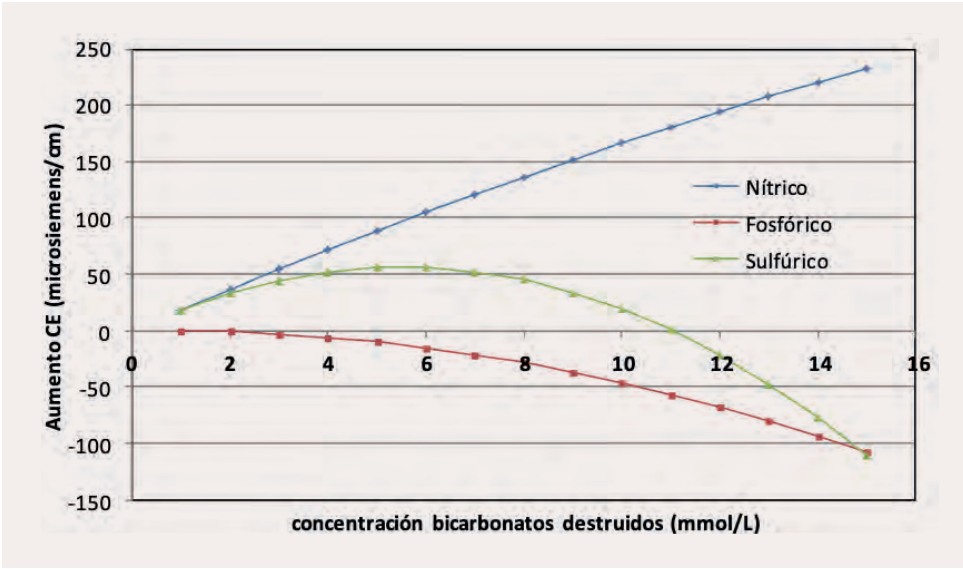


Figura 14: Cambios en la CE debida a la adición de ácido nítrico, fosfórico y sulfúrico a diferentes soluciones de bicarbonato para dejar el pH en 5.3 (Alarcón, 1998).

Viendo los datos anteriores, trabajando a pH 5.5, podríamos considerar que la adición de ácidos a concentraciones normales no sube la CE de forma significativa. Sin embargo, cuando la neutralización no es completa (trabajando con pH por encima de 6.5), es de esperar una subida de la CE por la adición de los ácidos, sobre todo si hay presencia de carbonatos que tienen que pasar primero por bicarbonato antes de poder ser neutralizados por completo.

Además de la capacidad de neutralización de alcalinidad, a la hora de elegir un ácido para fertirrigación hay que tener en cuenta varios aspectos:

- Los riesgos laborales. La utilización de ácidos concentrados es un factor de riesgo laboral muy importante por dos razones: su poder corrosivo y la emisión de vapores tóxicos (especialmente el ácido nítrico). Deben seguirse las directrices sobre su manejo y almacenamiento, teniendo especial cuidado en el uso de EPIs para evitar el contacto con ojos, con la piel y la inhalación de los gases, uso de depósitos homologados, medidas de control de derrames, rotulación pertinente, etc. Asimismo, estos riesgos implican la formación del personal que maneja estos materiales.

- La capacidad del cabezal para usar ácidos (tipo y control de la inyección, número de tanques...)

- El aporte de nutrientes que supone la adición de ácido nítrico o fosfórico. En aguas con alcalinidad moderada, las adiciones de nutrientes de estos ácidos pueden superar las cantidades marcadas en la fertilización. Por ejemplo, cada mmol/L de bicarbonatos que se neutraliza con ácido nítrico (59% ácido, 12.5%N) supone un aporte de 12.8 mg/L de N. Si se usa ácido fosfórico (75% ácido; 54% P_2O_5), el aporte de nutriente sería de 70.5 mg/L de P_2O_5.

3.1.2.1. Cálculos con ácidos

Los cálculos en acidificación consisten normalmente en determinar la cantidad de ácido a aportar en meq/L o mmol/L y seguidamente calcular la cantidad de ácido comercial necesaria en volumen. Este cálculo suele ser directo o inverso (calcular la cantidad de alcalinidad destruida por un aporte de un ácido comercial determinado). Los pasos más frecuentes se dan en las siguientes fórmulas:

$$\frac{\frac{mg}{L}\ \text{ácido puro}}{\text{Masa molecular}} = \text{mmol / L ácido} \qquad \frac{\frac{mg}{L}\ \text{ácido puro}}{\text{Valencia . Masa molecular}} = \text{meq / L ácido}$$

$$\frac{\frac{mg/L}{L}\ \text{ácido puro}}{10.\ \text{riqueza}\ (\%).\text{densidad}\ (\frac{g}{cm^3})} = \text{L ácido comercial por 1000 L de solución nutritiva*}$$

$$\frac{\frac{meq/L}{L}\ \text{ácido} . \frac{\text{masa molecular}}{\text{Valencia}}}{10.\ \text{riqueza}\ (\%).\text{densidad}\ (\frac{g}{cm^3})} = \text{L ácido comercial por 1000 L de solución nutritiva*}$$

L ácido comercial / m³ solución nutritiva =
cm³ ácido comercial/L solución nutritiva

En el caso de los ácidos nítrico y fosfórico, además se suele tener que determinar los aportes de nutrientes. También suele ser común el cálculo de la alcalinidad neutralizada por un aporte de N o P_2O_5 mediante el ácido correspondiente.

Ejemplo 3.7: **Calcular la cantidad de ácido nítrico (60% peso, densidad 1.34 g/cm^3) necesario para neutralizar 3 meq/L de bicarbonatos:**

Para neutralizar 3 meq/L de bicarbonatos hacen falta 3 meq/L de ácido nítrico

3 mmol/L HNO_3 / 1 (Valencia) = 3mmol/L HNO_3

3 mmol/L . 63 (m. molecular)= 189 mg/L HNO_3 puro

Tendríamos ahora que operar para pasar de ácido puro a ácido comercial. En primer lugar usamos la riqueza en ácido para tener la concentración de producto comercial:

189 mg/L ácido puro / 0.6 (riqueza en tanto por uno) = 315/mg/L ácido comercial

Con la densidad del producto comercial, pasamos de masa. a volumen. Cuando vamos a usar la densidad es muy importante ser uniformes con las unidades. La densidad está en g/cm^3 por lo que pasamos la cantidad de ácido comercial de mg/L a g/L.

315 mg/L = 0.315 g/L. Para neutralizar 3 meq/L de bicarbonatos de 1 L de agua necesitaríamos 0.315 g:

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \; ; \; 1.34 = \frac{0.315}{\text{volumen}} \; ; \; \text{volumen} = \frac{0.315}{1.34} = 0.235 \text{ cm}^3$$

0.235 cm^3 ácido comercial/L solución nutritiva = 0.235 L ácido comercial / m^3 solución nutritiva

Utilizando la fórmula, llegamos al mismo resultado:

$$\frac{189}{10.60.1.34} = 0.235 \text{ L/1000 L solución nutritiva} =$$ **0.235 L/m^3 de solución nutritiva**

Ejemplo 3.8: **Calcular la cantidad de nutrientes que aportaría 0.1 cm^3 /L de ácido fosfórico (80% ácido puro, densidad 1.63, 58%P_2O_5) de solución nutritiva así como la cantidad de bicarbonatos que neutraliza, si el pH de la solución nutritiva fuera 6.5:**

Primero pasamos de volumen a masa:

0.1 cm^3/L . 1.57 = 0.157 g/L = 157 mg/L

Ya podríamos calcular el aporte de P_2O_5 que viene expresado en % p/p:

157 mg/L á. comercial . 0.58 = **91.6 mg/L P_2O_5 correspondería a un aporte de P_2O_5 de 0.1 cm^3 ácido fosfórico /L.**

Luego calculamos la concentración de ácido puro: 157 mg/L á. comercial . 0.80 = 125.6 mg/L ácido puro

Finalmente pasamos de mg/L a mmol/L

$$\frac{125.6}{98\ (\text{m.molecular})}$$

=1.28 mmol/L ácido = **1.28 mmol/L $H_2PO_4^-$ corresponden a un aporte de P_2O_5 de 0.1 cm^3 ácido fosfórico /L.**

Para saber la capacidade de neutralización, necesitamos saber la valencia del ácido fosfórico al pH final, en este caso, en la tabla 2, para pH 6.5, sería 1.17:

1.28 mmol/L ácido fosfórico . 1.17 (valencia) = 1.5 meq/L neutralizan **1.5 meq/L bicarbonatos a pH 6.5**.

Ejemplo 3.9: **Se quiere bajar el pH hasta 5.5 a un agua con las siguientes concentraciones de bicarbonatos y carbonatos:**

HCO_3^- = 9.45 meq/L ; CO_3^{2-}=0,85 meq/L

Se va a usar ácido nítrico (68%, densidad 1.37 g/cm^3, 15%N). Determinar la cantidad de N aportada y el volumen de ácido necesario:

Recordemos que a la hora de bajar el pH, necesitaremos 1 mmol/L de ácido para convertir carbonatos en bicarbonatos y 1 mmol/L más para pasarlo a CO_2 disuelto
Primeramente calculamos la alcalinidad directamente en meq/L:

9.45+ 0.85 = 10.3 meq/L

Sabiendo que 0.5 mmol/L de bicarbonatos son 0.5 meq/L de bicarbonatos:

10.3 meq/L – 0.5 meq/L = 9.8 meq/L de alcalinidad a neutralizar

9,8 mmol/L de alcalinidad necesitan 9,8 mmol/L de ácido nítrico **= 9,8 mmol/L NO_3^-** se están aportando para bajar el pH a 5.5.

9,8 mmol/L . 63 = 617 mg/L ácido nítrico puro

$617.4 . \frac{100}{68}$ = 908 mg/L ácido comercial = 0,908 g/L ácido comercial

$908 . \frac{15}{100}$ = **136.2 mg/L de N se están aportando para bajar el pH a 5.5.**

Para calcular el volumen necesario, operamos con la densidad del producto comercial Hay que pasar de mg/L a g/L para mantener las unidades de la densidad:

$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$; $1.37 = \frac{0,908}{\text{volumen}}$; $\text{volumen} = \frac{0,908}{1,37}$ =

0.663 cm^3/L = 663 cm^3 de ácido nítrico comercial / m^3 de solución nutritiva

Normalmente se suele usar ácido nítrico como fuente principal para bajar el pH más que el fosfórico ya que las necesidades de N suelen ser mucho más altas que de fósforo. En aguas con alcalinidad moderada se suele utilizar de forma conjunta ambos ácidos: se aporta todo el fósforo como ácido y luego ácido nítrico hasta alcanzar el pH deseado (siempre teniendo en cuenta los aportes de N). En algunos casos (aguas muy alcalinas), la acción conjunta de los ácidos nítrico y fosfórico no es capaz de llevar el pH al valor deseado, respetando las concentraciones prefijadas de nutrientes. Una solución podría ser el uso de otros ácidos, como el clorhídrico o el sulfúrico (ver apartado 4.2.2).

3.1.2.2. Otros productos con acción acidificante

Además de los ácidos propiamente dichos, algunos otros abonos pueden ayudar a bajar el pH. Hay distintas sales, que al ionizarse provocan una variación del pH significativa. Uno de los abonos sólidos con mayor influencia sobre el pH es la urea fosfato. Este fertilizante se hidroliza en agua pasando a urea y ácido fosfórico. En las características del producto comercial se señala que neutraliza aproximadamente 0.6 mmol/L de HCO_3^- por cada 100 mg/L de abono. El tope de bicarbonatos neutralizables con urea fosfato es la cantidad máxima de fósforo que se va a añadir. La urea fosfato no se usa en cultivos sin suelo, debido a la alta cantidad de nitrógeno amídico que suministraría a la solución nutritiva.

Últimamente se han sacado al mercado otros fertilizantes de características similares a la urea fosfato, con una acción acidificante marcada. Al tratarse de productos comerciales, debe consultarse con la empresa distribuidora su capacidad de neutralización de bicarbonatos y tenerse en cuenta su riqueza en nutrientes. Uno de ellos, con una formulación 0-60-20 tiene un poder neutralizante de 1 meq/L de bicarbonatos por cada 240 mg/L de fertilizante, según su catálogo (0.42 meq/L bicarbonatos por cada 100 mg/L de producto).

Tanto el fosfato monopotásico como el monoamónico tienen una cierta actividad acidificante, aunque no cuantificable en la medida de los abonos citados en el párrafo anterior. El resto tienen una influencia muy débil sobre el pH. En aguas alcalinas se deben usar preferentemente abonos de reacción ácida o neutra que ayuden a mantener el pH en los niveles deseados.(ver tabla 8).

Ejemplo 3.10: Calcular la cantidad de urea fosfato necesaria para aportar 50 mg/L de P , el N aportado con esa cantidad y la cantidad de bicarbonatos neutralizada:

$$50 \text{ mg/L P.} \frac{70{,}97\ (P_2O_5)}{30.97\ (P)} = 115 \text{ mg/L } P_2O_5$$

$$115. \frac{100}{44} = \mathbf{261 mg/L \text{ urea fosfato}}$$

$$261 . \frac{18}{100} = \mathbf{47 \text{ mg/L N ureico}}$$

Cada 100 mg/L de urea fosfato neutraliza 0.6 mmol/L HCO_3^-;

$$261. \frac{0{,}6}{100} = \mathbf{1.6 \text{ mmol/L } HCO_3^-}$$

Hay que tener en cuenta que la acción acidificante de muchos abonos que se encuentra en la bibliografía, en especial la de los abonos amoniacales, se lleva a cabo en el suelo, por la nitrificación y no en la solución nutritiva, ya que se debe a procesos de absorción por las raíces como se explicó en la sección 2.4.3.

3.2.2. Alcalinización de soluciones nutritivas

En el caso que el agua de riego disponible tenga una alcalinidad muy baja (menos de 0.5 mmol/L), nos encontraríamos con que tendríamos que aumentar ese valor para mantener una capacidad tampón que mantenga el pH en el entorno de 5.5 – 6.0 tras la adición de fertilizantes. Estas aguas no son frecuentes, siendo las procedentes de desalación sin postratamiento las únicas encontradas en la experiencia de los autores.

Como se comentó en el apartado 2.4.3, puede ser recomendable poner un valor de consigna ligeramente superior a 0.5 mmol/L para garantizar la capacidad tampón, así como realizar un control pormenorizado de pH de la solución.

Se suelen encontrar dos productos para subir la alcalinidad: el bicarbonato potásico y el hidróxido potásico. Cuando aportamos 1 mmol/L de $KHCO_3$, estamos aportando 1 mmol/L de HCO_3^-. Se considera que la adición de 1 mmol/L de KOH aumentaría la alcalinidad en 1 mmol/L. Estos dos productos son sólidos por lo que los cálculos serían sencillos. En el caso de usar un producto líquido habría que disponer de la riqueza en producto y la densidad y operar de la misma forma que con los ácidos.

Otra opción para subir la alcalinidad del agua sería la mezcla con aguas de mayor contenido de bicarbonatos. Usando la ley de mezclas, calcularíamos la cantidad de agua de mayor alcalinidad a mezclar. Con la ley de mezclas no se podría calcular el pH del agua mezcla aunque si la concentración de la alcalinidad (la cantidad por separado de carbonatos y bicarbonatos depende del pH). El resto de iones se puede calcular sin problemas

En este tipo de aguas se deben usar preferentemente abonos de reacción alcalina o neutra que ayuden a mantener el pH en los niveles deseados (ver tabla 8).

Ejemplo 3.11: Un agua de riego tiene 0.2 mmol/L de bicarbonatos. Calcular la cantidad de bicarbonato potásico y de hidróxido potásico para subir la concentración de bicarbonatos a 0.75 mmol/L.

0.75 – 0.2 = 0.55 mmol/L HCO_3^- a aportar:

0.55 mmol/L HCO_3^- → 0.55 mmol/L $KHCO_3$; 0.55 . 100.1 =
55 mg/L bicarbonato potásico

0.55 mmol/L HCO_3^- → 0.55 mmol/L KOH; 0.55 . 56.1 =
31 mg/L hidróxido potásico

Calcular la proporción de mezcla si va a subir la alcalinidad con la ayuda de otra agua de riego con 2.5 mmol/L de bicarbonatos.

En nuestro caso, la ley de mezclas (en porcentajes) se formularía así, llamando A al agua de 0.2 mmol/L y B a la de 2.5 mmol/L:

$[HCO_3^-]_{final}$ = ($[HCO_3^-]_{agua\ A}$. proporción agua A) + ($[HCO_3^-]_{agua\ B}$. proporción agua B)

Llamamos a x a la proporción de agua B; 100-x tendría que ser el porcentaje de agua A

100 . 0.75 = 0.2 (100-x) + 2.5 x → 75 = (20-0.2x) +2.5x → 55 = 2.3x → x = 23.9 de agua de B

100-23.9 = 76.1% agua A

La mezcla debería tener un 23,9% del agua de 2.5 mmol/L (agua B) y un 76.1% de agua de 0.2 mmol/L (agua A).

3.2. Abonos con micronutrientes

Los microelementos se pueden aportar como sales o bien con productos que intenten estabilizar los nutrientes en forma disponible para la planta sin que precipiten por el pH del suelo (quelatos y agentes complejantes).

- Sales: La riqueza de las sales es mucho mayor que la de los quelatos y que la de los complejantes. Sin embargo, puede más difícil conseguir comercialmente las sales. Hay que tener en cuenta que harán falta pesas de cierta precisión, por la baja concentración necesaria.

  En función del pH del suelo o del sustrato, puede ser que los microelementos aportados como sales precipiten, sobre todo los cationes (Fe, Mn, Zn y Cu), en especial el hierro. Sin embargo, no suelen haber problemas con el boro y el molibdeno.

- Quelatos: Son productos donde una molécula orgánica (agente quelante), rodea al micronutriente como catión metálico, de modo que queden salvaguardados del entorno que favorecería su precipitación en forma de hidróxido insoluble y no disponible para la planta. El agente quelante tiene una buena estabilidad en el suelo o sustrato. Existen agentes quelantes que mantienen solubles los microelementos en un rango de pH muy amplio (ver apartados 2.4.2 y 6.1)

- Agentes complejantes. Los productos que actúan como complejantes suelen ser aminoácidos, citratos, gluconatos, lignosulfonatos, sustancias húmicas, entre otros. Aunque actúan de una forma parecida a los quelatos, no suelen tener la estabilidad de algunos quelatos frente a pH altos, lo que los hace más recomendables para suelos o sustratos con valores próximos a la neutralidad o para aplicaciones foliares.

En función de lo anterior, se podría establecer la siguiente tabla con la estabilidad relativa de los agentes quelantes y complejantes más frecuentes:

Tabla 12: Estabilidad relativa de diferentes quelatos y complejantes en función del pH

Tipo de quelato/complejante	Aplicación al suelo*		Aplicación foliar**	
	pH neutro-ácido	pH alcalino	pH neutro -ácido	pH alcalino
EDTA Fe	Buena	Mala	Buena	Media
EDDHA Fe	Buena	Buena	Buena	Buena
EDTA (Zn, Mn, Ca, Mg, mix)	Buena	Buena	Buena	Buena
Aminoácidos***	Buena	Mala	Buena	Buena
Ácidos orgánicos***	Buena	Mala	Buena	Media
Lignosulfonatos***	Buena	Media	Buena	Buena

*: pH del suelo. **: pH del caldo.
*** La estabilidad del hierro va a ser menor que la de los otros microelementos.

Puede ser recomendable realizar un análisis de microelementos en la solución nutritiva cuando se formule en el cabezal y un foliar, éste tras un periodo mínimo de una semana del comienzo de la aplicación, para comprobar la bondad del producto (sal, quelato, complejante) que se está aplicando.

En la tabla 13 se presentan los fertilizantes más usados para aportar microelementos en cultivos sin suelo, bien como sales (salvo para el hierro) o como quelatos. La riqueza de los quelatos varía normalmente entre los límites dados en la tabla, aunque se pueden encontrar concentraciones menores.

Tabla 13. Fertilizantes que aportan microelementos usados para realizar soluciones nutritivas.

Elemento	Fertilizante	Riqueza (% elemento)
Boro	complejado con etanolamina	2-12
	tetraborato de sodio ($Na_2B_4O_7$)	11
	ácido bórico (H_3BO_3)	18-21
Cobre	sulfato de cobre ($CuSO_4.5H_2O$)	25
	quelato (EDTA)	8-14
Manganeso	sulfato de manganeso ($MnSO_4.H_2O$)	32
	quelato (EDTA)	6-12
Hierro	quelato (DCHA)	9
	quelato (DTPA)	5-7
	quelato (EDDHA y derivados EDDHMA, EDDHSA)	5-7
	quelato (EDTA)	5-13
	quelato (HEBD)	7-9
	quelato (IDHA)	6-9
Cinc	sulfato de cinc ($ZnSO_4.7H_2O$)	25
	quelato (EDTA)	5-15
Molibdeno	molibdato de sodio ($Na_2MoO_4.2H_2O$)	40
	heptamolibdato amónico ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}$)	58

Existen dos opciones para su incorporación: el uso de productos que contienen uno de los elementos o de preparados comerciales de varios elementos con unas concentraciones dadas, donde los microelementos, salvo el boro y el molibdeno vienen como quelatos o complejos. El uso de estos preparados, conocidos a veces como "combis", facilita la elaboración de la solución nutritiva (al evitar hacer tantas pesadas como microelementos), aunque pueden ser poco flexibles, especialmente para cultivos con necesidades muy específicas, con problemas puntuales con un solo microelemento o cuando se necesita un

quelato determinado. Normalmente los microelementos Fe, Mn, Cu y Zn suelen venir como quelatos o complejos, el B puede venir en forma de sal o complejado con etanolamina y el molibdeno suele venir como sal.

La elección del tipo de quelato es especialmente importante en el caso del hierro. Como se dijo en la sección 2.4.2, el hierro precipita muy fácilmente en función del pH del entorno (solución nutritiva o solución del suelo o sustrato). Esto hace que en prácticamente todas las ocasiones, este elemento se tiene que aplicar como quelato o complejado. En las figuras 5 y 25 se representaba la estabilidad de diferentes quelatos de hierro en función del pH.

A la hora de elegir el quelato debe tenerse además en cuenta otros condicionantes. Hay quelatos que se descomponen rápidamente en el suelo, como el DTPA, otros que tienen más afinidad por otros cationes que por el hierro, como el EDTA, o los que reaccionan con la materia orgánica bajando su efectividad, como el EDDHA.

CAPÍTULO 4

CÁLCULO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA

El cálculo de la solución nutritiva se suele hacer en dos partes: ajuste de macroelementos y ajuste de microelementos. En soluciones para cultivo en suelo, normalmente no suelen existir unos requerimientos marcados de microelementos, ya que dependen mucho del tipo de suelo con el que se esté trabajando.

En ambos casos, una vez calculados los aportes de iones hay que comprobar que no se produzcan problemas de precipitación en la solución nutritiva. Además, se debe tener una idea de la CE aproximada de la solución nutritiva. En el caso que ese valor no coincida con la CE consigna, se deben realizar los ajustes necesarios.

4.1 Ajuste de los macroelementos en cultivos en suelo

Como se ha dicho anteriormente, en cultivo en suelo, se suele partir para calcular una solución nutritiva del equilibrio entre nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio y normalmente magnesio o calcio) y de una concentración de fertilizantes máxima. Antes de centrarnos en los cálculos, vamos a hacer un pequeño repaso a la elección de las concentraciones de fertilizantes.

4.1.1. Elección de la concentración de fertilizantes

En condiciones ideales se puede disponer de soluciones nutritivas ya adaptadas o ensayadas para las condiciones de la zona de cultivo donde estén estableci-

das las concentraciones a aplicar. Estas soluciones, como se comentó arriba suelen estar adaptadas a unas condiciones determinadas edafoclimáticas, un manejo determinado del cultivo, a un tipo varietal, etc.

La concentración mínima podría calcularse a partir de las extracciones de cosecha estimadas, que es una herramienta para aquilatar las cantidades de abono a aportar, procurando que coincidan en lo posible, teniendo en cuenta que en algunos suelos y con algunos nutrientes puede ser necesaria una mayoración al haber pérdidas inevitables. Hay varias recopilaciones de extracciones de cosecha y de necesidades totales por campaña de distintos cultivos, entre que podría destacarse la del Ministerio de Agricultura (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). En la tabla 14 se presentan los intervalos de extracciones de cosecha de algunos cultivos fertirrigados en Canarias, con las referencias bibliográficas usadas para obtenerlas. Para llegar a pasar esos datos a concentraciones, también se tendría que estimar una dotación de riego.

Tabla 14. Extracciones de cultivo
(kilogramos de nutriente por tonelada de cosecha kg/t) de algunos cultivos en Canarias.

Se considera sólo las extracciones del producto cosechado, quedando en el suelo los restos de cultivo.

Elemento	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO
Plátano (Marchal y Mallesard, 1979; Lahav y Turner, 1989; Domínguez y Nogueroles, 2012; Weinert y Simpson, 2016)	1.8 – 3.8	0.5 – 1.3	10.0 – 15.7	1.4 – 2.8	0.8 – 1.6
Aguacate (MARM, 2010; Lahav y Kadman, 1990)	1.1 – 2.8	0.4 – 2.3	2.3 – 8.1	0.29 – 0.7	0.8 - 1.8
Mango (MARM, 2010; Mellado et al, 2019)	0.75 – 1.2	0.25 - 0.45	1.5 - 2.7	0.14 -0.41	0.17 – 0.33
Piña tropical (MARM, 2010)	3.7	1.1	7.1	2.2	0.76
Papaya (MARM, 2010)	1.8	0.6	2.6	0.5	0.5

Elemento	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO
Papa (HAIFA, 2019; Koch et al, 2020)	3.5 - 5.0	1.2 - 2.0	5.0 - 10.0	0.80	0.55
Tomate (MARM, 2010; Peet, 2005, Segura, 2012).	2.5 – 2.7	0.7 - 1.2	4.3 – 4.8	2.0 – 2.4	0.6 – 0.7
Pimiento (MARM, 2010; Segura, 2012)	3.0 – 4.8	0.5 – 2.0	5.3 – 6.7	1.0 - 1.3	0.7 – 0.8
Calabacín (MARM, 2010, Segura, 2012, Contreras et al, 2018)	2.6 -4.5	0.9-1.9	4.5 – 6.0	2.1	0.8-1.7
Pepino (MARM, 2010, Castilla, 2005, Segura, 2012)	1.6 – 3.5	0.8 – 1.5	2.8 – 4.0	1.3	0.5
Habichuela (MARM, 2010, Reche, Segura, 2012)	4.5 – 7.5**	2.0 – 2.3	9.6 – 10.7	4.6	2.0
Lechuga (Jubert et al., 1997; Rincón, 2005)	1.9 -2.1	0.6 – 0.9	4.0 – 5.4	0.8 - 1.0	0.24 - 0.33
Cebolla (MARM, 2010, Khalid, 2019)	1.8 – 2.5	0.8 – 1.5	2.4 – 3.8	1.7	0.3
Coliflor (Baixauli y Maroto, 2016; Rincón et al, 2001)	4.3 -5.1	1.4 -1.9	5,2 - 6.2	2,7	1.0

*: En el caso de la coliflor se señalan las extracciones netas, teniendo en cuenta que en los residuos de cosecha queda un 55 – 60% del N, el 57-67 del P_2O_5 y el 50 – 53% del K_2O, CaO y MgO

**: No se considera el N que la propia planta puede fijar si está correctamente nodulada

En la tabla 14 se observa normalmente que los valores de extracciones están en intervalos, debido a las diferentes fundamentalmente a la heterogeneidad de las tipologías del cultivo (en el caso de la habichuela, los valores más bajos corresponden a cultivares de mata baja y los más altos a variedades de enrame, por ejemplo) en la que se determinaron los valores.

La concentración máxima de abonos puede venir marcada por diferentes factores:

- La cantidad máxima de nitrógeno aplicable según la legislación:
    - El Real Decreto de Nutrición Sostenible establece que las necesidades de nitrógeno se calcularán según las extracciones de cosecha, sin que el aporte total puede exceder en más de un 20 % ese valor. En caso de que existan determinaciones analíticas de las necesidades reales de la planta en cada momento (lo que puede incluir análisis foliar o similar) o en función de la evolución del año agrícola, estos aportes podrán modificarse, adaptándose a los resultados obtenidos.
    - En zonas vulnerables a nitratos y en algunos otros casos puntuales, puede existir normativa que marquen las cantidades o incluso los tipos de fertilizante a usar.

- En el caso de cultivos de hoja, la concentración de nitrógeno tiene que modularse para evitar problemas de nitratos al consumir el producto, al haber unos valores máximos establecidos en postcosecha.

- El Real Decreto de Nutrición Sostenible establece que las necesidades de fósforo y potasio se calcularán según las extracciones de cosecha.
    - En el caso del fósforo, no deberán sobrepasar el 30% la suma de los valores terminados para 5 años consecutivos. En caso de que el suelo se considere pobre se podría superar ese porcentaje.
    - En el caso del potasio, no deberán sobrepasar el 20% la suma de los valores terminados para 5 años consecutivos.

Ejemplo 4.1.1: **Se quieren determinar las necesidades máximas de nitrógeno, fósforo y potasio para un cultivo de papa con riego por aspersión, con una cosecha esperada de 35 t/ha, considerando el RD de Nutrición Sostenible, para un suelo con valores altos de fósforo y normales de potasio.**

Considerando las extracciones de la tabla 14 y tomando el valor medio del intervalo de N y potasio y el bajo de fósforo (por los contenidos en el suelo), tendríamos 1.2 kg/t de P_2O_5 y 7.5 kg/t de K_2O:

Solo mayoramos el N, yendo al 20% máximo, considerando que estamos usando un riego por aspersión donde puede haber pérdidas por lavado. :

N: 4.5 . 1.2 (factor de mayoración 20%) . 40 t/ha =
189 t/ha de nitrógeno

P_2O_5: 1.2 kg/t . 1 (sin factor de mayoración) . 40 t/ha =
42 t/ha de fósforo

K_2O: 7.5 kg/t . 1 (sin factor de mayoración) . 40 t/ha =
263 t/ha de potasio

Estas cantidades deben aportarse, teniendo en cuenta los contenidos de nutrientes del agua de riego, de la materia orgánica aportada y de los restos de cultivo anteriores (en su caso).

- Las cantidades máximas de nutrientes a aportar marcada por alguna norma de calidad, como por ejemplo las de Producción Integrada.

- La concentración máxima de sales que soporta el cultivo cuando se trabaja con condiciones de aguas y/o suelos salinos. Puede ser normal que los aportes de abono tengan que estar ligeramente por debajo del óptimo para evitar el estrés hídrico de la planta.

Ejemplo 4.1.2: **Teniendo en cuenta las extracciones de cultivo de platanera con una cosecha esperada de 70 t/ha y tras considerar el contenido de nutrientes en el suelo, los aportes del agua de riego y de la materia orgánica y el historial de foliares de la parcela, se ha llegado a unas cantidades de 250 kg de nitrógeno, 60 kg de P_2O_5 y 500 kg de K_2O, con un consumo de 9752 m^3/ha de agua (datos para cultivo en invernadero de la zona sur) y necesitamos estimar la concentración media durante el año.**

Escogemos unos abonos normales en la zona (nitrato amónico, fosfato monoamónico y nitrato potásico) y calculamos los aportes para completar los consumos. Dejamos para el final el nitrógeno ya que los 3 abonos aportan este nutriente.

Para aportar 60 kg P_2O_5 se necesitarían 98.4 kg fosfato monoamónico (12-61-0) que aportan además 11.8 kg de N

Para aportar 500 kg K_2O serían necesarios 1087.0 kg de nitrato potásico (13-0-46) que aportan además 141.3 kg de N.

El resto del N se aportaría como nitrato amónico:

250 kg N – 141.3 (aportados por el nitrato potásico) – 11.8 (aportado por el fosfato monoamónico) = 96.9 kg N → 289.3 kg de nitrato amónico (33.5%N)

El total de abono aportado sería 98.4+ 1087.0 +289.3 = 1474.7 kg/ha

1474.7 kg/ha / 9752 m^3/ha = **0.151 kg/m^3 = 151 mg/L**. Este valor podría ser una indicación de la concentración media de abono durante el año.

La cantidad puede variar en función de los abonos elegidos. A menor riqueza en nutrientes, mayor concentración de abonos.

A la hora de calcular la solución nutritiva (o en general cualquier plan de abonado) debe tenerse en cuenta:

- **Los aportes de nutrientes del agua de riego**, sobre todo si son cantidades apreciables. Este sería el caso de:
  - Aguas regeneradas
  - Aguas procedentes de acuíferos contaminados de nitratos
  - Aguas con altos contenidos en origen de calcio, magnesio u otros nutrientes.

  El aporte de fósforo de algunas aguas regeneradas o el de calcio o magnesio de algunas aguas puede ser superior a las necesidades de algunos cultivos (ver ejemplo 2.1.8). Por ello es extremadamente importante realizar los cálculos teniendo en cuenta las analíticas de agua y llevar un seguimiento de sus variaciones durante el cultivo por si son necesarios ajustes.

- **Los aportes de nutrientes de la materia orgánica que se irá mineralizando**. En algunos cultivos, simplemente con adiciones normales de determinados estiércoles se completarían las necesidades de uno o varios macroelementos. Es importante cuantificar esos aportes de nutrientes para restarlos a los que se tendrán que realizar con la fertirrigación. Puede ser recomendable realizar una analítica ya que los datos medios de contenidos de nutrientes que se pueden encontrar en la bibliografía pueden variar mucho en función de valores como el tipo y cantidad de cama que se haya aportado y el momento del año en que se haya recogido el estiércol.

  Otra cuestión a tener en cuenta es conocer o estimar la velocidad de mineralización de esos nutrientes para saber cuándo estarían disponibles para el cultivo.

- **La cantidad de nutriente disponible en el suelo**. En el caso del fósforo y el potasio, las cantidades disponibles en el suelo pueden hacer que los aportes en fertilización durante el ciclo de cultivo sean más bajos. Los valores analíticos de suelo nos permiten ayudar a elegir desde el punto de vista agronómico un reajuste de una determinada solución nutritiva.

  En el caso del nitrógeno, sobre todo en cultivos de ciclo largo, el valor analítico va a influir principalmente en los aportes a principios de cultivo. No existen demasiados estudios que permitan ajustar las soluciones a los contenidos de N en el suelo, al menos para condiciones subtropicales.

- **La CE máxima con la que se puede manejar el cultivo:** Cuando se trabaja con aguas salinas y/o cultivos sensibles a la salinidad, la concentración máxima de abono a aportar se puede calcular a partir de la conductividad del agua de riego y de la conductividad a la que se desea regar el cultivo. Estos valores nos dan una indicación de la cantidad máxima de abono a aportar que no tiene (y no suele) coincidir con la cantidad óptima de abono a aportar.

  En aguas de mala calidad, puede ser que se supere el valor límite sin mermas de producción: En algunos casos, es asumible la pérdida de producción y en otros casos no lo es, por lo que debe bajarse la CE de consigna y explorar otras formas de aportar los nutrientes, como podría ser subir los aportes de materia orgánica, teniendo en cuenta sus aportes de nutrientes.

Ejemplo 4.1.3: **Se dispone de un agua disponible para riego de aguacate con una CE de 750 µS/cm y se quiere regar con un valor máximo de 1000 µS/cm y se desea conocer el aporte máximo de abonos**.

Se calcula el incremento de la CE (ΔCE): ΔCE = 1000 - 750 = 250 µS/cm; Este valor sería la CE "disponible" o "máxima" para la aportación de fertilizantes

Multiplicando la CE por un factor de 0.80 (factor a usar cuando las sales que suben la CE son abonos) (ver apartado 4.4.2), se tiene una estima de la cantidad total de fertilizantes en mg/L.

Así tenemos 250 . 0.80 = **200 mg/L = 0.2 g/L**. Esta cantidad es el aporte máximo de fertilizantes a añadir.

Si el agua de riego tuviera una CE de 1200 µS/cm, y se estuviera aportando la cantidad de abono anterior, se estaría regando con 1450 µS/cm (agua + abono) estando por debajo del 75% de la producción potencial (ver tabla 6).

En todo caso, los valores óptimos de fertilización deben obtenerse en función de la obtención de una cosecha óptima sin incurrir en consumos de lujo que solo aumentan los costes y la posibilidad de contaminación de acuíferos.

En esta publicación se va a utilizar para el cálculo de soluciones en cultivo en suelo los equilibrios entre nitrógeno, fósforo como P_2O_5 y de potasio (K_2O). Se pueden introducir más nutrientes como calcio (CaO) o magnesio (MgO). Un equilibrio 1:0,5:2:0,5CaO expresaría la relación entre N, P_2O_5, K_2O y CaO: por cada kg de N, habría 0.5 kg de P_2O_5, 2 kg de K_2O y 0.5 kg de CaO. Para el cálculo de los equilibrios dividiríamos el contenido de los nutrientes entre el del nitrógeno.

Ejemplo 4.1.4: **Calcular el equilibrio N:P_2O_5:K_2O con los datos del ejemplo I.7 (68 ppm de N, 32 ppm de P_2O_5 y 118 ppm de K_2O).**

Dividiríamos las concentraciones de fósforo y de potasio entre la de nitrógeno:

$$\frac{32\ (\text{cantidad de } P_2O_5)}{68\ (\text{concentración N})} = 0.47$$

El equilibrio seria 1:0,47:1.90 (N: P_2O_5: K_2O).

$$\frac{118\ (\text{cantidad de } K_2O)}{68\ (\text{concentración N})} = 1.90$$

Si lo expresamos con un decimal, 1:0.5:1.9

Otra forma de trabajar sería usando soluciones con concentraciones en mmol/l, meq/L o mg/L como en cultivo sin suelo pero adaptadas a las condiciones diferentes en suelo. Esta técnica es cada vez más usada en zonas como Almería. En ese caso, la metodología sería similar a la usada en cultivo sin suelo (apartado 4.2).

Existen varios métodos para calcular soluciones nutritivas a partir de los equilibrios, bien de forma matemática o gráfica con ábacos (figura 16). En esta publicación vamos a explicar 2 métodos.

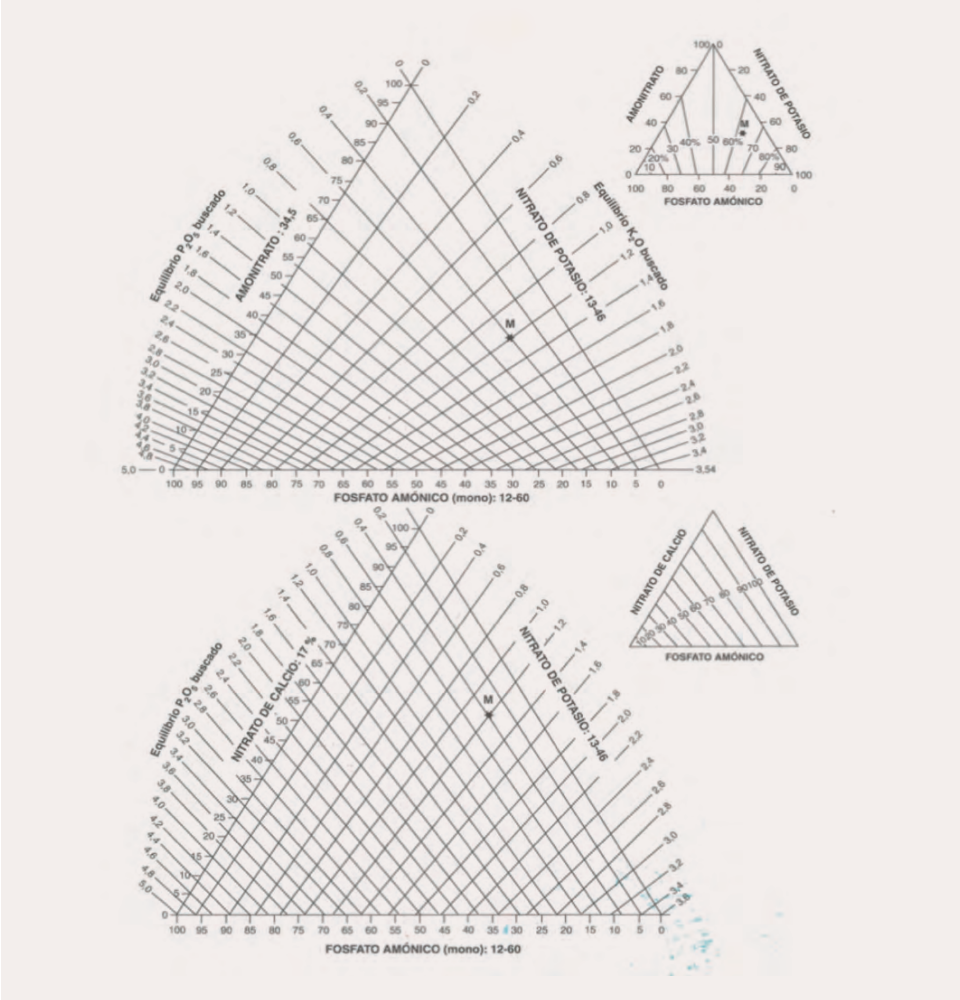


Figura 16: Ábacos para calcular las proporciones de una mezcla de tres abonos (arriba: nitrato amónico, fosfato monoamónico y nitrato potásico; abajo: nitrato de calcio, fosfato monoamónico y nitrato potásico) (Lemaire et al., 2005). El nitrato de calcio del ábaco es el fertilizante sin amonio (17-0-0-33CaO). El resultado final vendría en porcentajes (g de abono/100 g de mezcla final). En ambos casos, se entra al ábaco con por el equilibrio P_2O_5/N en el lado izquierdo y con el equilibrio K_2O/N en el derecho hasta que llegamos al punto donde se cruzan. Usando ese punto, se traza una paralela al lado derecho que cruce la intersección para obtener el porcentaje de fosfato monoamónico. Se traza otra paralela al lado inferior que cruce el punto de intersección de los equilibrios anteriores y la alargamos hasta obtener el porcentaje de nitrato amónico para el primer ábaco o de nitrato de calcio para el segundo. La cantidad del nitrato potásico se obtiene por diferencia (100-cantidad de fosfato monoamónico-cantidad de nitrato amónico(o nitrato de calcio)).

4.1.2. Cálculo de soluciones nutritivas mediante sistemas de ecuaciones

Una forma de calcular las soluciones nutritivas para suelo sería mediante un sistema de ecuaciones, determinando la cantidad de cada fertilizante a aportar. Una característica de esta forma de cálculo es que deben usarse tantos fertilizantes como parámetros se deseen controlar: si se desean controlar tres parámetros (cantidad total de abono, y relaciones N/P_2O_5 y N/K_2O, con lo que se logra controlar el equilibrio $N : P_2O_5 : K_2O$) deben elegirse 3 abonos. Si se desearan controlar 6 parámetros (por ejemplo, cantidad total de abono, relaciones N/P_2O_5, N/K_2O y N/CaO, neutralización de bicarbonatos y relación nitrógeno amoniacal –nitrógeno nítrico) deberían elegirse 6 abonos.

Hay que hacer notar que en los cálculos se podría utilizar cualquier fertilizante no convencional sabiendo sus características de riqueza de nutrientes, como podrían ser fertilizantes líquidos (es importante saber la densidad del producto y su aporte salino). También se pueden utilizar abonos complejos en el cálculo, teniendo en cuenta que es un sistema con menos grados de libertad.

Para la resolución de sistemas de ecuaciones se pueden utilizar complementos para la aplicación Excel como "Solver", que permiten trabajar hasta 5 ecuaciones con 5 incógnitas. Existen también otras herramientas "on line" que permiten la resolución de sistemas de ecuaciones.

Ejemplo 4.1.5: **Se ha decidido que se quiere fertirrigar utilizando un equilibrio 1:0.5:2: 0.33CaO a una concentración de 500 mg/L. Se considera que el agua de riego no necesita neutralizar bicarbonatos y no se tienen en cuenta los aportes de nutrientes.**

Tenemos tanto la cantidad total de abono a aportar (500 mg/L) como un equilibrio. El proceso sería el siguiente:

Elección de los abonos. En principio, se van a usar los fertilizantes más comunes: fosfato monoamónico, nitrato potásico, nitrato cálcico y nitrato amónico.
Cálculo de las cantidades de abono: Se han elegido cuatro abonos. Normalmente éste será el número normal de fertilizantes que se usarán (un fertilizante que aporte principalmente potasio, otro fósforo, otro potasio, otro calcio o magnesio y en algunos casos un último que complete las necesidades de nitrógeno que no han aportado el resto de abonos). Tenemos pues que plantear un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas (tantas ecuaciones como abonos). Llamando:

x: concentración de nitrato cálcico	y: concentración de fosfato monoamónico
z: concentración de nitrato potásico	t: concentración de nitrato amónico

Las concentraciones de los fertilizantes se dan en mg/L.

Se podrían formular las siguientes ecuaciones:

La primera ecuación se basa en la cantidad total de fertilizantes aportada:

(I) x+y+z+t=500

En otras ecuaciones usaríamos los equilibrios:

El equilibrio P_2O_5/N es 0.5. Esto supone:

$$\frac{1}{0.5} = \frac{\text{Aportes totales N}}{\text{Aportes totales } P_2O_5}$$

Expresamos los aportes totales de N y de P_2O_5 en función de las concentraciones de abonos y sus riquezas.
Así por ejemplo, la cantidad de de N y de P_2O_5 del fosfato monoamónico serían:

N: $\frac{12\ (\%\ \text{N el fosfato monoamónico})}{100}$. y (cantidad de fosfato monoamónico a aportar) $=0.12y$

P_2O_5 : $\frac{60\ (\%\ \text{P2O5 el fosfato monoamónico})}{100}$. y (cantidad de fosfato monoamónico a aportar) $=0.60y$

Si lo ponemos como una tabla, nos quedaría lo siguiente para los cuatro abonos:

fertilizante	Aportes nitrógeno	Aportes fósforo
nitrato de calcio	0.155x	0
fosfato monoamónico	0.12y	0.60y
nitrato potásico	0.13z	0
nitrato amónico	0.335t	0

$\frac{0.155x + 0.12y + 0.13z + 0.335t}{0.60y} = \frac{1}{0.5}$; 0.155x+0.12 y+0.13z+0.335t=1.2y →

(II) 0.155x-1.08y+0.13z+0.335t=0

La siguiente ecuación se refiere al equilibrio N/K_2O, en este caso 2:

$$\frac{1}{2} = \frac{\text{Aportes totales N}}{\text{Aportes totales } K_2O}$$

De nuevo, expresamos los aportes de N y de K_2O en función de las concentraciones de abonos y sus riquezas:

fertilizante	Aportes nitrógeno	Aportes potasio
nitrato de calcio	0.155x	0
fosfato monoamónico	0.12y	0
nitrato potásico	0.13z	0.46z
nitrato amónico	0.335t	0

$$\frac{0.155x + 0.12y + 0.13z + 0.335t}{0.46z} = \frac{1}{2}$$; 0.155x+0.12y+0.13z+0.335t=0.23z →

(III) 0.155x+0.12y-0.10z+0.335t=0

La cuarta ecuación se basa en el equilibrio N/CaO, en este ejemplo, 1/0.33.

$$\frac{1}{0.33} = \frac{\text{Aportes totales N}}{\text{Aportes totales CaO}}$$

Expresamos los aportes de N y de CaO en función de las concentraciones de abonos y sus riquezas:

fertilizante	Aportes nitrógeno	Aportes calcio
nitrato de calcio	0.155x	0.27x
fosfato monoamónico	0.12y	0
nitrato potásico	0.13z	0
nitrato amónico	0.335t	0

$$\frac{0.155x + 0.12y + 0.13z + 0.335t}{0.27x} = \frac{1}{0.33}$$; 0.155x+0.12y+0.13z+0.335t=0.81x →

(IV) -0.655x+0.12y+0.13z+0.335t=0

El sistema de ecuaciones queda como sigue:

1x	+1y	+1z	+1t	=500	nitrato de calcio; x =93 mg/L
0.155x	-1.08y	+0.13z	+0.335t	=0	fosfato monoamónico, y=60 mg/L
0.155x	+0.12y	-0.10z	+0.335t	=0	nitrato potásico; z=318 mg/L
-0.655x	+0.12y	+0.13z	+0.335t	=0	nitrato amónico; t=32 mg/L

Calculamos el equilibrio con los aportes para comprobar que la solución es correcta y obtenemos las concentraciones aportadas de cada nutriente:

Fertilizante	concentración (mg/L)				
	Fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Nitrato cálcico	**93**	14			24
Fosfato monoamónico	**60**	7	36		
Nitrato potásico	**318**	41		146	
Nitrato amónico	**32**	11			
Totales	**500**	**73**	**36**	**146**	**24**
Equilibrio		**1**	**0.5**	**2**	**0.33**

La tabla nos permite calcular de forma sencilla parámetros como:

La relación entre nitrógeno amoniacal y nitrógeno nítrico: Esta fórmula contiene un 83% de nitrógeno nítrico (41 mg/l procedentes del nitrato potásico más 14 del nitrato de calcio más la mitad de los 11 mg/l del nitrato amónico).

Los aportes de nitrógeno, fósforo o potasio. Teniendo la cantidad de agua con la que se está regando en un intervalo dado con la solución propuesta, se obtienen las cantidades de N, P_2O_5 y K_2O.

Por ejemplo, si la fórmula se ha usado durante un periodo de 45 días en una parcela en la que se ha aportado 1.83 L/m^2.día:

N: 73 mg/L . 1.83 L/m^2.dia . 45 días = 6011 mg/m^2 N = 6.011 g/m^2 = 6.011 g/m^2 . 10000 m2/ha = 60110 g/ha = 60.1 kg/ha de N aportado en el periodo.

La cantidad de nitrato amónico es baja (un 5% del total de aporte de abonos). Como ejercicio adicional, vamos a calcular qué cambiaría si eliminamos este abono para usar solo 3 abonos, usando más nitrato de calcio para mantener los aportes de nitrógeno:

Calculamos la cantidad de nitrato de calcio para compensar el nitrato amónico que no vamos a aplicar:

11 mg/L de N que venían del nitrato amónico = 11/0.155 = 71 mg/L adicionales de nitrato cálcico

Llegaríamos al siguiente equilibrio:

Fertilizante	concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Nitrato cálcico	93 +71 = **164**	25			43
Fosfato monoamónico	60	7	36		
Nitrato potásico	318	41		146	
Totales	**572**	**73**	**36**	**146**	**43**
Equilibrio		**1**	**0.5**	**2**	**0.6**

Los cambios serían:

El aporte de sales aumenta de 500 a 572 mg/L, ya que el nitrato de calcio tiene una concentración de N menor que la del nitrato amónico.

El equilibrio de Ca sube de 1:0.33 (N/CaO) a 1:0.66.

El aporte de N nítrico aumenta ligeramente del 83 al 90% del total.

La elección sería agronómica, principalmente en función del cultivo y de los niveles de calcio en el suelo.

En algunos casos, la concentración de uno (o varios) de los abonos puede resultar ser negativa. Esto suele ocurrir cuando hay demasiados abonos que aporten el mismo elemento. El caso más normal es el nitrógeno. Este hecho se puede solucionar en bastantes casos, cambiando algunos de los abonos (por ejemplo, sustituyendo nitrato potásico por sulfato potásico).

Ejemplo 4.1.6: **Se ha decidido que se quiere fertirrigar un cultivo de papaya con un aporte de fertilizantes de 550 mg/L de un equilibrio 1:1.4:1.7:0.9CaO.**

Se usa un agua de riego de origen regenerado con los siguientes aportes de nutrientes:

Amonio	**2.17 meq/L**	**Nitratos**	**0.20 meq/L**
Potasio	**0.93 meq/L**	**Fosfatos***	**0.52 meq/L**
Calcio	**0.77 meq/L**	*: Suponemos una valencia 1. Se recomienda contactar con el laboratorio para confirmar en que unidad y forma se determina el fosfato y así deducir la valencia.	

Tenemos tanto la cantidad total de abono a aportar (550 mg/L) como un equilibrio. El proceso sería el siguiente:

Elección de los abonos. En principio, se van a usar los fertilizantes más comunes: fosfato monoamónico, nitrato potásico, nitrato cálcico y nitrato amónico.

Cálculo de las cantidades de abono: Se han elegido cuatro abonos. Tenemos pues que plantear un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas (tantas ecuaciones como abonos). Llamando:

x: concentración de nitrato cálcico (mg/L)	y: concentración de fosfato monoamónico (mg/L)
z: concentración de nitrato potásico (mg/L)	t: concentración de nitrato amónico (mg/L)

Se podrían formular las siguientes ecuaciones:

La primera ecuación se basa en la cantidad total de fertilizantes aportada:

(I) x+y+z+t=550

En las otras ecuaciones utilizaremos los equilibrios:

En la segunda ecuación vamos a usar el equilibrio P_2O_5/N es 0.5.

Además de los aportes de los fertilizantes, el agua de riego contiene tanto N como P_2O_5 que habría que tener en cuenta. Usando los factores de paso de la tabla 2:

2.17 meq/L NH_4 = 2.17 mmol/L . 14 = 30.4 mg/L N amoniacal.

0.2 meq/L NO_3 = 0.2 mmol/L . 14 = 2.8 mg/L N nítrico.

En total, 33.2 mg/L de N aportados por el agua

0.52 meq/L fosfatos = 0.52 mmol/L P . 70.97 = 36.9 mg/L P_2O_5

Abono	aportes N	Aportes P_2O_5
nitrato calcio	0.155x	0
fosfato monoamónico	0.12y	0.60y
nitrato potásico	0.13z	0
nitrato amónico	0.335t	0
Agua riego	33.2	36.9

$$\frac{1}{1.4} = \frac{0{,}155x+0{,}12y+0.13z+0.335t+33{,}2}{0{,}60y+36{,}9} = 0.155x+0.12y+0.13z+0.335t+33.2=0.43y+26.4 \rightarrow$$

(II) 0.155x-0.31y+0.13z+0.335t=-6.8

La siguiente ecuación se refiere al equilibrio N/K_2O, en este caso 1/1.7. El agua aporta potasio, en concreto 0.93 . 47.1 = 43.8 mg/L K_2O:

Abono	aporte N	Aporte K_2O
nitrato calcio	0.155x	0
fosfato monoamónico	0.12y	0
nitrato potásico	0.13z	0.46z
nitrato amónico	0.335t	0
Agua riego	33.2	43.8

$$\frac{1}{1.7} = \frac{0{,}155x+0{,}12y+0.13z+0.335t+33{,}2}{0{,}46z+43{,}8};\ 0.155x+0.12y+0.13z+0.335t+33.2=0.27z+25.8 \rightarrow$$

(III) 0.155x+0.12y-0.14z+0.335t=-7.4

La cuarta ecuación se basa en el equilibrio N/CaO, en este ejemplo, 1/0.9. El agua aporta calcio, en concreto, 0.77 meq/L / 2 (Valencia) = 0.385 mmol/L . 56.08 = 21.6 mg/L CaO

Abono	aporte N	Aporte CaO
nitrato calcio	0.155x	0.27x
fosfato monoamónico	0.12y	0
nitrato potásico	0.13z	0
nitrato amónico	0.335t	0
Agua riego	33.2	21.6

$$\frac{1}{0{,}9} = \frac{0{,}155x+0{,}12y+0.13z+0.335t+33{,}2}{0{,}27x+21{,}6};\ 0.155x+0.12y+0.13z+0.335t+33.2=0.3z+24$$

(IV) -0.145x+0.12y+0.13z+0.335t=-9.2

El sistema de ecuaciones queda como sigue:

1x	+1y	+1z	+1t	=550	x= 228.5 mg/L nitrato calcio
0.155x	-0.31y	+0.13z	+0.335t	=-6.8	y= 153.8 mg/L f. monoamónico
0.155x	+0.12y	-0.14z	+0.335t	=-7.4	z= 247.2 mg/L nitrato potásico
-0.145x	+0.12y	+0.13z	+0.335t	=-9.2	**t= - 79.6 mg/L nitrato amónico**

Al resolver el sistema de ecuaciones, la cantidad de nitrato amónico es negativa. Esto nos indica que se han elegido demasiadas fuentes de N: Para alcanzar los objetivos de Ca, P y K, ya estamos aportando más N que el propuesto (todos los abonos han aportado nitrógeno).

Volvemos a hacer el cálculo cambiando el nitrato potásico por sulfato potásico y el fosfato monoamónico por monopótasico. Cambiamos los dos abonos previendo ya un alto aporte de N del nitrato cálcico por el equilibrio CaO/N). La primera ecuación no cambiaría:

(I) x+y+z+t=550

En otras ecuaciones colocamos los equilibrios:

EquilibrioP_2O_5/N (1/1.4):

Abono	aportes N	Aportes P_2O_5
nitrato calcio	0.155x	0
fosfato monopotásico	0y	0.52y
sulfato potásico	0z	0
nitrato amónico	0.335t	0
Agua riego	33.2	36.9

$$\frac{1}{1.4} = \frac{0{,}155x+0y+0z+0.335t+33{,}2}{0{,}52y+36{,}9}\ ;\ 0.155x+0y+0z+0.335t+33.2=0.37y+26.4 \rightarrow$$

(II) 0.155x-0.37y+0z+0.335t=-6.8

Equilibrio N/K_2O (1/1.7):

Abono	aportes N	Aportes K_2O
nitrato calcio	0.155x	0
fosfato monopotásico	0y	0.34y
sulfato potásico	0z	0.5z
nitrato amónico	0.335t	0
Agua riego	33.2	43,8

$$\frac{1}{1.7} = \frac{0{,}155x+0y+0z+0.335t+33{,}2}{0{,}34y+0{,}5z+43{,}8}\ ;\ 0.155x+0.12y+0.z+0.335t+33.2=0.2y+0.29z+25.8 \rightarrow$$

(III) 0.155x-0.2y-0.29z+0.335t=-7.4

Equilibrio N/CaO (1/0.9):

Abono	aportes N	Aportes CaO
nitrato calcio	0.155x	0,27x
fosfato monopotásico	0y	0y
sulfato potásico	0z	0z
nitrato amónico	0.335t	0t
Agua riego	33.2	21,6

$$\frac{1}{0{,}9} = \frac{0{,}155x+0y+0z+0.335t+33{,}2}{0{,}27x+21{,}6}\ ;\ 0.155x+0y+0z+0.335t+33.2=0.3z+24 \rightarrow$$

(IV) -0.145x+0y+0z+0.335t=-9.2

El sistema de ecuaciones y las soluciones quedarían:

1x	+1y	+1z	+1t	=550	x=215.4 mg/L nitrato calcio
0.155x	-0.37y	+0z	+0.335t	=-6.8	y=168.2 mg/L f. monopotásico
0.155x	-0.2y	-0.29z	+0.335t	=-7.4	z=100.7 mg/L sulfato potásico
-0.145x	+0.y	+0z	+0.335t	=-9.2	t= 65.7 mg/L nitrato amónico

Recalculamos el equilibrio con los aportes para comprobar que la solución es correcta y obtener las cantidades finales de nutrientes aportadas:

Fertilizante	concentración (mg/L)				
	Fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Nitrato cálcico	**215**	33.3			58.1
Fosfato monopotásico	**168**		87.4	57.1	
Sulfato potásico	**101**			50.5	
Nitrato amónico	**66**	22.1			
Subtotal abono	**550**	**55.4**	**87.4**	**107.6**	**58.1**
Aportes agua riego		**33.2**	**36.9**	**43.8**	**21.6**
Total nutrientes		**88.6**	**124.4**	**151.4**	**79.7**
Equilibrio		**1.0**	**1.4**	**1.7**	**0.9**

A partir de los datos de la tabla

31 (nitrato de calcio)+11 (nitrato amónico)+2.8 (agua) = 44.8 mg/L de N nítrico
2.4 (nitrato de calcio) +11 (nitrato amónico) +30.4 (agua) =43.8 mg/L de N amoniacal

En este ejemplo el 37% del N, el 30% del P_2O_5, el 29% del K_2O y el 27% del CaO de la solución provienen del agua.

El equilibrio N:P_2O_5:K_2O:CaO de los aportes de fertilizantes (1:1.6:1.9:1.1) no es similar al obtenido teniendo en cuenta los aportes del agua de riego. Siempre es recomendable tener en cuenta los aportes de nutrientes del agua de riego.

Ejemplo 4.1.7: **Se tiene un agua en la que debe aplicar un equilibrio 1 : 1.5 : 1 : 0.25 (CaO) a una concentración de 700 mg/L, . Se precisa neutralizar 3 meq/L de bicarbonatos para intentar dejar el pH a 6.5.**

Como primer supuesto, se usará a priori ácido fosfórico y nítrico para eliminar esa cantidad de bicarbonatos, optando por neutralizar con el primer ácido 2 meq/L y el resto de bicarbonatos con el otro (se trata de un equilibrio alto en fósforo). En el sistema de ecuaciones debe tenerse en cuenta que las cantidades de nutrientes procedentes de los ácidos están fijas. Por otra parte, a la hora de tener en cuenta la cantidad total de sólidos disueltos, hay que restar la cantidad de bicarbonatos destruidos. Los abonos elegidos, además de los ácidos, son:

x: concentración de nitrato cálcico	y: concentración de fosfato monopotásico
z: concentración de nitrato potásico	t: concentración de nitrato amónico

Primeramente, se calcula la cantidad de ácidos que deben aportarse. La valencia del ácido fosfórico para pH 6,5 sería de 1.17 (1.17 hidrógenos "útiles" por cada molécula de ácido), redondeando 1.2:

$$2\ \text{meq/l}\ HCO_3^- = 2\ \text{meq/l}\ H_3PO_4 = \frac{2}{1{,}2\ (\text{valencia considerada})} = 1.67\ \text{mmol/L}\ \ H_3PO_4$$

$$1.67\ \text{mmol/L} \cdot 98 = 163\ \text{mg/l}\ H_3PO_4\ \text{puro}$$

Para saber el aporte de P_2O_5, hay que recordar que la riqueza está referida al produto comercial. El ácido aportado es de una riqueza del 85% (62% en P_2O_5) y una densidad de 1.6 g/cm^3:

$$163. \frac{100}{85} = 192\ \text{mg/l}\ H_3PO_4\ \text{comercial que corresponde a}\ 119\ \text{mg/l de}\ P_2O_5.$$

En cuanto al ácido nítrico:

$$1\ \text{meq/l}\ HCO_3^- = 1\ \text{meq/l}\ HNO_3 = 1(\text{valencia}) \cdot 63 = 63\ \text{mg/l}\ HNO3\ \text{puro}$$

Para saber el aporte de N, hay que recordar que la riqueza está referida al produto comercial. Si el ácido aportado es de una riqueza del 60% (12.5% en N) y una densidad de 1.4 g/cm^3:

$$63 \cdot \frac{100}{60} = 105 \text{ mg/l } HNO_3 \text{ comercial que corresponde a } 13 \text{ mg/l de N.}$$

El sistema de ecuaciones queda como sigue:

Para la primera ecuación nos basamos en la cantidad total de abono aportado. En este caso, como trabajamos con aportes en mg/L y estamos usando ácidos hay que tener en cuenta la cantidad de bicarbonatos destruidos.

3meq/L HCO_3^- . 61 (masa molecular del ion bicarbonato) =
183 mg/L bicarbonatos destruidos

Las cantidades de ácido, ya calculadas, son fijas.

$$x+y+z+t+63 \text{ (mg/l } HNO_3) + 163 \text{ (mg/l } H_3PO_4) - 183 \text{ (mg/l } HCO_3^- \text{ destruidos)} = 700$$

(I) x+y+z+t= 657

En las otras ecuaciones utilizamos el equilibrio:

El equilibrio N/P_2O_5 es 1/1.5. Hay que recordar que en el numerador se coloca la cantidad fija de nitrógeno suministrada por el ácido nítrico ya calculada, y en el denominador, la de P_2O_5 procedente del ácido fosfórico.

Abono	aportes N	Aportes P_2O_5
nitrato calcio	0.155x	0
fosfato monopotásico	0y	0.52y
nitrato potásico	0.13z	0z
nitrato amónico	0.335t	0t
Ácido nítrico	13	0
Ácido fosfórico	0	119

$$\frac{1}{1.5} = \frac{0{,}155x+0y+0.13z+0.335t+13}{0{,}52y+119}$$ **; (II) 0.155x - 0.35y + 0.13z + 0.335t = 66.3**

La tercera ecuación se basa en el equilibrio N/K_2O (1/1 = 1):

Abono	aportes N	Aportes K_2O
nitrato calcio	0.155x	0
fosfato monopotásico	0y	0.34y
Nitrato potásico	0,13z	0.46z
nitrato amónico	0.335t	0
Ácido nítrico	13	0
Ácido fosfórico	0	0

$$\frac{1}{1} = \frac{0{,}155x+0y+0.13z+0.335t+13}{0{,}34y+046z}$$; **(III) 0.155x-0.34y-0.33z+0.335t=-13**

En la cuarta ecuación se trabaja con el equilibrio N/CaO (1/0,25 = 4):

Abono	aportes N	Aportes CaO
nitrato calcio	0.155x	0.27x
fosfato monopotásico	0y	0
Nitrato potásico	0,13z	0
nitrato amónico	0.335t	0
Ácido nítrico	13	0
Ácido fosfórico	0	0

$$\frac{1}{0,25} = \frac{0,155x+0y+0.13z+0.335t+13}{0,27x};\ \textbf{(IV) -0.925x+0.13z+0.335t=-13}$$

El sistema de ecuaciones queda como sigue:

1x	+1y	+1z	+1t	= 658	x = 119 mg/L n. cálcico
0.155x	-0.35y	+0.13z	+0.335t	= 66,3	y = 141 mg/L f. monopotásico
0.155x	-0.34y	-0.33z	+0.335t	=-13	z = 175 mg/L n. potásico
-0.925x	+0y	+0.13z	+0.335t	=-13	t = 222 mg/L n. amónico

Con esas cantidades y las de los ácidos, comprobamos el equilibrio:

fertilizante	concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Ácido nítrico	**63**	13			
Ácido fosfórico	**163**		119		
Nitrato cálcico	**119**	18,4			32,1
Fosfato monopotásico	**141**		73,3	47,9	
Nitrato potásico	**175**	22,8		80,5	
Nitrato amónico	**222**	74,3			
Totales	**883**	**128,5**	**192,3**	**128,4**	**32,1**
Equilibrio		**1**	**1.5**	**1**	**0.25**

Hay que tener en cuenta que, al sumar las concentraciones de nitrato cálcico, fosfato monopotásico, nitrato potásico y nitrato amónico tiene que dar los 657 mg/L de la primera ecuación y que, si restamos a los 883 mg/L los 183 mg/L de los bicarbonatos destruidos, obtendríamos los 700 mg/L que se están buscando. Esta fórmula contiene un 71% de nitrógeno nítrico.

Hay que recordar que habría que pasar la concentración de los ácidos de mg/L a cm^3/L de producto comercial para calcular las cantidades a aportar en los tanques.

Ejemplo 4.1.8: **Se va a intentar resolver el ejercicio anterior (1:1.5:1:0.25 (CaO)) a 700 mg/L y pH 6,5, también eliminando 3 meq/L de bicarbonatos, pero sin fijar la cantidad de cada ácido.**

En este caso hay que controlar la cantidad total de abono, la neutralización de los bicarbonatos, y las relaciones N/P_2O_5, N/K_2O y N/CaO Se necesitaría un sistema de ecuaciones de 5 ecuaciones y 5 abonos**.**

En principio vamos a usar los abonos siguientes:

x: concentración de ácido nítrico puro
Se usará un producto comercial con 12,5%N y 60%ácido.

y: concentración de ácido fosfórico puro
Se usará un producto comercial con 62%P_2O_5, y 85% ácido.

z: concentración de nitrato potásico

t: concentración de fosfato monomónico

u: concentración de nitrato de calcio

El sistema de ecuaciones queda como sigue:

En la primera ecuación hay que restarle a la cantidad de sales aportadas, los bicarbonatos destruidos, 183 mg/L (ya calculados en el ejemplo anterior).

$x+y+z+t+u-183=700$; **(I) x+y+z+t+= 883**

La segunda ecuación se basa en la neutralización de los bicarbonatos (3 meq/L) por cada uno de los ácidos, suponiendo una valencia del ácido fosfórico de 1.2 para pH 6,5:

$$\text{meq/L ácido nítrico} = \text{valencia} \cdot (\text{mg/L ácido nítrico puro/masa molecular}) = 1.\frac{x}{63}$$

$$\text{meq/L ácido fosfórico} = \text{valencia} \cdot (\text{mg/L ácido nítrico puro/masa molecular}) = 1.2\frac{y}{98}$$

$\frac{x}{63} + \frac{1,2y}{98} = 3$; **(II) 0.0159x+0.0122y=3**

En las otras ecuaciones colocamos los equilibrios:

La tercera ecuación se basa en el equilibrio N/P_2O_5.

Las cantidades de ácido que se van a calcular están referidas a ácido puro y que las riquezas declaradas lo están al producto comercial. Tenemos que calcular las riquezas de los ácidos puros:

Riqueza en N nítrico puro =12.5(%N)/60/%ácido) = 0.21

Riqueza en P_2O_5 ácido fosfórico puro = 62 ($\%P_2O_5$)/85(%ácido) = 0.73

$\frac{1}{1.5} = \frac{0,21x+0y+0.13z+0.12t+0.155u}{0,73y+0,61t}$; **(III): 0,21x – 0.487y + 0.13z -0.29t + 0.155u =0**

El equilibrio N/K_2O es 1:

$$\frac{1}{1} = \frac{0{,}21x+0y+0.13z+0.12t+0.155u}{0{,}46z}; \textbf{ (IV): } \mathbf{0.21x + 0y - 0.33z + 0.12t + 0.155u = 0}$$

La quinta ecuación se basa en el equilibrio N/CaO

$$\frac{1}{0{,}25} = \frac{0{,}21x+0y+0.13z+0.12t+0.155u}{0{,}27u}; \textbf{ (V): } \mathbf{0.21x + 0y + 0.13z + 0.12t – 0{,}925u = 0}$$

El sistema de ecuaciones queda como sigue:

1x	+	1y	+	1 z	+	1 t	+	1 u	=883
0.0159x	+	0,0122y	+	0 z	+	0 t	+	0 u	=3
0,21x	-	0,487 y	+	0,130 z	-	0,290 t	+	0,155 u	=0
0.21x	+	0 y	-	0.330 z	+	0,120 t	+	0,155 u	=0
0.21x	+	0 y	+	0.130 z	+	0,120 t	-	0,925 u	=0

Al resolver el sistema de ecuaciones quedan las cantidades de abono señaladas en la tabla siguiente:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Ácido nítrico	**179**	37,6			
Ácido fosfórico	**13**		8,8		
Nitrato potasio	**277**	36,0		127,4	
Fosfato monoamónico	**296**	35,5	180,6		
Nitrato calcio	**118**	18.3			31,9
Totales	**883**	**127,4**	**189,4**	**127,4**	**31,9**
Equilibrio		**1**	**1.5**	**1**	**0.25**

Esta fórmula contiene un 72% de nitrógeno nítrico. Se observa que la cantidad de ácido fosfórico es muy baja. Hay dos fuentes de aporte de fósforo y el sistema de ecuaciones hizo que el ácido nítrico neutralizara la casi totalidad de los bicarbonatos (2,84 meq/L de los 3 meq/L), aportando la mayor parte del P_2O_5 como fosfato monoamónico.

Vamos a recalcular el equilibrio, eliminando el ácido fosfórico.

En primer lugar, tenemos que tener en cuenta que dejan de neutralizarse 0,16 meq/L de bicarbonatos y lo tendríamos que dar por bueno.

El equilibrio quedaría como sigue:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Ácido nítrico	**179**	37,6			
Nitrato potasio	**277**	36,0		127,4	
Fosfato monoamónico	**296**	35,5	180,6		
Nitrato calcio	**118**	18.3			31,9
Totales	**870**	**127,4**	**180,6**	**127,4**	**31,9**
Equilibrio		**1**	**1.42**	**1**	**0.25**

Por otra parte, la elección de fertilizantes puede cambiar bastante la solución: Si cambiamos el fosfato monoamónico por sulfato amónico y tras recalcular las ecuaciones III, IV y V y volver a resolver el sistema de ecuaciones, la solución sería:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Ácido nítrico	**12**	2,5			
Ácido fosfórico	**230**		167,9		
Nitrato potasio	**243**	31,6		111,8	
Sulfato amónico	**293**	61,5			
Nitrato calcio	**103**	16,0			27,8
Totales	**881**	**111,6**	**167,9**	**111,8**	**27,8**
Equilibrio		**1**	**1.5**	**1**	**0.25**

En este caso, la única fuente de fósforo es el ácido fosfórico, por lo que el sistema aumenta mucho la cantidad para aportar el equilibrio requerido, neutralizando 2.35 mmol/L. 1.2 (valencia considerada) =2,81 meq/L de bicarbonatos, por lo que quedarían solo 3-2.81 = 0,19 meq/L a neutralizar con ácido nítrico. la concentración de ácido nítrico es muy baja (12 mg/L).

4.1.3. Cálculo de soluciones nutritivas mediante tanteo

Este método puede ser más sencillo que el de sistemas de ecuaciones. También se parte de una cantidad total de abono deseada, de un equilibrio y de unos abonos elegidos a priori.

El tanteo consiste en introducir un valor, generalmente una cantidad de fertilizante que aporte el total de unos de los nutrientes (normalmente calcio, fósforo o potasio) y calcular el resto de los aportes de abonos, teniendo en cuenta el

equilibrio final deseado. Como en el caso anterior con sistemas de ecuaciones hay que tener en cuenta que normalmente hay muchos abonos que aportan nitrógeno, por lo que siempre se ajusta en último lugar este nutriente. Con la cantidad de abono elegida, se calcula el aporte de ese nutriente. Como no van a haber más aportes de nutrientes, esa sería la cantidad final. Con ese valor y sabiendo el equilibrio se determinarían los aportes del resto de nutrientes. A partir de esos datos se calcularían las cantidades de abonos necesarios. Una vez hecho esto, se recalcula la cantidad total de fertilizantes aportado para que coincida con la concentración de consigna.

Para facilitar el cálculo, puede usarse un cuadro como el siguiente, para tabular los cálculos:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	Fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Abono 1					
Abono 2					
...					
Totales					
Equilibrio					

Si tras varios tanteos, no se da con la solución correcta para los parámetros de partida o que sin cumplirlos exactamente sea agronómicamente factible, lo recomendable sería cambiar de abonos.

Este método puede ser más sencillo que el de sistemas de ecuaciones, aunque no es tan adecuado cuando se pretenden manejar más variables además de la concentración y el equilibrio, cuando se trabaja con muchos fertilizantes o alguna cantidad de nutriente está fija (como el caso de considerar los aportes de algún nutriente por el agua de riego). Tampoco suele dar buenos resultados cuando se trabaja con abonos complejos.

Ejemplo 4.1.9: **Supongamos que queremos calcular una solución nutritiva para plátano, con un equilibrio 1 : 0.3 : 1 : 0.1CaO y una concentración de 250 mg/L, usando nitrato de calcio, fosfato monoamónico y nitrato de potasio, teniendo al nitrato amónico como fuente adicional de nitrógeno**.

En primer lugar, construimos el cuadro de tanteo con los abonos que se van a aportar y el equilibrio a lograr:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	Fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Nitrato de calcio					
Fosfato monoamónico					
Nitrato de potasio					
Nitrato amónico					
Totales	250				
Equilibrio		1	0.3	1	0.1

Se comenzaría el tanteo eligiendo un abono. Optaremos por uno que aporte el total de uno de los nutrientes del equilibrio y tanteamos con una cantidad determinada.

En este caso, usaremos el nitrato de potasio (único aporte de K_2O), tanteando con una cantidad que sea menor que la concentración total de aporte, por ejemplo 100 mg/L. Esto supone un aporte de 46 mg/L de K_2O.

Para mantener el equilibrio (1:0.3:1:0.1(CaO), si se aportan 46 mg/L de K_2O, habría que aportar:

46 . 1 = 46 mg/L de N.
46 . 0.3 = 14 mg/L de P_2O_5
46 . 0.1 = 5 mg/L de CaO.

Ya tenemos las cantidades totales de nutrientes a aplicar.

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio					
fosfato monoamónico					
nitrato de potasio	**100**			**46**	
nitrato amónico					
Totales		**46**	**14**	**46**	**5**
Equilibrio		1	0.3	1	0.1

A partir de esas cantidades de P_2O_5 y CaO ya determinadas, se calculan las cantidades de fosfato monoamónico y de nitrato de calcio necesarias:

14/0.60 = 23 mg/L de fosfato monoamónico
5/0.27 = 19 mg/L de nitrato de calcio.

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	**19**				**5**
fosfato monoamónico	**23**		**14**		
nitrato de potasio	100			46	
nitrato amónico					
Totales		46	14	46	5
Equilibrio		1	0.3	1	0.1

Finalmente se calculan los aportes de nitrógeno de las fuentes de potasio, de calcio y de fósforo:

19 mg/L nitrato de calcio . 0.155 =3 mg/L N
23 mg/L fosfato monoamónico. 0.12 = 3 mg/L N
100 mg/L nitrato de calcio . 0.13 = 13 mg/L N

El aporte de nitrógeno sería de 3+3+13 = 19 mg/L, por lo que harían falta:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	19	**3**			5
fosfato monoamónico	23	**3**	14		
nitrato de potasio	100	13		46	
nitrato amónico					
Totales		46	14	46	5
Equilibrio		1	0.3	1	0.1

Con los aportes anteriores no se alcanzaría el valor previsto de N para el equilibrio buscado, 46 mg/L. La diferencia entre lo aportado y el objetivo se aportaría con nitrato amónico

46 (objetivo)-19 = 27 mg/L de N; 27/0.345 = 78 mg/L nitrato amónico.

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	19	3			5
fosfato monoamónico	23	3	14		
nitrato de potasio	100	13		46	
nitrato amónico	**78**	**27**			
Totales	**220**	46	14	46	5
Equilibrio		1	0.3	1	0.1

El total de abonos aportados sería 220 mg/L. Siendo la concentración de consigna de 250 mg/L, multiplicamos las cantidades de todos los abonos por un factor para ajustar la cantidad total de abono aportado y mantener el equilibrio:

250 mg/L (el valor objetivo) /220 mg/L (valor calculado) = 1.14

Aplicamos el factor, comprobamos que se mantiene el equilibrio buscado y obtenemos las concentraciones de nutrientes que se van a aplicar:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	19 . 1.14 =**22**	3			6
fosfato monoamónico	23 . 1.14 = **26**	3	16		
nitrato de potasio	100 . 1.14 = **114**	15		52	
nitrato amónico	78 . 1.14 = **89**	31			
Totales	**251**	**52**	**16**	**52**	**6**
Equilibrio		**1**	**0.3**	**1**	**0.1**

La solución nutritiva anterior se está aportando en una zona sensible a nitratos durante el mes de octubre. La normativa señala una cantidad de N a aportar durante ese mes entre 10 y 15 gramos/planta.mes. La dosis media de riego es de 120 L/planta.semana. Calcular si los aportes de N están dentro de lo marcado por la norma y recalcular la cantidad de abono total si no es así:

Para poder pasar de concentraciones a cantidades por unidad de superficie necesitamos tener la cantidad de agua aportada:

Pasamos la concentración de N de mg/L a g/planta.semana:

52 mg/L . 120 L/planta.semana = 6240 mg/planta.semana = 6.24 g/planta.semana

Suponiendo 4 semanas/mes, tendríamos 6.24 . 4 = 24,96 g/planta.mes: **La dosis de N aportada es mayor que la marcada por la norma.**

Para ceñirnos a la norma manteniendo el equilibrio, podríamos bajar todas las cantidades de abono (todos aportan N y en el caso del tanteo sólo podemos hacerlo así para mantener el equilibrio). Para la dosis más alta señalada (15 g/planta.mes):

15 (valor deseado) / 24.96 (valor calculado) = 0.6; Tendríamos que multiplicar las cantidades anteriores de abono:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	22 . 0.6 =13.2	2.0			3.6
fosfato monoamónico	26 . 0.6 = 15.6	1.9	9,4		
nitrato de potasio	114. 0.6 = 68.4	8.9		31.5	
nitrato amónico	89 . 0.6 = 53.4	18.4			
Totales	150.6	31.2	9.4	31.5	3.6
Equilibrio		1	0.3	1	0.1

Comprobamos:

31.2 mg/L N . 120 L/planta.semana = 3744 mg/planta.semana = 3.74 g/planta.semana

Suponiendo 4 semanas/mes, tendríamos 3.74 . 4 = 14.98 g/planta.mes:

Para no sobrepasar la cantidad de N de la norma tendríamos que aportar un máximo de 150.6 mg/L de la combinación de abonos anteriores.

Otra opción es realizar el cálculo con un sistema de ecuaciones donde una corresponda a que la suma de aportes de N no supere la cantidad mensual máxima.

Ejemplo 4.1.10: **Se desea realizar una solución nutritiva 1:0.2:1:0.6CaO a una concentración de 150 mg/L utilizando un complejo 15-5-30 y nitrato de calcio**.

Como el equilibrio es alto en calcio y se va usar nitrato de calcio, se ha elegido un complejo con un equilibrio NPK más alto en potasio y en fósforo que el final ya que el aporte de nitrógeno del primer abono va a bajar las relaciones P_2O_5/N y K_2O/N. Por eso se ha elegido un 15-5-30 (1:0.17:2), dentro de los más frecuentes para al menos mantener el equilibrio nitrógeno/potasio.

Construimos el cuadro de tanteo con los abonos que se van a aportar y el equilibrio a lograr:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	Fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Nitrato de calcio					
15-5-30					
Totales					
Equilibrio		1	0.2	1	0.6

Comenzamos el tanteo con 100 mg/L de nitrato de calcio Esto supone un aporte total de 27 mg/L de Ca0, además de 15.5 mg/L de N.

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	100	15.5			27
15-5-30					
Totales					
Equilibrio		1	0.2	1	0.6

Podríamos en principio, saber qué cantidades aportar del complejo para completar el N, P_2O_5 y el K_2O y mantener el equilibrio, habría que aportar:

27 . 0.2/0.6 (relación P_2O_5/CaO) = 9 mg/L de P_2O_5
27 . 1/0.6 (relación K_2O/CaO) = 45 mg/L de K_2O
27 . 1/0.6 (relación N/CaO) = 45 mg/L N

A partir de esas cantidades de N, P_2O_5 y K_2O ya determinadas, se calculan las cantidades de complejo a aportar. Aquí tenemos que optar por hacerlo en función de uno de ellos ya que cambiará el equilibrio final obtenido

a) Si lo hacemos para ajustar la cantidad anterior calculada de potasio:

   45/0.3 = 150 mg/L 15-5-30.

   Aportando 45 mg/L de 15-5-30 aportamos 22.5 mg/L de N y 7.5 mg/L de P_2O_5:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	100	15.5			27
15-5-30	150	22.5	7.5	45	
Totales	250	38	7.5	45	27
Equilibrio		1	0.20	1.18	0.71

El ajuste me da un equilibrio algo más alto en potasio y ligeramente superior en calcio que lo deseado (1:0.2:1.2:0.7CaO en vez de 1:0.2:1:0.6CaO)

Si lo hacemos en función del nitrógeno

45 – 15.5 (aporte nitrato de calcio) = 29.5 mg/L N a aportar con el complejo.

Esto sería 29.5/0.15=197 mg/L 15-5-30

Aportando 197 mg/L de 15-5-30 aportamos 59.1 mg/L de K_2O y 9.85 mg/L de P_2O_5:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	100	15.5			27
15-5-30	197	29.5	9,85	59.1	
Totales	297	45	9,85	59,1	27
Equilibrio		1	0.22	1.31	0.60

El ajuste sigue dando alto en potasio (1:0.2:1,3:0.6CaO)

b) Si lo hacemos en función del fósforo:

9/0.05= 180 mg/L 15-5-30

Aportando 180 mg/L de 15-5-30 aportamos 54.0 mg/L de K_2O y 27 mg/L de N:

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	100	15.5			27
15-5-30	180	27	9	54	
Totales	280	42,5	9	54	27
Equilibrio		1	0.21	1.27	0.64

El ajuste dio prácticamente igual que ajustando con el nitrógeno: (1:0.2:1,3:0.6CaO)

La elección de la solución final dependerá de criterios agronómicos, como los contenidos de fósforo, potasio y calcio disponibles en el suelo y en el agua de riego o el historial de analíticas foliares de la parcela.

En este caso, escogemos el primero, considerando que el suelo tiene un valor alto de fósforo y algo bajo de calcio:

Calculamos el factor para ajustar la concentración total de abonos:

150 (valor objetivo)/250 (valor obtenido) = 0.6;

Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	100 . 0.6 =**60**	9,3			16,2
15-5-30	150 . 0.6 = **90**	13,5	4,5	27,0	
Totales	**150**	**22,8**	**4,5**	**27,0**	**16,2**
Equilibrio		1	0.20	1.18	0.71

La solución nutritiva anterior se está aportando en una zona sensible a nitratos durante el mes de octubre. La normativa señala una cantidad de N a aportar durante ese mes entre 10 y 15 gramos/planta.mes. La dosis media de riego es de 120 L/planta. semana. Calcular si los aportes de N están dentro de lo marcado por la norma y recalcular el equilibrio si no es así:

22.8 mg/L N . 120 L/planta.semana = 2736 mg/planta.semana = 2.736 g/planta.semana

2.736 g/planta.semana . 4 = 10,9 g/planta.mes N. **Estaríamos dentro del intervalo marcado por la norma (10-15 g/planta.mes)**

4.2 Ajuste de los macroelementos en cultivos sin suelo

4.2.1. Procedimiento general

Por lo general, el procedimiento de cálculo descrito por Sonnenveld (1989) para el cálculo es el siguiente, intentando, como norma general, usar el menor número de fertilizantes posible en la confección de soluciones nutritivas:

- En primer lugar, se completarán las necesidades de calcio con nitrato cálcico.

- El paso siguiente será la elección de la fuente de fósforo. Si las necesidades de ácidos para bajar el pH son mayores que las de fósforo, se suele utilizar el ácido fosfórico. En caso contrario, habrá que elegir entre fosfato monopotásico y fosfato monoamónico, en función de las necesidades de amonio, teniendo en cuenta que ya el nitrato cálcico puede haber aportado una cantidad significativa de este ion.

- Sólo si queda amonio por aportar tras la adición de nitrato de calcio o de fosfato monoamónico, se usa nitrato amónico.

- Para completar las necesidades de nitrato no completadas con nitrato de calcio y nitrato amónico, se usa en primera instancia ácido nítrico para neutralizar los bicarbonatos del agua si quedan tras usar el ácido fosfórico. En 2º lugar, se usa nitrato potásico para ir además completando las cantidades de potasio.

- En el caso de que falte potasio por añadir tras las adiciones de nitrato potásico y fosfato monopotásico, se aporta como sulfato potásico.

- Si con ácido nítrico y fosfórico no se han logrado eliminar los bicarbonatos, tendremos que recurrir al uso de ácido sulfúrico.

- Por último, se termina por aportar el magnesio como sulfato de magnesio.

- Normalmente, con los aportes de sulfato de la epsomita y del sulfato potásico, se suele alcanzar, si no superar, los aportes previstos de sulfato. En caso contrario, los aportes de sulfato se realizan a costa de la cantidad de nitrato potásico.

Este modo de acción puede cambiarse si se usan otros fertilizantes (por ejemplo, nitrato de magnesio y sulfato amónico en vez de nitrato amónico y sulfato de magnesio) llegando a una solución igualmente válida.

En el caso de aguas con baja alcalinidad (menor de 0.5 – 1.0 mmol/L), el procedimiento cambia ligeramente ya que no se aportarán ácidos sino bases para alcanzar un poder tampón mínimo:

- En primer lugar, se completarán las necesidades de calcio con nitrato cálcico.

- El paso siguiente será la elección de la fuente de fósforo. Habrá que elegir entre fosfato monopotásico y fosfato monoamónico, en función de las necesidades de amonio, teniendo en cuenta que ya el nitrato cálcico puede haber aportado una cantidad significativa de este ion.

- Sólo si queda amonio por aportar, se usa nitrato amónico.

- Se aporta la base para tener al menos 0.5 – 1.0 mmol/L de bicarbonatos. Se usará normalmente bicarbonato potásico o hidróxido potásico.

- Para completar el nitrato, se usa se usa nitrato potásico para ir además completando las cantidades de potasio.

- En el caso de que falte potasio por añadir, se aporta como sulfato potásico.

- Por último, se termina por aportar el magnesio como epsomita.

Normalmente suele ser imposible ajustar todos los elementos. Se elige la opción menos desfavorable en función de las características particulares de cada caso. Un caso frecuente es la elección entre un exceso de nitrato o de sulfato.

- En muchas ocasiones los niveles de sulfatos suelen alcanzarse (si no superarse) con la adición de sulfato potásico y/o magnésico. Se suele considerar que un exceso de sulfatos no suele ser muy perjudicial (en cultivos sin suelo de tomate en Murcia se riega hasta con 16 mmol/L de sulfatos),

- Los excesos de nitratos suponen un problema ambiental grave, sobre todo en zonas declaradas como sensibles a la contaminación de acuíferos por ese ion. Por otra parte, una solución con exceso de nitratos puede interferir de forma importante en el desarrollo del cultivo. En muchas soluciones nutritivas que se encuentran en la bibliografía los aportes de nitratos suelen estar en un valor que ya es alto.

- En el caso que no se alcance el valor deseado de sulfatos habría que cambiar nitrato de potasio por el K_2SO_4. Esto solo ocurriría cuando el ajuste de sulfatos se considere más importante que el de nitratos, lo que es bastante infrecuente

- Debe tenerse en cuenta que existe una relación entre los iones nitrato y sulfato. Cuanto más alta sea la relación SO_4^{2-}/NO_3^-, mayor porcentaje de drenaje hay que tener.

- En situaciones excepcionales se podría optar por un pequeño exceso de nitratos, teniendo en cuenta una serie de precauciones adicionales de manejo como la bajada de los porcentajes de drenaje para impedir que la planta crezca demasiado.

- Como ya se dijo anteriormente, si la concentración de cloruros es muy alta, se puede subir algo más la concentración de nitratos, al ser antagonistas.

A los efectos del cálculo, en primer lugar, se tendrían que calcular los aportes o necesidades de elementos, restando a la concentración de cada nutriente de la solución nutritiva inicial el contenido de ese ion en el agua de riego. Siempre es recomendable tener analítica de agua de riego, pero para cultivo sin suelo, los valores de iones en el agua son imprescindible. Hay que recordar que deben dejarse 0.5 mmol/l de bicarbonatos para asegurar un pH entre 5.5 y 6,0 (ver apartado 2.4.3). La alcalinidad por eliminar se colocaría con signo negativo.

Ejemplo 4.2.1: Vamos a calcular los aportes de nutrientes para una solución nutritivas y un agua dada:

En este caso, el análisis de agua viene expresado en meq/L, por los valores tienen que pasearse a mmol/L:

	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}
meq/L	0.24	0.01	0.44	0.52	0.88	1,02	5.0	1.20	1,40	2,80	1,00
mmol/L	0.24	0.01	0.44*	0.52	0.44	0.51	5.0	1.20	0.70	2,80	0.50

*: Se considera un pH final de 5.5 – 6.0 por lo que corresponde valencia 1.

Como hay tanto bicarbonatos como carbonatos, hay que calcular la alcalinidad total, que sería el valor que pondríamos finalmente en la columna de los "bicarbonatos":

2,8 + 0.5 . 2 (el ácido tiene que pasar carbonatos a bicarbonatos y luego neutralizarlos) = 3,8 mmol/L

Los aportes que hay que realizar con los fertilizantes serían la resta entre los valores de la solución nutritiva propuesta menos las concentraciones del agua de riego:

mmol/L	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
solución nutritiva	8.0	0.5	1.0	4.5	2.7	1.0	--	--	1.50	0.50
aportes a. riego	0.24	0.01	0.44	0.52	0.44	0.51	5.00	1.20	0.70	3.80
aportes previstos	**7.76**	**0.49**	**0.56**	**3.98**	**2.26**	**0.49**	**0**	**0**	**0.8**	**-3.30**

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Solución nutritiva											
Aportes agua riego											
Aportes previstos											
Abono	mmol/L	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
abono 1											
...											
abono n											
Aportes reales											
Totales											

Seguidamente, en una tabla de doble entrada, se pondrían esos aportes previstos y los abonos que se van a utilizar. Es recomendable ir poniendo los abonos en el mismo orden que se señaló antes (fuentes de calcio, fuentes de fosforo, completar aportes de amonio y nitrato, completar aportes de potasio y magnesio). En la parte inferior de la tabla se suman los aportes de iones reales (aportes reales) y a su vez se suman a las concentraciones del agua de riego en la fila de totales.

El procedimiento de cálculo de aportes de abono es sencillo. Simplemente observando la fórmula, se determina la cantidad de milimoles de un ion que suministra un fertilizante. Hay que recordar que, si usamos nitrato de calcio, 1 mmol/L de este abono aportaría 1 mmol/L de Ca^{2+}, 11/5 mmol/L de NO_3^- y 1/5 mmol/L de NH_4^+, siendo en este caso su masa molecular de 216.1. Los aportes de hidrogeniones procedentes de los ácidos (que se suelen notar como H^+ o H_3O^+) se colocan en la columna de los bicarbonatos con signo negativo, ya que cada hidrogenión neutralizaría un bicarbonato.

Ejemplo 4.2.2: **Se desea aplicar 5.5 mmol/L de potasio como K_2SO_4. ¿cuál sería el aporte de fertilizante y de ion sulfato?:**

Sabiendo que este abono aporta 2 moles de potasio y 1 mol de sulfato por mol de fertilizante:

Para aportar 5.5 mmol/L de K, necesitaríamos 2.75 mmol/L K_2SO_4.

En 2.75 mmol/L de K_2SO_4 hay 2.75 mmol de SO_4^{2-} y 5.5 mmol de K^+.

Ejemplo 4.2.3: **Se quiere calcular una solución nutritiva que podría servir para una solanácea (tomate, pimiento, berenjena), sin tener en cuenta los aportes del agua, siguiendo las normas anteriores**.

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO^{3-}
Solución nutritiva		11.80	1.00	1.50	6.00	3.50	2.00	--	--	2.00	--
Aportes agua riego		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Aportes previstos		11.80	1.00	1.50	6.00	3.50	2.00	0	0	2.00	--
Abono	mmol/L	NO_3-	NH_4+	H_2PO_4-	K+	Ca_2+	Mg_2+	Na+	Cl-	SO_4^{2-}	HCO_3-
"$Ca(NO_3)_2$"	3.50	7.70	0.70			**3.50**					
KH_2PO_4	1.50			**1.50**	1.50						
NH_4NO_3	0.30	0.30	**0.30**								
KNO_3	3.80	**3.80**			3.80						
K_2SO_4	0.45				**0.70**					0.45	
$MgSO_4$	2.00						**2.00**			2.00	
Totales		11.80	1.00	1.50	6.00	3.50	2.00	--	--	2.45	--

-- Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono.

Los aportes de Ca se completan con nitrato de calcio, que además aportaría nitratos y amonio.

Como no hay que acidificar y la cantidad de amonio que queda por completar es menor que el aporte de fósforo, se usaría fosfato monopotásico, que además aporta potasio.

El resto de amonio se aporta como nitrato amónico, que también aporta nitratos.

El resto de nitratos se aporta como KNO_3.

El resto de potasio no aportado por el KH_2PO_4 y el KNO_3 se completa con sulfato potásico.

El magnesio se aporta como sulfato de magnesio-

La solución nutritiva se ha cuadrado por completo, salvo en el caso del sulfato, donde se ha superado 0.45 mmol/L el nivel preestablecido, hecho completamente admisible, si se calcula el equilibrio SO_4^{2-}/NO_3^- de la solución nutritiva que se pretendía y de la obtenida (0.17 y 0.20, respectivamente).

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

Ejemplo 4.2.4: **Se intenta cuadrar la misma solución nutritiva del ejemplo 4.2.3 usando un agua poco salina**.

En este caso, tenemos que neutralizar bicarbonatos.
El calcio se completa con nitrato de calcio que aporta además amonio y nitratos.
Usaremos como fuente de fósforo, ácido fosfórico.
El resto de bicarbonatos es neutralizado con HNO_3.
El amonio no aplicado con el nitrato cálcico se añade con NH_4NO_3.
El nitrato que queda por aportar se añade como nitrato potásico.
El potasio no aportado con el abono anterior se añade con sulfato potásico.
El magnesio se aporta como sulfato de magnesio.

Las necesidades de azufre se han completado con los sulfatos ya aportados. La solución nutritiva se ha cuadrado por completo, salvo en el caso del sulfato, donde se ha superado ligeramente el nivel preestablecido.

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO^{3-}
Solución nutritiva		11.80	1.00	1.50	6.00	3.50	2.00	--	--	2.00	0.50
aportes agua riego		0	0	0	0.50	0.45	1.52	0.68	1.02	0.49	4.02
aportes previstos		11.80	1.00	1.50	5.50	3.05	0.48	0.68	1.02	1.51	-3.52
Abono	mmol/L	NO_3-	NH_4+	H_2PO_4-	K+	Ca_2+	Mg_2+	Na+	Cl-	SO_4^{2-}	HCO_3-
"$Ca(NO_3)_2$"	3.05	6.71	0.61			**3.05**					
H_3PO_4	1.50			**1.50**							-1.50
HNO_3	2.02	2.02									-2.02
NH_4NO_3	0.39	0.39	**0.39**								
KNO_3	2.68	**2.68**			2.68						
K_2SO_4	1.41				**2.82**					1.41	
$MgSO_4$	0.48						**0.48**			0.48	
Aporte real		11.80	1.00	1.50	5.50	3.05	0.48	--	--	*1.89*	-3.52
Totales		11.80	1.00	1.50	6.00	3.50	2.00	0.68	1.02	2.38	0.50

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono.

Como ejemplo de la importancia de la analítica de agua, se observa que han cambiado tanto los abonos como las cantidades a aportar de cada uno con respecto al ejemplo 4.2.3, incluso tratándose de un agua con poca carga salina.

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.



Ejemplo 4.2.5: **Se desea calcular la solución nutritiva del ejemplo 4.2.1 con un agua regenerada.**

En este caso, tenemos una solución con aportes de algunos fertilizantes más bajas, pero el procedimiento sería similar:

Completamos las necesidades de calcio con nitrato de calcio que además aporta amonio y nitrato.
Se usa ácido fosfórico para aportar fósforo ya que hay que neutralizar bicarbonatos.
El resto de bicarbonatos no neutralizados por el ácido fosfórico se completa con ácido nítrico, teniendo en cuenta que no se supere la cantidad de este ion establecida.
Como queda amonio por aportar y no se ha completado el de nitratos se usaría nitrato amónico. La cantidad es muy baja.
Como queda nitrato por aportar, se usa nitrato potásico. De nuevo, las cantidades son muy bajas (0.05 mmol/L).
El resto del potasio se aporta como sulfato de potasio.
El magnesio se aporta como sulfato magnésico.

		NO_3^-	**NH_4^+**	**$H_2PO_4^-$**	**K^+**	**Ca^{2+}**	**Mg^{2+}**	**Na^+**	**Cl^-**	**SO_4^{2-}**	**HCO^{3-}**
Solución nutritiva		8.0	0.5	1.0	4.5	2.7	1.0	--	--	2.00	0.50
aportes agua riego		0.24	0.01	0.44	0.52	0.44	0.51	5.00	1.20	0.70	3.80
aportes previstos		**7.76**	**0.49**	**0.56**	**3.98**	**2.26**	**0.49**	**0**	**0**	**1.30**	**-3.30**
Abono	mmol/L	NO_3-	NH_4+	H_2PO_4-	K+	Ca_2+	Mg_2+	Na+	Cl-	SO_4^{2-}	HCO_3-
"$Ca(NO_3)_2$"	2.26	4.97	0.45			**2.26**					
H_3PO_4	0.56			**0.56**							-0.56
HNO_3	2.74	2.74									**-2.74**
NH_4NO_3	0.04	0.04	**0.04**								
KNO_3	0.01	**0.01**			0.01						
K_2SO_4	1.99				**3.97**					1.99	
$MgSO_4$	0.49						**0.49**			0.49	
Aporte real		7.76	0.5	0.56	3.98	2.26	0.49	--	--	2.48	-3.30
Totales		8.00	0.5	1.0	4.50	2.70	1.00	5.00	1.20	3.18	0.50

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono.

Una vez calculados los aportes, como en casos anteriores, el aporte de sulfatos es ligeramente superior al de la solución nutritiva. La relación SO_4^{2-}/NO_3^- pasa de 0.25 a 0.39.

En este caso en particular, se podría contemplar la opción de no añadir nitrato amónico y nitrato potásico, por las bajas cantidades a aportar (<0.1 mmol/L). Si comparamos los valores de la solución completa con la que se obtendría sin aplicar ni KNO_3 ni NH_4NO_3 tendríamos:

Solución nutritiva	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO^{3-}
Con todos los fertilizantes	8.00	0.50	1.0	4.50	2.70	1.00	5.00	1.20	3.16	0.50
sin KNO_3 ni NH_4NO_3	7.95	0.45	1.0	4.49	2.70	1.00	5.00	1.20	3.16	0.50

La solución sin los aportes de estos abonos quedaría muy similar a la deseada.

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

Ejemplo 4.2.6: **Se intenta cuadrar la misma solución nutritiva del ejemplo 4.2.1 usando un agua desalada sin postratamiento.**

En este caso, el contenido en bicarbonatos del agua es menor de 0.5 mmol/L por lo que hay que aportar alguna fuente de alcalinidad. En este caso se va a optar por un contenido de 0.85 mmol/L de bicarbonatos en la solución:

El calcio se completa con nitrato de calcio que aporta además amonio y nitratos.
Usaremos como fuente de fósforo, fosfato monopotásico.
El aporte de bicarbonatos se realiza mediante bicarbonato potásico.
El nitrato que queda por aportar se añade como nitrato potásico.
El potasio no aportado con el abono anterior se añade con sulfato potásico.
El magnesio se aporta como sulfato de magnesio.

La solución nutritiva se ha cuadrado por completo, salvo en el caso del sulfato, donde no se ha llegado al nivel preestablecido pero está muy cerca y se ha superado ligeramente el de amonio

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO^{3-}
Solución nutritiva		8.0	0.5	1.0	4.5	2.7	1.0	--	--	1.5	0.85
aportes agua riego		0	0	0	0.11	0.01	0.07	3.3	3.6	0.01	0.3
aportes previstos		8.00	0.50	1.00	4.39	2.69	0.93			1.49	0.55
Abono	mmol/L	NO_3-	NH_4+	H_2PO_4-	K+	Ca_2+	Mg_2+	Na+	Cl-	SO_4^{2-}	HCO_3-
"$Ca(NO_3)_2$"	2.69	5.92	0.54			2.69					
KH_2PO_4	1.0			1.0	1.0						
$KHCO_3$	0.55				0.55						0.55
KNO_3	2.08	2.08			2.08						
K_2SO_4	0.88				0.76					0.38	
$MgSO_4$	0.93						0.93			0.93	
Aporte real		8.00	0.54	1.00	4.39	2.69	0.93	--	--	1.31	0.55
Totales		8.00	0.54	1.00	4.50	2.70	1.00	3.3	3.6	1.32	0.85

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono.

La solución anterior se va a usar durante todo un cultivo de fresa. Considerando un gasto total de agua de 320 L/m², se quieren calcular los aportes realizados de N, P_2O_5 y K_2O por hectárea.

Primero pasamos los valores de mmol/L a mg/L de nutriente usando los valores de la tabla 2 y luego multiplicamos por el gasto de agua por hectárea:

8 mmol/L NO_3^- . 14 = 112 mg/L N → 112 mg/L . 320 L/m^2 = 35840 mg/m^2 = 35.84 g/m^2 = 358400 g/ha = 358.4 kg/ha N nítrico

0.54 mmol/L NH_4^+ . 14 = 7,56 mg/L N → 7.56 mg/L . 320 L/m^2 = 2419 mg/m^2 = 2.419 g/m^2 = 24190 g/ha = 24.2 kg/ha N amoniacal

358.4 + 24.2 = **382,6 kg/ha N total**

1 mmol/L $H_2PO_4^-$. 70.97 = 70,97 mg/L P_2O_5 → 70,97mg/L . 320 L/m^2 =22710 mg/m^2 = 22,71 g/m^2 = 227100 g/ha = **227 kg/ha P_2O_5**

4,39 mmol/L K^+ . 47.1 = 206,8 mg/L K_2O → 206,8 mg/L . 320 L/m^2 = 66176 mg/m^2 = 66,18 g/m^2 = 661760 g/ha = **662 kg/ha K_2O**

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

4.2.2. Cálculo de soluciones nutritivas sin suelo con aguas con alta alcalinidad y/o con bajos aportes de nitratos

Aunque las referencias no recomiendan el cultivo sin suelo cuando la alcalinidad del agua supera los 8 mmol/L, en muchas zonas se usa esta técnica por otras ventajas y porque no hay aguas disponibles de baja o media alcalinidad. En el caso de Canarias, se tienen 5 tipos de agua:

1. Aguas de pozo, normalmente con altos contenidos de sodio y cloruros y relativamente pocos bicarbonatos.

2. Aguas de galería con altos contenidos de sodio y bicarbonatos con presencia en algunos casos de carbonatos y con poca concentración de cloruros.

   En ambos casos, el contenido de calcio es menor normalmente que el de magnesio. En bastantes casos, las concentraciones de calcio son bajas.

3. Las aguas regeneradas suelen tener unas características derivadas de las aguas de abasto utilizadas, siempre con mayores CE, aunque sometidas en los últimos años a un tratamiento terciario que mejora su calidad. También pueden tener contenidos apreciables de nitratos, amonio y fosfatos que deben tenerse en cuenta en el cálculo, como se vio en el ejemplo 4.2.6, aunque con los tratamientos terciarios de desalación actuales estás cantidades disminuyen notablemente.

4. Aguas desaladas. Los iones y sus relaciones serían similares al agua del mar, pudiendo variar algunos iones en función del método usado para la desalación. En muy contados casos, las aguas desaladas (sin postratamiento o sin mezcla con las aguas anteriores) pueden tener menos de 0.5 mmol/L de bicarbonatos. Casi siempre se aplican mezcladas con algunas de las aguas anteriores hasta valores de CE que suelen estar en el entorno de 800 mS/cm. En algunos casos, el agua regenerada se mezcla con agua desalada en las estaciones de tratamiento para mejorar su calidad agronómica.

5. Mezclas de las anteriores en diferentes proporciones, normalmente para intentar tener una calidad aceptable.

En el caso de aguas con alta cantidad de bicarbonatos (y carbonatos) se presenta un problema de cálculo complicado. En algunos casos, comparando la cantidad de bicarbonatos a neutralizar con la suma de fosfatos y nitratos y teniendo en cuenta que las necesidades de calcio se deben completar con nitrato cálcico, se observa que no se puede neutralizar aquellos con ácido nítrico y fosfórico. Se podría añadir un exceso de estos ácidos, a costa de desequilibrar la solución nutritiva.

El ácido fosfórico no debe aplicarse en exceso. Las cantidades de fosfatos (y por lo tanto de H_3PO_4) a aplicar en soluciones nutritivas son relativamente bajas y tienen un margen muy estrecho: las concentraciones normales suelen estar entre 1 y 1.5 mmol/L. No es recomendable pasar un máximo de 2 mmol/L para evitar problemas nutricionales, salvo casos muy excepcionales. En sustratos que retienen fosfatos como el picón se podría llegar a un máximo de 2.5 mmol/L al principio del cultivo para intentar saturar el material (Santos y Ríos, 2013). Por otra parte, como se verá en el apartado 4.5.1, mantener disueltas concentraciones mayores de 2 mmol/L en presencia de calcio puede ser relativamente complicado.

La opción más frecuente es aumentar ligeramente la cantidad de ácido nítrico (ejemplo 4.2.8). Aunque existe mayor margen de trabajo que con el ácido fosfórico, hay que tener en cuenta que los excesos de nitratos en los drenajes pueden no ser admisibles y que se pueden producir desbalances en la nutrición que provoquen problemas graves. Por otra parte, si una gran parte del nitrógeno que se aporta a la solución nutritiva está como ácido nítrico y éste se inyecta en función del pH (ver apartados 5.1 y 5.3) si este varía bruscamente (por ejemplo, al cambiar la calidad del agua de riego), la cantidad de nitrógeno puede cambiar de forma peligrosa (al alza o a la baja).

En el caso que no se pueda subir más la cantidad de ácidos nítrico y fosfórico, una opción en aguas con bajo calcio y alto magnesio sería aportar parte del calcio como $CaCl_2$, para tener más margen para añadir HNO_3. Sin embargo, esta sal no se suele usar normalmente ya que aporta cloruro a la solución nutritiva y no suele ser un producto comercial muy disponible. En función del cultivo puede haber un margen de uso de cloruros bastante grande: en tomate y otras solanáceas, por ejemplo, se podría regar hasta 6 - 8 mmol/L de cloruros, sin problemas de reducción de cosecha (Ver tabla 14).

Tabla 14: Niveles de cloruros para diferentes cultivos hortícolas (Casas y Casas, 1999)

Cultivo	Óptimo	Máximo
	meq/L	
Tomate	< 18.0	24.0 – 30.0
Melón	< 18.0	24.0
Calabacín	< 13.2	16.5
Sandía	< 11.0	16.5
Berenjena	< 11.0	14.3
Pepino	< 8.8	11.0 – 14.4
Pimiento	< 7.7	11.0
Col china, lechuga	< 7.7	11.0
Habichuela	< 6.6	9.9
Fresa	< 2.0	2.2

Existen referencias que señalan que el cloruro de calcio es más eficiente que el nitrato en evitar la aparición de necrosis apical en tomate, por lo que sería un abono a tener en cuenta en este cultivo, sobre todo en aguas con bajos niveles de cloruro.

Ejemplo 4.2.7: Calcular cuánto se podría aumentar la neutralización de bicarbonatos por ácido nítrico usando cloruro cálcico en un agua que tiene 3 mmol/L de Cl^-. Consideraremos un máximo de 8 mmol/L de cloruros.

El margen de subida de cloruros sería 8 – 3 = 5 mmol/L Cl^-.

Esto supondría $\frac{5}{2}$ = 2.5 mmol/L de $CaCl_2$ que aportan 2.5 mmol/L de Ca^{2+}.

La bajada en el aporte de nitrato de calcio sería de 2.5 mmol/L de abono.

Esto equivale a 2.5 . $\frac{11}{5}$ = 5.5 mmol/L de NO_3^- que quedarían disponibles para la adición de 5.5 mmol/L de ácido nítrico.

Este ácido "adicional" neutralizaría 5.5 mmol/L de bicarbonatos.

Subiendo 1 mmol/L de Cl^- en la solución nutritiva con cloruro cálcico se podrían neutralizar 1.1 mmol/L de bicarbonatos adicionalmente con ácido nítrico, al bajar el aporte de nitrato de calcio.

El uso de otras fuentes de calcio diferentes al nitrato y al cloruro puede ser factible, teniendo en cuenta:

- Precio, calculado respecto a la concentración de calcio que tienen.
- Posibles cuestiones de manejo de tanques de solución madre. En algunos casos, la fuente de calcio no se pueda mezclar con otros abonos y necesita un tanque de solución madre exclusivo. Si el producto no es compatible a concentraciones de solución nutritiva con otros nutrientes no sería utilizable en cultivo sin suelo.
- La disponibilidad del producto en la zona.

En el caso de usar esta alternativa, la metodología cambiaría algo. Usando cloruro de calcio como 2ª fuente de ese catión y para usar la mínima cantidad de esa sal, tendríamos (ejemplo 4.2.10):

- En primer lugar, se pondría todo el fósforo como ácido fosfórico.
- Luego se calcula la cantidad de ácido nítrico para terminar de dejar la alcalinidad en 0.5 mmol/L.
- El resto del nitrato no aportado como ácido se aporta como nitrato de calcio.
- El resto de calcio se aporta como cloruro de calcio.
- El potasio (y el magnesio en su caso) tendrían que aportarse como sulfatos.

La tercera opción es usar otro ácido. Actualmente la mayoría de las explotaciones con problemas de muy alta alcalinidad usan ácido sulfúrico, aplicado normalmente en el tanque de ácido que inyecta en función del pH (ver apartado 4.5.1) y en muy pocos casos, en preinyección, esto es, antes del resto de los elementos. La aplicación de ácido sulfúrico que se indicaba en su momento en el estanque presenta una serie de problemas que no hacen recomendable su uso. Entre ellas estarían la subida de pH con el tiempo, debido a la reacción con el CO_2 atmosférico y la corrosión de los estanques de hormigón por la cantidad de ion sulfato añadida.

El uso de ácido sulfúrico es una opción interesante siempre que sea factible desde el punto de vista de la Prevención de Riesgos Laborales en el cabezal y que no suponga un aporte excesivo de sulfatos, tanto desde un punto de vista de nutrición de la planta como posibles precipitaciones de $CaSO_4$ (poco probable salvo algunos casos en los tanques de mezcla). Lo normal es usar ácido fosfórico como aporte de P y ácido nítrico para seguir eliminando alcalinidad en función del aporte necesario de nitratos. El resto de la alcalinidad se destruiría con el ácido sulfúrico.

Con la solución nutritiva y el agua de riego de los siguientes ejemplos, se puede aplicar cualquiera de las soluciones anteriores para neutralizar los bicarbonatos (exceso de HNO_3, uso de $CaCl_2$, uso de H_2SO_4). Evidentemente, existen soluciones intermedias, como el uso de ácido sulfúrico y cloruro de calcio al mismo tiempo.

Ejemplo 4.2.8: **Calcular los aportes de abonos para la solución nutritiva y el agua de riego propuestas en la tabla y admitiendo un exceso de nitratos:**

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO^{3-}
solución nutritiva		12.50	0.50	1.50	7.00	4.50	2.00	---	---	2.00	0.50
aportes a. riego		0	0	0	0.20	0.60	1.50	4.40	2.60	0	6.70
aportes previstos		12.50	0.50	1.50	6.80	3.90	0.50	0	0	2.00	-6.20
abono	mmol/L	NO_3-	NH_4+	H_2PO_4-	K+	Ca_2+	Mg_2+	Na+	Cl-	SO_4^{2-}	HCO_3-
"$Ca(NO_3)_2$"	3.90	8.58	0.78			**3.90**					
H_3PO_4	1.50			**1.50**							-1.50
HNO_3	4.70	4.70									**-4.70**
K_2SO_4	3.40				**6.80**					3.40	
$MgSO_4$	0.50						0.50			**0.50**	
H_2SO_4	0.00	0.00								0.00	-0.00
aporte real		13.30	0.78	1.50	6.80	3.90	0.50	--	--	3.90	-6.20
totales		13.30	0.78	1.50	7.00	4.50	2.00	4.40	2.60	3.90	0.50

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono.

El procedimiento sería el normal:

- El calcio se completa con nitrato de calcio que aporta nitratos y más amonio que el marcado.
- Usaremos como fuente de fósforo, ácido fosfórico.
- El resto de bicarbonatos es neutralizado con HNO_3. En este caso, el exceso de nitratos es de 0.8 mmol/L (un 6% más sobre lo previsto). En función del estado del cultivo esto puede darse por bueno o no. Si estamos trabajando con una solución nutritiva que ya está en niveles de nitratos alta, no sería la mejor solución
- No hay margen para usar nitrato potásico y tenemos que usar usar sulfato potásico, lo que sube el aporte real de SO_4^{2-} a 3.9 mmol/L frente a los 2.0 mmol/L marcados. Sin embargo, la relación SO_4^{2-}/NO_3^- quedaría en 0.29, dentro de lo aceptable.

Aunque el amonio supera ligeramente el aporte previsto, al calcular la relación amonio/nitrato, sigue en valores muy similares por el aumento de nitrato.

Se observa que con esta agua que tiene una alcalinidad de 6.7 mmol/L y 0.6 mmol/L de Ca, usando sólo ácido nítrico y fosfórico para manejar el pH, ya supondría un exceso de nitratos en la solución nutritiva.

Ejemplo 4.2.9: **Calculamos la misma solución nutritiva y el agua de riego propuestas en el ejemplo 4.2.8, usando ácido sulfúrico para completar las necesidades de hidrogeniones.**

En este caso utilizaremos el ácido sulfúrico para neutralizar los bicarbonatos que no hicieron ni el H_3PO_4 (que se utilizó como única fuente de fósforo) y el HNO_3 (con el que se completan los aportes de nitrato después del nitrato de calcio).

Como en el caso anterior, se observa que no queda margen para usar KNO_3 tras los aportes de nitrato de calcio y ácido nítrico por lo que tenemos que usar sulfato para los aportes de potasio. Esto hace que los aportes reales de SO_4^{2-} sean superiores a los previstos. (4.3 mmol/L frente a 2.0 mmol/L marcados). Sin embargo, la relación SO_4^{2-}/NO_3^- seguiría estando en valores aceptables para una solanácea (0.34).

Por lo demás, la solución queda ajustada, salvo el amonio que queda ligeramente por encima del valor objetivo por el aporte de nitrato de calcio, pero sigue en valores aceptables en la relación NH_4/NO_3.

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO^{3-}
Solución nutritiva		12.50	0.50	1.50	7.00	4.50	2.00	---	---	2.00	0.50
Aportes a. riego		0	0	0	0.20	0.60	1.50	4.40	2.60	0	6.70
Aportes previstos		12.50	0.50	1.50	6.80	3.90	0.50	0	0	2.00	-6.20
Abono	mmol/L	NO_3-	NH_4+	H_2PO_4-	K+	Ca_2+	Mg_2+	Na+	Cl-	SO_4^{2-}	HCO_3-
"$Ca(NO_3)_2$"	3.90	8.58	0.78			**3.90**					
H_3PO_4	1.50			**1.50**							-1.50
HNO_3	3.92	**3.92**									-3.92
K_2SO_4	3.40				**6.80**					3.40	
$MgSO_4$	0.50						0.50			**0.50**	
H_2SO_4	0.39									0.39	**-0.78**
Aporte real		12.50	0.78	1.50	6.80	3.90	0.50	--	--	4.29	6.20
Totales		12.50	0.78	1.50	7.00	4.50	2.00	4.40	2.60	4.29	0.50

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono.

Ejemplo 4.2.10: **Como última opción se va a contemplar el uso de $CaCl_2$ de forma que se neutralicen los bicarbonatos sin usar ni un exceso de ácido nítrico ni ácido sulfúrico.**

En este caso, vamos a realizar la solución nutritiva con la cantidad mínima de $CaCl_2$ necesaria para ajustar la solución nutritiva en calcio y en nitratos, sin usar más ácidos que el fosfórico y el nítrico:

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
solución nutritiva		12.50	0.50	1.50	7.00	4.50	2.00	---	---	2.00	0.50
aportes a. riego		0	0	0	0.20	0.60	1.50	4.40	2.60	0	6.70
aportes previstos		12.50	0.50	1.50	6.80	3.90	0.50	0	--	2.00	-6.20
abono	mmol/L	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
H_3PO_4	1.50			**1.50**							-1.50
HNO_3	4.70	4.70									**-4.70**
$CaCl_2$	0.36					**0.36**			0.72		
"$Ca(NO_3)_2$"	3.54	7.80	0.71			**3.54**					
K_2SO_4	3.40				**6.80**					3.40	
$MgSO_4$	0.50						**0.50**			0.50	
aporte real		12.50	*0.71*	1.50	6.80	3.90	0.50	--	0.72	*3.90*	6.20
totales		**12.50**	***0.71***	**1.50**	**7.00**	**4.50**	**2.00**	**4.40**	**3.32**	***3.90***	**0.50**

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono

- Primero determinamos las necesidades de neutralización de bicarbonatos con ácido nítrico. Se tienen 6.2 mmol/L de bicarbonatos a neutralizar.
- Con el H3PO4 se destruyen 1.5 milimoles. Se necesitarían 6.2 – 1.5 = 4.7 mmol/L de HNO3 para terminar de neutralizar la alcalinidad presente.
- Luego obtenemos la cantidad de nitrato que queda por aportar que se aplicará como nitrato de calcio:

- La cantidad de nitrato a aportar es 12.5 mmol/L. Quedarían 12.5 - 4.7 = 7.8 mmol/L de nitrato a añadir con nitrato de calcio que estaría además aportando 7.8. 5/11 = 3.54 mmol/L de Ca2+.
- El aporte de calcio previsto es de 3.9 mmol/L, por lo que se necesitarían 3.9 – 3.54 = 0.36 mmol de Ca2+ del cloruro de calcio. El aporte de cloruro por ese abono sería de 0.72 mmol/L.
- El potasio y el magnesio se aportan con sulfato.

Una vez calculado el cloruro de calcio, la ponemos como primer abono. Luego completamos los aportes de calcio con nitrato y seguiríamos con el procedimiento de cálculo normal.

La solución queda ajustada, salvo en sulfatos y un pequeño exceso del amonio procedente del nitrato de calcio. El contenido de cloruros es sólo de 3.32 mmol/L, sin problema para las solanáceas (ver tabla 13).

En este caso, volvemos a tener que aportar el potasio como sulfato, con un aporte real similar al ejemplo 4.2.7. De nuevo, tenemos un pequeño exceso de amonio pero dentro de lo aceptable

Un problema que puede surgir en los tres ejemplos anteriores, es que todo el potasio se aporta como K_2SO_4 al no tener margen para la aplicación de KNO_3. Esto puede suponer una mayor probabilidad de superar la solubilidad máxima en las soluciones concentradas. Esto se podría solucionar usando algunos de las opciones del apartado 6.

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

El procedimiento de cálculo de soluciones nutritivas a partir de aguas de alta alcalinidad se puede aplicar en el caso de usar soluciones nutritivas con contenidos bajos o intermedios de nitratos y aguas de alcalinidad moderada. Debido a que no hay un margen de neutralización de todos los bicarbonatos con el HNO3, puede ser necesario usar ácido sulfúrico o utilizar fuentes de calcio que no sean el nitrato de calcio. En los siguientes ejemplos se ven ambos casos.

Ejemplo 4.2.11: **Calcular los aportes de abonos para la solución nutritiva baja en nitratos en tomate (cultivo de verano) y el agua de riego propuestas en el ejemplo 4.2.8, usando ácido sulfúrico para completar las necesidades de hidrogeniones.**

Teniendo un total de 9.0 mmol/L de nitratos, no va a ser posible completar los aportes de calcio, ácido y potasio con abonos que aporten NO_3^-. Si vamos a la opción de usar ácido sulfúrico, el procedimiento sería el normal:

- El calcio se completa con nitrato de calcio que aporta nitratos y más amonio que el marcado.
- Usaremos como fuente de fósforo, ácido fosfórico.
- Usamos HNO3 para completar las necesidades de nitrato.
- Completamos las necesidades de acidficación con ácidos sulfúrico.
- No hay margen para usar nitrato potásico y tenemos que usar usar sulfato potásico, lo que sube el aporte real de SO42- a 5.6 mmol/L frente a los 2.0 mmol/L marcados. La relación SO42-/NO3- quedaría en 0.6, algo alta, lo que nos indica que debemos controlar los niveles foliares de nutrientes y la CE de los drenajes.

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
solución nutritiva		9.0	0.40	1.30	5.8	3.8	1.5	---	---	2.00	0.50
aportes a. riego		0	0	0	0.20	0.60	1.50	4.40	2.60	0	6.70
aportes previstos		9.0	0.50	1.30	5.4	3.20	0.0	0	0	2.00	-6.20
abono	mmol/L	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
"$Ca(NO_3)_2$"	3.2	7,04	0.64			**3.2**					
H_3PO_4	1.50			**1.30**							-1.30
HNO_3	4.70	**1.96**									**-1.96**
K_2SO_4	2.70				**5.4**					2.70	
H_2SO_4	0.00									2,94	**-2.94**
aporte real		9,00	*0.64*	1.30	5.4	3.20	0.0	--	--	*5.64*	-6.20
totales		**9,00**	***0.78***	**1.30**	**5.80**	**3.80**	**1.50**	**4.40**	**2.60**	***5.64***	**0.50**

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono.

Aunque el amonio supera ligeramente el aporte previsto, al calcular la relación amonio/nitrato, sigue en valores inferiores al 10%.

Ejemplo 4.2.12: Como última opción se va a contemplar el uso de $CaCl_2$ de forma que se neutralicen los bicarbonatos sin usar ni un exceso de ácido nítrico ni ácido sulfúrico.

En este caso, vamos a realizar la solución nutritiva con la cantidad mínima de $CaCl_2$ necesaria para ajustar la solución nutritiva en calcio y en nitratos, sin usar más ácidos que el fosfórico y el nítrico:

- Primero determinamos las necesidades de neutralización de bicarbonatos con ácido nítrico. Se tienen 6.2 mmol/L de bicarbonatos a neutralizar.
- Con el H3PO4 se destruyen 1.3 milimoles. Se necesitarían 6.2 – 1.3 = 4.9 mmol/L de HNO3 para terminar de neutralizar la alcalinidad presente.
- Luego obtenemos la cantidad de nitrato que queda por aportar que se aplicará como nitrato de calcio:
- La cantidad de nitrato a aportar es 9.0 mmol/L. Quedarían 9.0 - 4.9 = 4.1 mmol/L de nitrato a añadir con nitrato de calcio que estaría además aportando 4.1. 5/11 = 1.86 mmol/L de Ca2+.
- El aporte de calcio previsto es de 3.2 mmol/L, por lo que se necesitarían 3.2 –1.86 = 1.34 mmol de Ca2+ del cloruro de calcio. El aporte de cloruro por ese abono sería de 2.67 mmol/L.
- El potasio se aporta con sulfato.

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
solución nutritiva		9.0	0.4	1.30	5.8	3.8	1.5	---	---	2.00	0.50
aportes a. riego		0	0	0	0.20	0.60	1.50	4.40	2.60	0	6.70
aportes previstos		9.0	0.50	1.30	5.4	3.20	0.0	0	0	2.00	-6.20
abono	mmol/L	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
H_3PO_4	1.30			**1.30**							-1.30
HNO_3	4.9	4.90									**-4.90**
$CaCl_2$	0.36					**1.34**			2.68		
"$Ca(NO_3)_2$"	1.86	4.1	0.37			**1.86**					
K_2SO_4	3.40				**5.40**					2.7	
aporte real		9.0	*0.37*	1.30	5.4	3.20	0	--	2.68	*2.7*	6.20
totales		**9.00**	***0.37***	**1.30**	**5.8**	**3.8**	**1.5**	**4.40**	**5.28**	***2.70***	**0.50**

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono

La solución queda ajustada, salvo en sulfatos, aunque con una relación SO_4/NO_3 del 0.3 El contenido de cloruros es sólo de 5.3 mmol/L, sin problema para las solanáceas (ver tabla 13).

El amonio se queda prácticamente en el nivel deseado. Si se quisiera llegar 0.4 mmol/L habría que aportarlo con sulfato amónico.

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

Por último, el uso de una fuente alternativa de calcio al nitrato puede ser una opción cuando se quiere limitar la cantidad de NH_4^+ en la solución nutritiva, como sería el caso de usar aguas regeneradas con altos valores de este ión o cuando no es admisible pasar un cierto valor.

Ejemplo 4.2.13: Se desea calcular la solución nutritiva siguiente para calabacín, usando un agua regenerada de calidad peor que la del ejemplo 4.2.5, usando ácido sulfúrico.

Aplicamos el procedimiento habitual, usando ácido sulfúrico para eliminar la alcalinidad no neutralizada por el fosfórico y el nítrico:

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Solución nutritiva		12,5	0.5	1.5	7,5	4,5	2,0	--	--	2.00	0.5
aportes agua riego		0,33	0,61	0,56	0.92	0.47	1,11	8,8	4,5	0,8	7,0
aportes previstos		12,17	0	0,94	6,58	4,03	0,89	0	0	1,2	-6,5
Abono	mmol/L	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
"$Ca(NO_3)_2$"	4,03	8,87	0,81			**4,03**					
H_3PO_4	0,94			**0,94**							-0,94
HNO_3	3,64	3,64									**-3,64**
K_2SO_4	3,29				**6,58**					3,29	
$MgSO_4$	0,89						**0,89**			0,89	
H_2SO_4	0,96									0,96	**-1,92**
Aporte real		12,17	*0,82*	0,94	6,58	4,03	0,89	--	--	*5,13*	-6,50
Totales		**12,5**	***1,43***	**1.5**	**7,5**	**4,5**	**2,0**	**8,8**	**4,5**	***5,13***	**0.5**

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono.

En este caso, al tener el agua una concentración de amonio alta, usando nitrato de calcio como abono, la cantidad total de amonio sube a 1.43 mmol/L. La relación amonio/nitrato se quedaría en:

$$\frac{1.43}{12.5} = 0.114 > 0.10$$

Este valor supera ligeramente el valor de referencia, por lo que podría haber problemas de deficiencias de calcio y/o potasio. En calabacín se podría dar por bueno en condiciones de baja demanda evaporativa. En caso que se considere que esa relación no sea aceptable, debería bajarse el aporte de amonio usando otra fuente de calcio que no aporte ese ión, sustituyendo parcial o totalmente al nitrato de calcio.

Vamos a calcular cuánto nitrato de calcio tendríamos que sustituir por otra fuente para mantener una relación amonio/nitrato de 0,1:

0,1 . 12.5 = 1,25 mmol/L NH_4^+ sería la concentración en la solución nutritiva.

Como hay 0,61 mmol/L de amonio en el agua de riego, se podría aportar 1.25 – 0.61 = 0.64 mmol/L. Esto supone 0.64 . 5 = 3.2 mmol/L de nitrato de calcio a aportar.

El resto de calcio 4,03 – 3.2 = 0,83 mmol/L tendría que aportarse con otra fuente.

Habría que recalcular los aportes de ácido nítrico (al quedar más nitratos que aportar) y de sulfúrico (para completar la neutralización no hecha por la nueva cantidad de ácido nítrico).

Si usáramos cloruro de calcio como fuente de calcio, teniendo en cuenta que el calabacín es tolerante a los cloruros (hasta 13.2 mmol/L Cl^-), tendríamos:

Con la cantidad de ácido sulfúrico que se está usando, podríamos aplicar más cloruro de calcio de forma que el ácido nítrico baste para completar la neutralización de la alcalinidad.

		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Solución nutritiva		12,5	1,25	1.5	7,5	4,5	2,0	--	--	2.00	0.5
aportes agua riego		0,33	0,61	0,56	0.92	0.47	1,11	8,8	4,5	0,8	7,0
aportes previstos		12,17	0	0,94	6,58	4,03	0,89	0	0	1,2	-6,5
Abono	mmol/L	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
"$Ca(NO_3)_2$"	3,2	7,04	**0,64**			3,2					
$CaCl_2$	0,83					**0,83**			1,66		
H_3PO4	0,94			**0,94**							-0,94
HNO_3	5,13	**5,13**									-5,13
K_2SO_4	3,29				**6,58**					3,29	
$MgSO_4$	0,89						**0,89**			0,89	
H_2SO_4	0,22									0,22	**-0,43**
Aporte real		12,17	0,64	0,94	6,58	4,03	0,89	--	1,66	*4,4*	-6,50
Totales		**12,5**	**1,25**	**1.5**	**7,5**	**4,5**	**2,0**	**8,8**	**6,16**	***5,31***	**0.5**

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono.

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

4.3 Ajuste de los microelementos

Una vez cuadrada la solución nutritiva con los macroelementos, se puede pasar a los microelementos. En el caso de soluciones para cultivo en suelo, no suele haber unas concentraciones de microelementos marcadas, trabajándose normalmente de forma curativa, por los resultados de los análisis foliares o por sintomatología en la planta, o en el caso de suelos de pH extremos, cultivos muy sensibles o por el historial de la parcela, de forma preventiva. Muchas veces, además se suele optar por la aplicación foliar de microelementos

En el caso de soluciones para cultivo sin suelo, como normalmente las aguas de riego no contienen cantidades apreciables de estos elementos (salvo el boro en algunos casos), el cálculo es sencillo. Podemos formular la solución con sales o quelatos que aporten un solo elemento, como en el siguiente ejemplo:

Ejemplo 4.3.1: Se desean aplicar las siguientes cantidades de microelementos en un cultivo de tomate, utilizando sales y compuestos simples:

Elemento	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
mg/l	0.55	0.55	0.03	0.25	0.20	0.05

Si se usa un quelato de hierro con una concentración del 6%, se aportarían 0.55*(100/6) = **9.2 g/m^3** (mismo valor que si se expresa en mg/L).
Para el manganeso, el cobre y el cinc se podrían aplicar los sulfatos correspondientes:
Manganeso, con un 32% de riqueza, por lo que se necesitaría 0.55*(100/32) = **1.7g/m^3**.
Cobre, con un 25% de este elemento, se aportarían 0.03*(100/25) = **0.12 g/m^3.**
Cinc, con un 23% de riqueza, se añadiría 0.25*(100/23) = **1.09 g/m^3.**
El boro se puede añadir como bórax, con un 10% de B, por lo que 0.20*(100/10) = **2 g/m^3**
El molibdeno se aporta como molibdato de sodio, con 40% de Mo, dando 0.05*(100/40) = **0.12 g/m^3.**

En total, la aportación de microelementos sería 14,2 g/m^3. Hay que hacer 6 pesadas

Algunas referencias señalan que no suele ser conveniente mezclar sales metálicas de cinc, cobre o manganeso con algunos quelatos de hierro. En estos casos se puede producir pérdidas de hierro quelatado de hasta un 20 a 50% debido al intercambio de este elemento por Cu, Mn o Zn. Por ello recomiendan el uso de todos los microelementos en forma de quelato.

Sin embargo, suele ser mucho más común el uso de combinados, preparado con todos o casi todos los elementos. Una forma de elegir el combinado más adecuado a las concentraciones que se desean aportar al cultivo podría ser trabajar con el equilibrio entre las concentraciones deseadas en la solución nu-

tritiva, de forma similar a cuando se hace con los abonos complejos, tomando el hierro como unidad. Se elegirá el preparado que mayor semejanza tenga con el equilibrio escogido. Hay que tener en cuenta que las concentraciones óptimas de microelementos de muchos cultivos suelen oscilar en rangos relativamente amplios por lo que la elección del preparado comercial puede ser flexible.

Ejemplo 4.3.2: Aplicar la solución de microelementos del ejemplo anterior a partir de 2 combis:

Primero calculamos un equilibrio basado en la concentración de hierro para las concentraciones que queremos aportar:

Elemento	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
mg/l	0.55	0.55	0.03	0.25	0.20	0.05
Equilibrio	**1**	0.55/0.55 =**1**	0.03/0.55 =**0.05**	0.25/0.55 =**0.45**	0.20/0.55 =**0.36**	0.05/0.55 =**0.1**

Tenemos 2 preparados comerciales que presentan las siguientes concentraciones:

	Elemento	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
Combi 1	%	5.4*	4.5	0.3	3	3.5	0.4
Combi 2	%	5.25**	2.0	0.15	1.0	0.4	0.1

*: quelatado como EDTA. **: quelatado como DTPA

Calculamos las relaciones referidas al Fe de cada combi para compararlas con las de las concentraciones deseadas.

	Elemento	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
Combi 1	Equilibrio	1	4,5/5,4 = **0.9**	3/5.4 = **0.05**	3/5.4 = **0.55**	3.5/5.4 = **0.66**	0.4/5.4 = **0.07**
Combi 2	Equilibrio	1	2.0/5,25 = **0.4**	0.15/5.25 = **0.03**	1/5.25 = **0.2**	0.4/5.4 = **0.08**	0.1/5.4 = **0.02**

El combi 1 se adapta bastante al equilibrio deseado salvo en boro. El cultivo de tomate sería tolerante a valores moderados de B.

El combi 2 tiene una concentración relativa de manganeso, boro y cobre que no corresponde con lo estipulado.

En estas condiciones, elegiríamos el combi 1.

La concentración recomendada por la casa comercial del producto es de 10 g/m^3, lo que sería equivalente a 0.54 mg/L de Fe, 0.5 mg/L de Mn, 0.03 mg/L de Cu, 0.3 mg/l de Zn, 0.36 mg/L de B y 0.04 mg/L de Mo, concentraciones muy parecidas a lo que se busca.

Por lo demás, en este preparado, el hierro está quelado con DTPA y el resto de metales con EDTA por lo que podría trabajar bien hasta un pH de 7.5.

Algunas veces se suele suplementar un complejo de microelementos con un compuesto simple, normalmente un quelato de hierro, para ajustar la solución nutritiva a las necesidades particulares del cultivo en cada momento. Es bastante normal suplementar a un combi donde el hierro suele estar en forma de EDTA con un preparado comercial con una adición de EDDHA, bastante más estable con el pH cuando se espera que los valores en el sustrato o el suelo sean mayores de 7.0 – 7.5.

4.4 Cálculo de la CE aproximada de la solución nutritiva

Una vez cuadrada la solución nutritiva se puede estimar la CE aproximada de la solución nutritiva. El cálculo de la CE de la solución nutritiva es muy importante, además de para compararlo con el valor óptimo para el cultivo en ese momento, a la hora de poner una CE de consigna al controlador de la fertirrigación (la CE de consigna sería la que el sistema tiene que mantener inyectando los abonos. (Ver apartado 5.1)).

La CE consigna debe ser similar a la CE calculada de la solución nutritiva, procurando que ambos valores tengan valores parecidos. Si no se hace así,

las concentraciones y los equilibrios calculados pueden variar bastante de los deseados, tanto más cuanto más se aleje la CE consigna de la CE esperada de la solución nutritiva. Esto puede ser especialmente peligroso en aguas con bajo contenido en carbonatos (donde un exceso de abonos ácidos puede desplomar el pH a valores peligrosos para el cultivo) o con contenidos altos de algún ion determinado. Por ejemplo, en Canarias, algunas aguas tienen niveles de magnesio altos: al bajar la CE de consigna, se baja el aporte de calcio y la relación Ca/Mg irá bajando, pudiendo llegar a valores peligrosos.

Por lo anterior, no debe cambiarse la CE de consigna respecto a la calculada sin recalcular para evitar efectos indeseables (ver ejemplo 5.2.6 b). Se pueden tomar varias decisiones:

- Si la CE calculada es mayor que la CE de consigna o es más alta de lo deseado una vez tenida en cuenta la salinidad del agua:

  - Bajar las concentraciones de nutrientes hasta que el valor de la CE calculada sea similar a la CE que se desea aplicar al cultivo. Hay que tener en cuenta que los equilibrios entre iones deben intentar mantenerse. Esto puede resultar un problema ya que las concentraciones de nutrientes en el agua se mantienen igual (por ejemplo, el Mg en Canarias). Además, las necesidades de ácido son las mismas y si la adición está comandada por una sonda de pH también se podrían producir desequilibrios. Se podría calcular cuánto deben bajarse las concentraciones de los elementos que se aportan con los fertilizantes con la siguiente fórmula:

  - Igualar la CE consigna a la CE calculada. Esto puede ser una opción cuando la diferencia no es demasiado alta y siempre que no haya problemas debidos a la alta CE (bajada de producción y calidad, exceso de consumo de nutrientes, etc.). Debe considerarse el aumento de la fracción de lavado para no subir la salinidad del suelo o sustrato. Debe tenerse en cuenta, además, que no haya problemas por exceso de nutrientes.

- Si la CE consigna es superior a la CE calculada (normalmente debido a un problema en la programación o por errores de los usuarios) podemos tener los mismos problemas que en el punto anterior, ya que los equilibrios entre nutrientes pueden cambiar y a que los aportes de ácido pueden hacer que hayan excesos de nitratos, fosfatos o sulfatos.

Independientemente del cálculo aproximado, siempre debe hacerse una comprobación midiendo la CE de la solución en los emisores. Esta comprobación debe hacerse tanto cuando se empieza a usar la solución formulada como de forma periódica, como forma de constatar que el sistema de inyección de abonos funciona correctamente.

El valor de la CE se puede estimar por varios métodos. En esta publicación se van a explicar tres. Se puede elegir el más cómodo de los métodos o realizar una media entre ellos.

4.4.1. Método de los equivalentes

Este método es aplicable cuando se disponte del análisis de agua, ya que se necesita que estén cuantificados todos los iones que están disueltos en cantidades significativas. Debe tenerse cuidado de que se cumpla la igualdad de suma de aniones y de cationes en los datos del análisis de agua ya que en el cálculo posterior puede afectar a la fiabilidad del valor

Este método se basa en que la CE final de una solución nutritiva medida en dS/m es el resultado aproximado de dividir la suma de miliequivalentes de los cationes (o los aniones). dividida entre un factor que está entre 10 (CE alta) y 12 (CE baja). La suma de los aniones y la de los cationes debe dar aproximadamente lo mismo, admitiéndose un 10% de diferencia entre un valor y otro.

Ejemplo 4.4.1: **Calcular de la CE aproximada de la solución nutritiva del ejemplo 4.2.9:**

Ion	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
totales (mmol/L)	12.50	0.71	1.50	7.00	4.50	2.00	4.40	3.32	3.90	0.50
totales (meq/L)	12.50	0.71	1.50*	7.00	9.00	4.00	4.40	3.32	7.80	0.50

*: Consideramos que el pH de la solución nutritiva es de 5.5 – 6.0 por lo que la valencia del fosfato sería 1

Suma de cationes: 0.71 + 7.0 + 9.0 + 4.0 + 4.40 = 25.12 meq/L
Suma de aniones: 12.5 + 1.5 + 3.32 + 7.8 + 0.5 =25.62 meq/L

Recordemos que la diferencia entre las sumas no debe superar un valor del 5 – 10% (90 – 95% fiabilidad):

25.62 – 25.12 = 0.5 meq/L (diferencia entre sumas). Si tomamos el valor menor de las dos sumas (por seguridad):

$$\frac{0,5}{25,12} = 0,0199 \,.\, 100 = 1,99\% \text{ de diferencia} = 98\% \text{ fiabilidad} \rightarrow \text{OK}$$

Tomando el valor medio de las dos sumas, 25.37 meq/L, y dividiéndola entre 10, se tienen 2.537 dS/m = **2537 μS/cm**

Este método suele ser el más cómodo cuando trabajamos con soluciones nutritivas en cultivo sin suelo. En ese caso, se suele recomendar, para facilitar el cálculo, poner una fila adicional al final de la tabla de cálculo con los meq/L finales

mmol/L		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
S. nutritiva (mmol/L)											
Agua riego (mmol/L)											
Aportes previstos											
Abono	mmol/L	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
abono 1											
...											
abono n											
Aportes reales											
Totales (mmol/L)											
Totales (meq/L)											

4.4.2. Método gravimétrico

Este método se basa en el cálculo del total de sólidos disueltos (TDS) en la solución nutritiva. Este método puede ser especialmente útil cuando no se tiene un análisis de agua y se quiere determinar al menos el aumento de CE por la adición de abonos.

En la solución nutritiva hay sólidos disueltos provenientes tanto de los aportes de abono como por la propia agua de riego. La cantidad de sales debida al agua de riego se estima (si no es un parámetro calculado en el resultado del análisis). Esta estima se puede hacer multiplicando la CE por el factor 0.7 cuando trabajamos con un agua bicarbonatada sódica. Hay que recordar que el factor 0,64 se suele referir a aguas en que los iones principales son sodio y cloruro.

Aguas bicarbonatadas sódicas $\mathbf{TDS_{agua\ de\ riego}=0.7\ .\ CE_{agua\ de\ riego}}$

Aguas cloruradas sódicas $\mathbf{TDS_{agua\ de\ riego}=0.64\ .\ CE_{agua\ de\ riego}}$

A la hora de calcular la cantidad de sales disueltas se sumarían todos los aportes de abonos:

$\mathbf{TDS_{aportes}=mg/L\ abono\ 1+mg/L\ abono\ 2+...+mg/L\ abono\ n}$

Al neutralizar una cierta alcalinidad, se considera que ésta desaparece (ver apartado 2.4.3 y 5.1):

$\mathbf{TDS_{alcalinidad\ destruida}=\ mg/L\ bicarbonatos\ destruídos\ +\ mg/L\ carbonatos\ destruidos}$

La cantidad total de sólidos disueltos en la solución nutritiva será:

$\mathbf{TDS_{total}=TDS_{aportes}+\ TDS_{agua\ riego}-\ TDS_{alcalinidad\ destrudida}}$

Cuando se acidifica a pH 5.5 – 6.0, se puede considerar, a efectos de simplificar el cálculo, que el aporte de CE por los ácidos se compensa por la eliminación de la alcalinidad hasta dejar sólo 0,5 mmol/L y como se vio en el apartado 3.1.2. Por lo tanto se puede simplificiar que los sólidos totales disueltos serían la suma de los procedentes del agua más de los de los abonos, sin contar los ácidos añadidos.

La cantidad de sólidos totales disueltos, dividida entre un factor nos da la CE final de la solución nutritiva, en µS/cm. Este factor es variable, yendo de 0.7 en aguas poco salinas a 0.9 cuando la CE es alta. En soluciones nutritivas se trabaja con un valor entre 0.80 y 0.85, siendo 0,85 más usado cuando se trabaja en el entorno de 2.5 a 3.5

$$CE_{total} = \frac{TDS\ total}{factor}; \quad CE_{total} = \frac{TDS}{0{,}8}\ (\text{CE bajas}) \qquad CE_{total} = \frac{TDS}{0{,}85}\ (\text{CE normales})$$

Ejemplo 4.4.2: **Supongamos que se vuelve a calcular la CE del ejemplo 4.2.9, teniendo en cuenta que el agua de riego tiene una CE de 0.80 dS/m.**

Abono	mmol/L	mg/L
HNO_3	4.70	296
H_3PO_4	1.50	147
"$Ca(NO_3)_2$"	3.54	765
$CaCl_2$	0.72	158
K_2SO_4	3.40	593
$MgSO_4$	0.50	123
$TDS_{aportes}$ incluso ácidos		2082
$TDS_{aportes}$ sin ácidos		1639

Primero calculamos los aportes de los abonos usados:

Luego estimamos la cantidad de bicarbonatos destruidos por los ácidos.

$TDS_{alcalinidad\ destruida}$ = 6.20 mmol/L . 61 = 378 mg/L

Y también estimamos el aporte del agua de riego (bicarbonatada sódica):

$TDS_{agua\ riego}$ = 800 . 0.7= 560 mg/L

Finalmente sumamos todos:

TDS_{total}= 2082 + 560 – 378 = 2264 mg/L

Aplicamos el coeficiente 0.85:

$$CE_{total} = \frac{2264}{0{,}85} = \mathbf{2663\ \mu S/cm}$$

La CE calculada con la simplificación de no contar con los ácidos añadidos ni la alcalinidad destruida sería:

$TDS_{aportes}$ sin ácidos = 1639 mg/L

$TDS_{agua\ riego}$ = 560 mg/L

TDS_{total} = 1639 + 560 = 2199 mg/L

$$CE_{total} = \frac{2199}{0{,}85} = \mathbf{2587\ \mu S/cm}$$

Los dos valores son bastante similares (sólo 76 μS/cm de diferencia).

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

Este método suele ser bastante útil para calcular la CE aproximada que supondrá un aporte de abonos determinado, sobre todo cuando no se conoce exactamente que fertilizantes se tratan.

Ejemplo 4.4.3: **Se desea conocer el aumento de CE debido a la fertilización en un cultivo de aguacate adulto en junio, sabiendo que requiere 30 gramos de abono/árbol y semana. En ese mes, la demanda en esa zona es de 350 litros/árbol y semana.**

Para conocer cuanto supone en aumento de CE, primero tendríamos que saber el aporte en mg/L y luego usar la fórmula anterior:

$$\frac{30}{350} = 0.086\ \text{g/L} = 86\ \text{mg/L}.$$

Al ser el aporte bajo y trabajarse normalmente en este cultivo con CE bajas, usaríamos el factor 0.8:

$$\text{Incremento } CE_{total} = \frac{0{,}86}{0{,}8} = \mathbf{108\ \mu S/cm}$$

4.4.3. Método de los aportes

Se basa en multiplicar la cantidad de cada abono, en mg/L por un factor, característico de cada sal, que correspondería al incremento de CE al aplicar una cantidad dada de esa sal. Si el aporte de 1 g/L de un fertilizante determinado supone un aumento de 1.3 dS/m (equivalente a que un aporte de 1 mg/L aumenta la CE en 1.3 mS/cm), el factor de ese abono sería 1.3.

Algunos factores están listados en la tabla 15. Cada sal tendría un aporte salino diferente. A su vez, para cada abono comercial, el aporte varía debido a las diferentes impurezas que contenga. En muchos catálogos viene indicado ese valor. Debe tenerse en cuenta que los factores de conversión están calculados en agua destilada.

Tabla 15: Subida de la CE por el aporte de 1g/L (0,1%) de diferentes fertilizantes

sal	ΔCE dS/m (factor)	sal	ΔCE dS/m (factor)
Nitrato cálcico	1.10 - 1.20	Sulfato magnésico	0.75 - 1.61
Nitrato potásico	1.27 - 1.40	Fosfato monoamónico	0.80 - 0.85
Nitrato amónico	1.27 - 1.70	Fosfato monopotásico	0.68 - 0.80
Nitrato magnésico	0.90 - 1.64	Ácido fosfórico*	1.67 - 2.65**
Sulfato potásico	1.30 - 1.70	Ácido nítrico*	1.10
Sulfato amónico	2.00 - 2.14	Ácido sulfúrico*	1.10
Urea fosfato	1.22 - 1.54	Cloruro cálcico y potásico	1.56

* La CE final dependerá de los bicarbonatos destruidos **: dependiendo de la riqueza en ácido

Si no se dispone del aporte salino por catálogo o se quiere ajustar bastante el valor, se puede determinar en campo. Para ello se pesa una cantidad de abono determinada, se disuelve en el agua de riego y se determina el aumento de CE obtenido con un conductímetro (por ejemplo, tomar 5 litros de agua de riego, medir la CE, pesar 5 gramos (con una pesa con cierta precisión) y disolverlos en ese volumen, volviendo a medir la CE). La ventaja es que se obtiene el factor adaptado a los abonos efectivamente utilizados y en el agua en la que se van a disolver.

Este método puede tener la ventaja de poder tener en cuenta qué sal está aportando CE a la solución nutritiva si se dispone de los factores salinos correctos, permitiendo en algunos casos sustituir un abono más salino por otro con menor factor. Como inconvenientes tiene que para ser relativamente exacto debemos conocer el factor exacto de nuestro abono (por ejemplo, el aporte de 1 g/L de nitrato amónico varía entre 1.27 y 1.70 dS/m en función del fabricante) y que no se podría utilizar en abonos como la urea que no suben la CE.

La CE proveniente de los abonos se calcularía de la siguiente manera:

$$CE_{abonos} = (mg/L \text{ abono } 1 \,.\, \text{factor abono } 1) + (mg/L \text{ abono } 2.\, \text{factor abono } 2) + \ldots + (mg/L \text{ abono n.\, factor abono n})$$

La CE del agua de riego no debe ser sumada directamente a la CE calculada aportada por los abonos, ya que se ha eliminado una cierta alcalinidad La aportación a la CE de esa alcalinidad se puede estimar dividiendo los mg/l destruidos entre 0.7.

$$CE_{\text{alcalinidad destruida}} = \frac{\frac{mg}{L}CO_3^{2-} + \frac{mg}{L}HCO_3^-}{0{,}7}$$

La CE final de la solución nutritiva sería la suma de la CE de los abonos más la CE del agua de riego menos la CE debida a los bicarbonatos destruidos.

$$CE_{total} = CE_{abonos} + CE_{\text{agua de Riego}} - CE_{\text{alcalinidad destruida}}$$

Como en el apartado anterior, cuando se acidifica a pH 5.5 – 6.0, se considera, a efectos de simplificar el cálculo que el aporte de CE por los ácidos se compensa por la eliminación correspondiente de alcalinidad y se podría sumar a la CE del agua, la CE de los abonos sin contar los ácidos.

Ejemplo 4.4.4: **Se realiza el cálculo para la solución nutritiva del ejemplo 4.2.9 con un agua de origen de 800 μS/cm, utilizando el método de los aportes:**

En primer lugar, se estima la CE perdida por la destrucción de la alcalinidad, en este caso, 6.2 mmol/L de bicarbonatos. Cuando se calcula la alcalinidad en aguas con carbonatos y bicarbonatos en mmol/L, el valor se puede asimilar a bicarbonatos a los efectos de calcular los mg/L de alcalinidad destruida:

Alcalinidad destruida = 6.2 mmol/L; 6.2 . 61
(masa molecular del HCO_3^-)=378 mg/L

$$CE_{\text{alcalinidad destruida}}=\frac{378}{0,7}=540\ \mu S/cm$$

Seguidamente se calcularía la CE aportada por los fertilizantes utilizados en la confección de la solución nutritiva. En este caso, usaremos el valor más bajo de los factores de la tabla 14:

Abono	mmol/L	mg/L	Factor	CE (mS/cm)
H_3PO_4	1.50	147	1.67	245
HNO_3	4.70	296	1.10	326
"$Ca(NO_3)_2$"	3.54	765	1.10	842
$CaCl_2$	0.72	158	1.56	246
K_2SO_4	3.40	592	1.30	770
$MgSO_4$	0.50	123	0.75	92
			CE_{aportes} con ácidos	2521
			CE_{aportes} sin ácidos	1950

Luego, la CE total calculada mediante este método sería:

$$CE_{total} = = 2521 + 800 - 540 = \mathbf{2781\ \mu S/cm}$$

Si se vuelva a simplificar que el aporte de CE por los ácidos se compensa por la eliminación de alcalinidad hasta pH 5.5, la CE de los aportes del resto de abonos se suma a la CE del agua para obtener la CE total calculada:

CE_{total} = 1950+800= **2750 μS/cm**

Los dos valores son bastante similares (sólo 31 μS/cm de diferencia).

En este caso, la diferencia entre la CE calculada mediante este método (2781 mS/cm) y las otras dos (2553 y 2663 mS/cm), puede ser debida al uso de sulfato potásico y cloruro cálcico que tienen un aporte salino relativamente alto.

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

4.5 Evaluación de los problemas de precipitación

Una vez terminado el cálculo de los macroelementos se debe también comprobar que no haya precipitaciones en la solución nutritiva, con los problemas que esto aporta (obturación de emisores y bajadas de concentración). En soluciones nutritivas los problemas suelen estar debidos a la precipitación de carbonato de calcio, microelementos, fosfato dicálcico y sulfato de calcio.

- Para la estima de problemas por precipitados de $CaCO_3$ se suele acudir al cálculo del pH de equilibrio, que sería el valor a partir del cual comenzaría la precipitación. Este fenómeno no es probable si trabajamos con los pH que se recomiendan para soluciones nutritivas que están normalmente por debajo del nivel del pH de equilibrio. En soluciones donde no se piense controlar el pH y con aguas con altos contenidos de carbonatos y bicarbonatos, debe evaluarse el riesgo de precipitación de $CaCO_3$, calculando el pH de equilibrio.

- En lo que respecta a los microelementos, si se aplican como quelatos y se mantiene un pH inferior a 6.5 -7.5 no debería haber problemas de precipitación en la solución nutritiva. La precipitación de fosfatos y sulfatos de los metales (en el caso de ser aportados sin quelatar) es poco probable al ser su concentración extremadamente baja. De todas formas, se recomienda, si es posible, no colocar los microelementos en el mismo tanque de solución madre que los fosfatos y controlar el pH del tanque (ver apartado 6.1).

Vamos a extendernos más en la evaluación del riesgo de precipitación más probable en soluciones que sería el caso del $CaHPO_4$ y en bastante menor medida del $CaSO_4$.

4.5.1. Estima de la precipitación de fosfato dicálcico.

Como ya se ha comentado antes, el ion fosfato pasa, según aumenta el pH, de $H_2PO_4^-$ a HPO_4^{2-}. El HPO_4^{2-} precipita rápidamente con el calcio (apartado 2.4.1). Suele ser bastante frecuente observar en analíticas de soluciones nutritivas con valores de pH superiores a 6.5 que las concentraciones de calcio y fósforo son menores de lo calculado. Se podrían aplicar entre otros, 3 métodos de estima:

Producto de solubilidad: Si el producto de la concentración (en mol/L) de Ca^{2+} por la de HPO_4^{2-}(que va a depender del pH de la solución nutritiva (ver figura 4 y tabla 7)) es mayor que 10^{-7}, comenzará a precipitar $CaHPO_4$.

Ábaco de Charpentier: Charpentier (1985) presentó un ábaco de triple entrada donde se presenta de forma gráfica la relación entre las concentraciones que se pueden mantener en solución sin problema de calcio y fosfato en función del pH (Figura 17). Ell pH de la solución nutritiva está en el eje x, la concentración de calcio en meq/L en el eje y y la concentración soluble de P en mmol/L en la familia de curvas.

Se observa que en cultivos hortícolas para mantener en cultivo sin suelo concentraciones estándar de calcio (4 mmol/L=8 meq/L) y de fósforo (1.5 mmol/L), debe mantenerse un pH por debajo de 6.0.

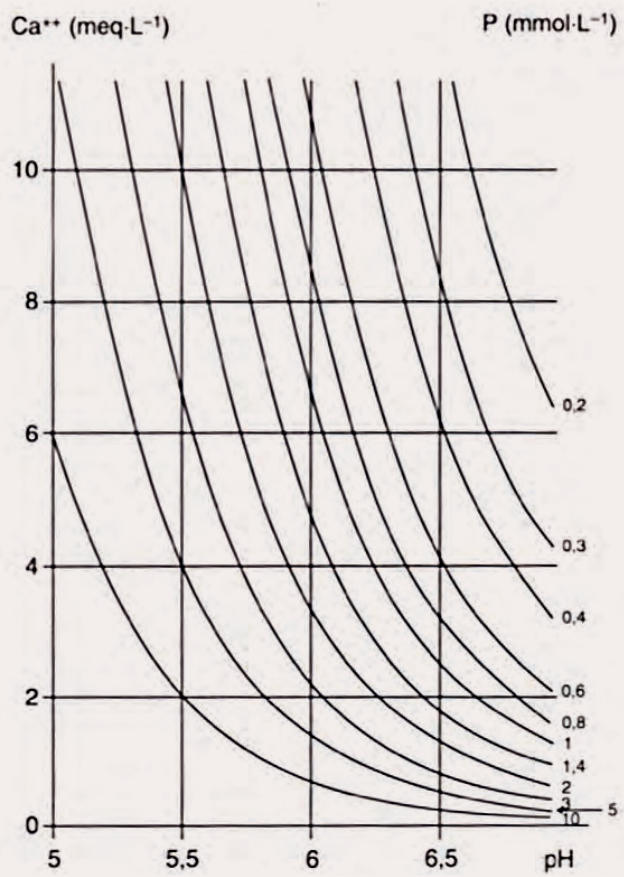


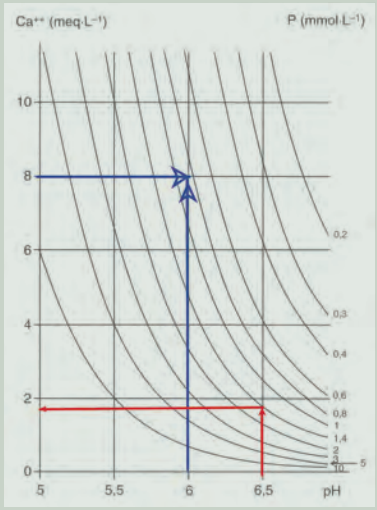
Figura 17: Solubilidad del fosfato en función del pH y de la concentración de calcio (Charpentier, 1985)

Relaciones entre iones: Según Steiner (1988) si el calcio supone más de un 65% de la suma de los iones Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+} o el $H_2PO_4^-$ más del 12.5% de la suma de los aniones SO_4^{2-}, NO_3^- y $H_2PO_4^-$ (todo en meq/L), hay problemas de precipitación de $CaHPO_4$ (ver figura 4). Hay que tener en cuenta que los valores de estas relaciones se calcularon para una CE de 2 dS/m y un pH de 6.5. A pH más altos, el riesgo de precipitación será mayor que el calculado por este método ya que habría una cantidad mayor de HPO_4^{2-} y menor de $H_2PO_4^-$.

Ejemplo 4.5.1: **Determine usando el ábaco de Charpentier, cuánto fosfato queda soluble con 4 mmol/L de calcio. a pH 6.0:**

En primer lugar pasamos la concentración de calcio de mmol/L a meq/ para poder entrar a la gráfica:

4 mmol/L . 2 = 8 meq/L.



En el ábaco el punto para esas concentraciones **está situado entre las curvas de 0.8 y 1.0 mmol/L de fósforo disuelto** (flechas azules).

¿Cuánto calcio soluble puede haber en la solución para mantener 1 mmol/L de fosfato a pH 6.5?.

En el ábaco, subimos una perpendicular a la marca de pH 6.5 y vemos donde se cruza la curva de1 mmol/L. Trazamos una perpendicular al eje de las y para determinar la cantidad de calcio.

En este caso sería aproximadamente de 2.5 meq/L, equivalente a 1.25 mmol/L

Puede pasar que, al estimar la posibilidad de precipitación por varios métodos, ésta de positiva por algunos y negativa por otros. Los métodos están listados de mayor a menor sensibilidad:

- La apreciación de la posible precipitación por el producto de solubilidad puede ser muy restrictiva: sobre todo cuando el producto de las concentraciones de los iones es muy similar al producto de solubilidad.

- El uso de los ábacos de Charpentier, por la experiencia de los autores, es algo restrictivo, aunque menos que la del producto de solubilidad.

- El riesgo de precipitación mediante los ábacos de Steiner, es el menos restrictivo. Normalmente si de positivo, debería recalcularse la solución porque la posibilidad de precipitación es más alta

En el caso de que la estima de precipitación sea positiva por productos de solubilidad y ábacos de riesgo de precipitación de $CaHPO_4$ pero negativa según Steiner, podría ser recomendable un seguimiento, analizando la solución nutritiva en el gotero y haciendo un análisis foliar para contrastar que los niveles de P son correctos.

4.5.2. Estima de la precipitación del sulfato de calcio

El ion sulfato puede precipitar como $CaSO_4$. Esta precipitación no depende del pH y no es frecuente ya que esta sal no es tan insoluble como los fosfatos o carbonatos. En la experiencia de los autores, puede suceder sólo en aguas con muy alta alcalinidad y alto contenido en magnesio, donde se tiene que usar altas cantidades de nitrato de calcio, sulfato potásico y ácido sulfúrico para ajustar las soluciones nutritivas. Se pueden aplicar entre otros, 2 métodos de estima:

Producto de solubilidad: Si el producto de la concentración (en mol/L) de calcio por la de SO_4^{2-}, es mayor que 2.10^{-4}, comenzará a precipitar $CaSO_4$. La apreciación de la posible precipitación por este método puede muy restrictiva, como en el caso del fosfato dicálcico.

Relaciones entre iones: Según Steiner (1988) si el calcio supone más de un 65% de la suma de los iones Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^+ o el SO_4^{2-} más del 45% de la suma de los aniones SO_4^{2-}, NO_3^- y $H_2PO_4^-$ (todo en meq/L), hay problemas de precipitación de sulfato cálcico (ver figura 2). Normalmente el riesgo de precipitación es grave si sale positivo por este método y debería recalcularse la solución.

Ejemplo 4.5.2: **Se desea estimar el riesgo de precipitación de fosfatos y sulfatos de calcio de la solución nutritiva del ejemplo 4.2.8, para un pH de 5.5**.

Resultados 4.2.8	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
totales (mmol/L)	13.30	0.78	1.50	7.00	4.50	2.00	4.40	2.60	3.90	0.50

Fosfato dicálcico:

Producto de solubilidad

A pH 5,5, el 2% del P está como HPO_4^{2-} (Tabla 7): 0.02 . 1.5 mmol/L P = 0,03 mmol/L HPO_4^{2-} = 0.00003 mol/L. La concentración de Ca es 4.5 mmol/L = 0.0045 mol/L

0.0003 . 0.0045 = 0.0000000133 = $1.35. 10^{-7} > 1.10^{-7}$; Hay precipitación, pero en muy pequeña cantidad (los valores son muy similares).

Ábaco de Charpentier

A pH 5.5 y con 9 meq/L de calcio, la cantidad de fosfato que podría permanecer soluble es de 2-3 mmol/L → no hay riesgo de precipitación

Steiner

Cationes					Aniones			
	mmol/L	meq/L	tasa			mmol/L	meq/l	tasa
K^+	7.0	7.0	38.9		NO_3^-	12.5	12.5	57,3
Ca^{2+}	4.5	9,0	50.0		SO_4^{2-}	3.9	7.8	35,8
Mg^{2+}	2.0	2.0	11.1		$H_2PO_4^-$	1.5	1.5	6.9
		18.0	100				21,8	100

Ni el fosfato supone más del 12.5% de los aniones, ni el calcio supone más del 65% de los cationes, por lo que no hay riesgo de precipitación.

El riesgo de precipitación es muy bajo. Sólo el producto de solubilidad indicaría un riesgo muy bajo. Si el pH de la solución nutritiva fuera 6.0 (con un 6% de HPO_4^{2-}), tanto el producto de solubilidad como los ábacos de Charpentier indicarían que está precipitando fosfato de calcio. Sería recomendable un seguimiento.

Sulfato cálcico:

Producto de solubilidad:

La concentración de SO_4^{2-} = 3.9 mmol/L = 0.0039 mol/L.
La concentración de Ca es 4.5 mmol/L = 0.0045 mol/L

$0.0039 . 0.0045 = 0.0000176 = 1.76. 10^{-5} < 2. 10^{-4}$; **no hay precipitación.**

Steiner:

Ni el calcio supone más del 65% de los cationes ni el sulfato más del 45% de los aniones, por lo que no hay riesgo de precipitación.

En ningún método de estima hay riesgo de precipitación

Ejemplo 4.5.3: **Se desea estimar el riesgo de precipitación de $CaHPO_4$ en el segundo equilibrio del ejemplo 4.1.7 considerando despreciable que la concentración de Ca en el agua de riego. Hacer la estimación para pH 6.5 y para pH 7.0.**

Resultados 4.1.7 Fertilizante	Concentración (mg/L)				
	fertilizante	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Ácido nítrico	**12**	2,5			
Ácido fosfórico	**230**		167,9		
Nitrato potasio	**243**	31,6		111,8	
Sulfato amónico	**293**	61,5			
Nitrato calcio	**103**	16,0			27,8

El P aportado es total fue 230 mg/L de ácido fosfórico:

$$\frac{230}{98} = 2.34 \text{ mmol/L fósforo}$$

Se aportó una cantidad de 28 mg/L de CaO:

$$\frac{28}{56.08} = 0.5 \text{ mmol/L } Ca^{2+} = 1 \text{ meq/L } Ca^{2+}$$

En este caso, no podemos utilizar los diagramas de Steiner ya que no conocemos la concentración de magnesio y sulfatos en el agua de riego por lo que tendríamos que utilizar los otros dos métodos de estima:

Producto de solubilidad

A pH, 6.5, el 17% del P está como HPO_4^{2-} (Tabla 7): 0.17 . 2.34 mmol/L P = 0,40 mmol/L HPO_4^{2-} = 0.00040 mol/L.

A pH 7, el 39% del P está como HPO_4^{2-} (Tabla 7): 0.39 . 2.34 mmol/L P = 0,91 mmol/L HPO_4^{2-} = 0.00091 mol/L.

La concentración de Ca es 1 meq/L =0.5 mmol/L = 0.0005 mol/L

pH 6.5: 0,0004 . 0.0002 = 8.0 10^{-8} < 1.10^{-7}; **No hay precipitación.**

pH 7,0: 0.00091 . 0.0002= 0.0000000182 = 1.82. 10^{-7} > 1.10^{-7}; **Hay precipitación**

Ábaco de Charpentier

A pH 6.5 y con 1 meq/L de calcio, podría haber disuelto aproximadamente 2.5 mmol/L de P → **No hay precipitación,**

A pH 7.0 y con 1 meq/L de calcio, la cantidad de fosfato que podría permanecer soluble sería menor a 2 mmol/L (aproximadamente 1.4 mmol/L→ **Hay precipitación**

Podríamos estimar que el equilibrio del ejemplo 4.1.7 (1:1.5:1), sin considerar el calcio del agua, a pH 7,0 tendría un contenido menor de fósforo soluble de lo esperado, mientras que a pH 6.5 podría estar prácticamente todo el fósforo en solución.

Ejemplo 4.5.4: **Se desea estimar el riesgo de precipitación de $CaHPO_4$ del ejemplo anterior, con los valores de análisis de agua que se señalan a continuación y para un pH 6.5 en la solución.**

Ca	0.39 meq/L	NO_3^-	0
Mg	0.44 meq/L	SO_4^{2-}	0.02 meq/L
K	0.13 meq/L	Fosfato	0
Na	1.60 meq/L	Cl^-	0.60 meq/L

Producto de solubilidad

La concentración de P no varía (0.40 mmol/L de HPO_4^{2-}).

La concentración de Ca aportada es 0.5 mmol/L. La concentración total sería 0.5+ 0.195 = 0.695 mmol/L =0.000695 mol/L

pH 6.5: 0,0004 . 0.000695 = 2.78 . 10^{-7} > 1 . 10^{-7}; **Hay precipitación.**

Ábaco de Charpentier

A pH 6.5 y con 2 . 0.695 = 1.39 meq/L de calcio, podría haber disuelto aproximadamente 2 mmol/L de P → **Hay precipitación,**

Steiner

En el ejemplo se aportan, además del Ca (0.5 mmol/L) y del fósforo (2.34 mmol/L), ya calculados antes:

111.8 mg/L de K_2O, que equivaldrían a 111.8/47.1 (tabla 2) = 2.37 mmol/L de K^+

111.6 mg/L N -61.5 (N amoniacal) =50.1 mg/L N nítrico = 50.1/14 (tabla 2) = 3.58 mmol/L NO_3^-

293 mg/L sulfato amónico/132 (M. molecular sulfato amónico) = 2.22 mmol/L SO_4^{2-}

Cationes						Aniones				
Ion	mmol/L		meq/L total	tasa		Ion	mmol/L		meq/l total	tasa
	agua	abono					agua	abono		
K^+	0.13	2.37	2.50	57.9		NO_3^-	0	3.58	3.58	33.2
Ca^{2+}	0.195	0.5	1.78	31.9		SO_4^{2-}	0.01	2.22	4.46	41.4
Mg^{2+}	0.22	0	0.44	10.2		$H_2PO_4^-$	0	2.34*	2.74	25.4
			4.72	100					10.78	100

*: Consideramos valencia 1.17 para pH 6.5

El fosfato supone más del 12.5% de los aniones por lo que **si hay riesgo de precipitación**.

La solución nutritiva da riesgo de precipitación de $CaHPO_4$ por los tres métodos.

CAPÍTULO 5

INCORPORACIÓN DEL ABONO EN EL AGUA DE RIEGO

Hasta ahora, se ha llegado a calcular la cantidad de cada fertilizante que debe aplicarse a la planta para cumplir con la solución nutritiva prescrita. Sin embargo, una de las partes más problemáticas del cálculo es el siguiente paso, cuando hay que tener en cuenta de qué forma se mezclan los fertilizantes con el agua de riego para formar las soluciones nutritivas.

5.1. Sistemas de inyección de fertilizantes

Una vez definida la cantidad de cada fertilizante que se va a aportar a la solución nutritiva, se debe ver como se mezclan. Normalmente, salvo en instalaciones muy pequeñas, se recurre al uso de soluciones bastante concentradas (**soluciones madre**) colocadas en diversos tanques que son inyectadas mediante venturis, inyectores hidráulicos y eléctricos de diverso tipo (figura 18) a la conducción de agua de forma que se alcancen las concentraciones deseadas de cada elemento.

En función de la complejidad del sistema de fertirrigación, se puede usar una sola inyección (cabeza de inyección) desde un tanque de solución madre o bien varias inyecciones en paralelo desde distintas soluciones madre. Los sistemas más antiguos de regulación manual son en su gran mayoría de una sola cabeza de inyección.

El sistema con varias cabezas de inyección permite el uso simultáneo de abonos que serían incompatibles en una sola solución madre o la formulación de varias soluciones nutritivas simplemente cambiando la inyección sin tener que volver a hacer soluciones madre (ver apartado 6.1).



Figura 18: Sistemas de inyección con control manual: Arriba: de izquierda a derecha: abonadora, venturi e inyector hidráulico. Abajo: Bomba de inyección simple y bomba de inyección con 2 cabezas. (Figura 18 inyector hidráulico: Tomás Suárez Encinoso).

La forma más sencilla de determinar el volumen de solución madre a inyectar (y monitorizar si el sistema funciona correctamente) es utilizar la CE de la solución que se desea conseguir, o CE consigna. Debe haber un medio de regular la inyección para lograr esa CE consigna. Se puede realizar esta regulación de forma manual en instalaciones sencillas y pequeñas o se puede automatizar la regulación, siendo la forma más extendida el uso de una sonda de CE que alimenta un sistema de control de la inyección para alcanzar la consigna. En estos sistemas suele haber un sistema similar paralelo con una sonda de pH para automatizar la adición de ácidos.

El sistema más utilizado de regulación en esos automatismos se basa en la apertura controlada de una pequeña electroválvula de tres vías que permite la inyección de la solución madre. A mayor tiempo de apertura de la electroválvula,

mayor aporte de solución madre, lo que supone un aumento de la CE. La solución madre se aspira mediante venturis o pequeñas bombas eléctricas (resistentes a agentes químicos) que funcionan en continuo. La electroválvula comanda si la solución madre vuelve al tanque (retorno) o se inyecta al agua de riego. En función de la CE consigna, el sistema inyectará con mayor o menor velocidad.

El sistema de inyección suele estar en paralelo o "by pass" de la conducción principal, sobre todo en instalaciones que manejan un caudal grande. En la figura 19 se presenta un esquema sencillo con tres cabezas inyectoras (dos tanques de abono comandados por la sonda de CE y uno de ácido, comandado por la sonda de pH). En la figura 20 y 21 se presentan detalles de sistemas de inyección.

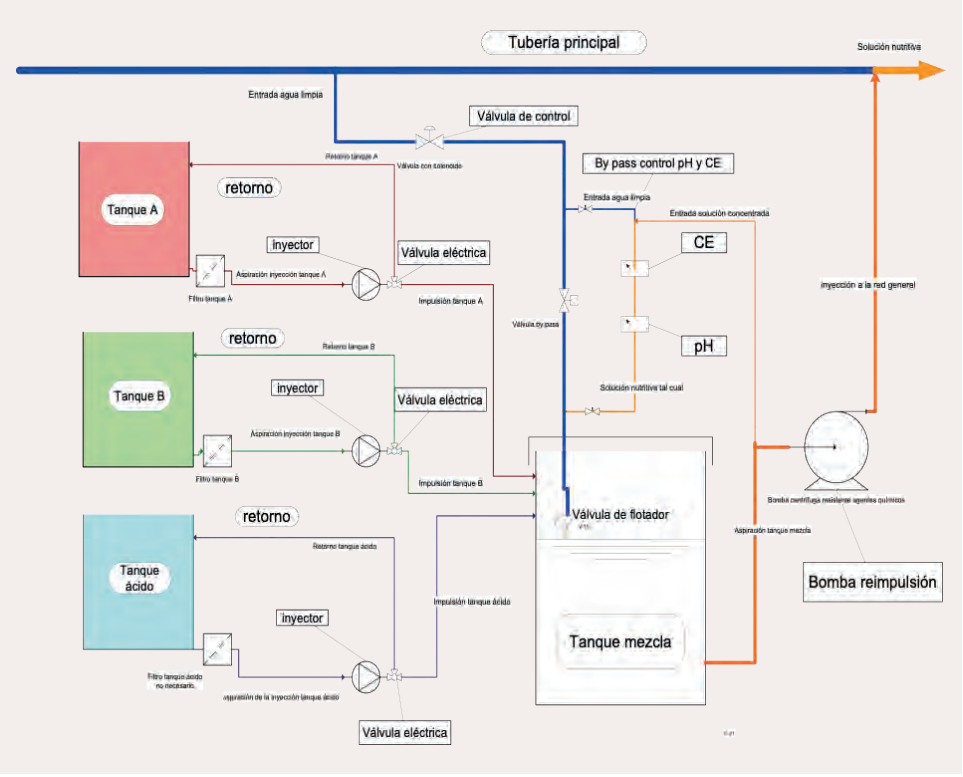


Figura 19: Esquema de un sistema de inyección de abonos con 3 tanques y 3 cabezas inyectoras (2 para fertilizantes y 1 para ácido).

En algunos casos, hay automatismos de riego que permiten inyectar no sólo por una CE absoluta de consigna, sino por un aumento de conductividad determinado, lo que permite mantener las concentraciones de abono aunque cambie la calidad del agua de riego. Este sistema presenta el riesgo de que la CE de la solución sea muy alta para el cultivo cuando la salinidad del agua de riego aumente de forma significativa. Sin embargo, tanto en este tipo de inyección, como en la de CE de consigna absoluta, muchos automatismos tienen sistemas de alarma que suspenden la inyección y pueden mandar avisos de fallo al móvil de la persona encargada de la fertirrigación.





Figura 20: Baterías de electroválvulas de automatismos de riegos





Figura 21: Derecha: Cabezal con 4 cabezas de inyección (bombas de arrastre magnético) y tanque de mezcla. Izquierda: Cabezal con 4 cabezas de inyección (venturis) sin tanque de mezcla.

Otro sistema de inyección utilizado es puramente volumétrico, basándose en la inyección de una cantidad conocida de solución madre. Esto se puede hacer mediante contadores de precisión (figura 22), aunque puede haber un pequeño error por el flujo intermitente) o bombas dosificadoras de pistón o de membrana. El funcionamiento de las bombas inyectoras se basa en el conocimiento de la cilindrada. Sabiendo el número de inyecciones y la cilindrada se conoce la cantidad inyectada. Por otra parte, un contador de precisión controla el caudal de riego en la tubería principal. El automatismo controla el número de inyecciones para alcanzar la proporción deseada. En estos sistemas se suele colocar una sonda de CE como sistema de control y de seguridad en caso de fallos.



Figura 22: Contador de precisión en cabezal con inyección volumétrica

Los sistemas de inyección volumétricos serían más adecuados que los que trabajan por CE cuando se usan fertilizantes que no tienen un aporte salino significativo, como la urea o muchos fertilizantes orgánicos líquidos. En cabezales de cierto tamaño en explotaciones en cultivo sin suelo también es frecuente que los microelementos se inyecten de forma volumétrica.

En cualquier caso, la inyección puede realizarse directamente a la conducción o a un tanque de mezcla. El tanque de mezcla tiene dos funciones:

- Ayuda a una buena homogeneización de la solución nutritiva. Esta homogeneización puede lograrse también colocando un elemento mezclador aguas abajo de la inyección y si el sistema está en paralelo, poniendo la reimpulsión aguas arriba de la entrada al bypass.

- Permite que el CO_2 disuelto en agua producto de la acidificación pase a la atmósfera (ver apartado 2.4.3.). Por esta razón, los tanques de mezcla son especialmente importantes en el caso de aguas con una alcalinidad moderada o alta.

Se considera que el volumen óptimo de un tanque de mezcla está entre 100 y 150 litros. Cuanto menor sea el volumen, menor efecto estará haciendo el tanque de mezcla.



Figura 23: Tanque de mezcla en un cabezal. Derecha. Detalle del interior del tanque con la inyección en funcionamiento

5.2 Cálculo de las cantidades de abono a utilizar.

Para el cálculo de los aportes de abono en un sistema de inyección de fertilizante, se podría utilizar un método, que llamaremos "Relación de Concentración". El cálculo de los abonos a aportar es bastante sencillo, ya que se establece de forma arbitraria una relación de concentración del sistema (la relación entre la concentración en los tanques de solución madre y en la solución nutritiva) y el volumen de cada tanque. La concentración en la solución madre sería:

Concentración en solución nutritiva.
Relación de concentración = Concentración en solución madre

Este parámetro no tiene relación directa con las relaciones de inyección en un sistema volumétrico, que comandaría los volúmenes exactos de soluciones de madre para obtener las concentraciones finales deseadas. La concentración final de la solución nutritiva se regula por el automatismo (o de forma manual), bien de forma volumétrica o mediante una sonda de CE.

La relación de inyección suele establecerse entre 1:50 y 1:200 y suele depender de:

- La concentración máxima de los fertilizantes que se disuelvan en el tanque de solución madre. Además del valor de solubilidad, no es recomendable concentrar demasiado la solución madre porque pueden producirse interacciones (efecto del ion común) que hagan precipitar algunas sales, aunque teóricamente no alcancen su solubilidad máxima, cuyos valores vienen en la tabla 17. (apartado 6.2)

- La duración estimada de las soluciones madre. Desde el punto de vista de logística del cabezal, debe transcurrir un periodo mínimo (y máximo) de tiempo entre dos cargas sucesivas. Si los tanques se consumen muy rápido, probablemente la concentración de las soluciones madres es muy baja. La duración estimada también dependerá del volumen de los tanques de solución madre (apartado 6.3).

Ejemplo 5.2.1: **Al calcular una solución nutritiva nos resultan los valores de fertilizantes de la tabla que se adjunta. Se quiere concentrar 100 veces en los tanques de 1000 litros:**

Abono	"$Ca(NO_3)_2$"	H_3PO_4 (1)	KNO_3	HNO_3 (2)	K_2SO_4	H_2SO_4 (3)
mmol/l	4.35	1.50	0.59	2.35	2.56	3.12

1: riqueza 75%; densidad 1.6 g/cm^3 | 2: riqueza 60%; densidad 1.3 g/cm^3
3: riqueza 98%; densidad 1.8 g/cm3

Para el cálculo de abonos sólidos, el procedimiento es directo. En el caso del nitrato de calcio sería:

940 g/m^3 (en la solución nutritiva) . 100 veces = 94000 g/m^3 = 94 kg/m^3 (en la solución madre).

Para el cálculo de los ácidos, hay que conocer en cuenta la riqueza en ácido y la densidad. En el caso del ácido fosfórico:

$$\frac{147\frac{mg}{L}\text{ácido puro}}{0{,}75\text{ (riqueza ácido)}} = 196\text{ mg/L ácido comercial.}$$

$$\frac{196\frac{mg}{L}\text{ácido puro}}{1{,}6\text{ (densidad ácido)}} = 123\text{ cm}^3\text{ ácido comercial/L en la solución nutritiva.}$$

123 cm^3/L (en la s. nutritiva) . 100 = 12300 cm^3/L = 12.3 L/m^3 (en la solución madre).

En el caso del ácido nítrico:

$$\frac{148\frac{mg}{L}\text{ácido puro}}{0{,}6\text{ (riqueza ácido)}} = 247\text{ mg ácido comercial / L en la s.n.}$$

$$\frac{247\frac{mg}{L}\text{ácido puro}}{1.3\text{ (densidad ácido)}} = 190\text{ cm}^3\text{ ácido comercial / L en la s.n.}$$

Realizando el cálculo con todos los abonos de la solución nutritiva, llegaría a estos resultados (se ha ajustado redondeando los decimales):

Abono	Solución Nutritiva			relación de concentración	Solución madre	
	mmol/L	mg/L = g/m^3	cm^3/L p. comercial		kg/1000 L	L/1000 L
"$Ca(NO_3)_2$"	4.35	940		1:100	94	
H_3PO4 (1)	1.50	147 (puro)	123			12
KNO_3	0.59	60			6	
HNO_3 (2)	2.35	148 (puro)	190			19
K_2SO_4	2.56	446			45	
H_2SO_4 (3)	3.12	306 (puro)				18

1: riqueza 75%; densidad 1.6 g/cm3 | 2: riqueza 60%; densidad 1.3 g/cm^3
3: riqueza 98%; densidad 1.8 g/cm^3

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

En el caso de los microelementos, se trabajaría de la misma forma, concentrado *n* veces las cantidades de fertilizantes en las soluciones madre previamente obtenidas en el cálculo de la solución nutritiva. A la hora de determinar la relación de inyección de los microelementos hay que tener en cuenta si van en un tanque propio (en ese caso podemos establecer la relación que consideremos oportuna) o junto con otros abonos, en cuyo caso la relación tiene que ser la del tanque donde se coloquen.

Ejemplo 5.2.2: **Calcular la concentración en solución madre de las soluciones calculadas de microelementos de los ejemplos 4.3.1 y 4.3.2, considerando una relación de inyección de 1:100.**

Con las cantidades de abono obtenidas en el ejemplo 4.3.1, calcularíamos las cantidades a aplicar de la misma forma que en el ejercicio anterior. En el caso del quelato de hierro sería:

9.2 g/m^3 en la solución nutritiva . 100 = 920 g/m^3 en la solución madre.

Se haría el mismo proceso con el resto de sales. En el caso que hubiera algún producto líquido habría que realizar las mismas operaciones que con los ácidos, conociendo la riqueza en nutriente y la densidad.

Abono	Solución Nutritiva	relación de concentración	Solución madre
	mg/L = g/m^3		g/1000 L
Quelato Fe	9.2	1:100	**920**
Sulfato Mn	1.7		**170**
Sulfato Cu	0.12		**12**
Sulfato Zn	1.09		**109**
Bórax	2.0		**200**
Heptamolibdato Na	0.12		**12**

Para tanques de 1000 L, necesitaríamos una pesa con una precisión mínima de 0.5 o 1.0 gramos en este caso, ya que hay que hacer 2 mediciones de 12 gramos para el cobre y el molibdeno. Por otra parte, como se comentó en el ejemplo, habría que hacer 6 pesadas.

Para el ejemplo 4.3.2, con la aplicación del combinado, la dosis de aplicación en solución nutritiva sería 10 g/m^3.

En la la solución madre tendríamos:
10 g/m^3 . 100 =1000 gramos/1000 L = **1 kg/1000L.**

En este caso, la pesa necesitaría menos precisión, además de tener que hacer sólo una pesada.

En la tabla 15 viene una regla sencilla, basada en los cálculos del ejemplo 5.2.1, para pasar de mmol/L en solución nutritica a kg/m^3 (o L/m^3) en solución madre concentrada de 50 a 200 veces. En el caso de los ácidos, el valor varía en función de la concentración y la densidad del producto comercial empleado, por lo que se indican en la tabla los utilizados para el cálculo.

Tabla 15: Cantidades de abono para confeccionar soluciones madre X veces concentradas

Fertilizante	valor para multiplicar mmol/L y obtener una solución concentrada:								
	1:50		1:100		1:150		1:200		Unidad
Ácido nítrico (60%, 1.34 g/cm^3)	x	3.92	x	7.84	x	11.75	x	15.67	L/m^3
Ácido fosfórico (75%, 1.57 g/cm^3)	x	4.16	x	8.32	x	12.48	x	16.64	L/m^3
Ácido sulfúrico (97%, 1.84 g/cm^3)	x	2.75	x	5.49	x	8.24	x	10.98	L/m^3
Nitrato cálcico	x	10.80	x	21.60	x	32.40	x	43.20	kg/m^3
Nitrato potásico	x	5.05	x	10.10	x	15.15	x	20.20	kg/m^3
Nitrato amónico	x	4.00	x	8.00	x	12.00	x	16.00	kg/m^3
Nitrato de magnesio	x	12.80	x	25.60	x	38.40	x	51.20	kg/m^3
Fosfato monopotásico	x	6.8	x	13.60	x	20.40	x	27.20	kg/m^3
Fosfato monoamónico	x	5.75	x	11.50	x	17.25	x	23.00	kg/m^3
Sulfato potásico	x	8.70	x	17.40	x	26.10	x	34.80	kg/m^3
Sulfato amónico	x	6.60	x	13.20	x	19.80	x	26.40	kg/m^3
Sulfato de magnesio	x	12.3	x	24.60	x	36.90	x	49.20	kg/m^3
Cloruro potásico	x	3.73	x	7.46	x	11.19	x	14.92	kg/m^3
Cloruro cálcico	x	7.35	x	14.70	x	22.05	x	29.40	kg/m^3

Los controladores de fertirrigación pueden permitir que la relación de inyección de cada uno de los tanques de solución madre sea diferente. Esto permite componer diferentes soluciones nutritivas a partir de unas mismas concentraciones de las soluciones madre. En muchos automatismos, se maneja la inyección de los tanques mediante porcentajes o similares. Por ejemplo, en un sistema con

3 tanques, si se dice que un sistema está inyectando un 30% del tanque A, un 20% del tanque B y 50% del tanque C, se puede interpretar que por cada litro que entra al tanque de mezcla, 300 cm^3 son del A, 200 cm^3 del B y 500 cm^3 del C.

Sin embargo, suele recomendarse, sobre todo en cultivo sin suelo, que la inyección de los tanques sea la misma, de forma que bajen todos al mismo ritmo. En el caso que se observe de forma visual que esto no es así sería una indicación muy sencilla que están habiendo problemas en el automatismo (filtros de los tanques obturados, problemas en las bombas o en las electroválvulas, errores en el llenado de los tanques, etc.). Sin embargo, este sistema de control visuales factible normalmente cuando solo se usa una única solución nutritiva.



Figura 24: Pesa para microelementos

Debe tenerse en cuenta cómo se van a medir las cantidades en las explotaciones, sabiendo que tipo de balanza se va a disponer en la explotación (Fig. 24). Puede ser interesante para evitar errores de pesada optar por trabajar con múltiplos de sacos de 25 kg. En el caso de los ácidos, por seguridad y evitar la manipulación excesiva, puede ser conveniente también trabajar con múltiplos de envases, salvo que se usen ácidos a granel.

Al ir buscando estos valores se puede optar por recalcular los porcentajes de inyección (si el automatismo lo permite) o recalcular la solución con las cantidades redondeadas y tomar la decisión de si son o no agronómicamente admisibles. El recálculo puede ser muy importante si hay ácidos en los tanques ya que el pH final puede variar de forma significativa. Un aporte adicional puede neutralizar los 0.5 mmol/L de alcalinidad que tamponan la solución nutritiva.

Ejemplo 5.2.3: **Se van a recalcular los porcentajes de inyección para poner múltiplos de envases de abono del ejemplo 5.2.1, suponiendo que tenemos 3 tanques + 1 de ácido comandado por sonda de pH y obviando el aporte de KNO_3, por su poca cantidad. Colocaremos el ácido sulfúrico en el tanque de ácido, comandado por la sonda de pH.**

Como el tanque de ácido está comandado por una sonda de pH podemos poner una cantidad discrecional de ácido sulfúrico (teniendo en cuenta las consideraciones del apartado VI), como por ejemplo un bidón de 25 litros. En los otros tanques pondremos, el sulfato potásico, el ácido fosfórico y el nitrato de calcio con el ácido nítrico (ver apartado VI).

Para el tanque del potasio, necesitamos tener 446 g/m^3 en la solución. Si redondeamos a 50 kg en la solución madre, la concentración en el tanque sería de 50 kg/m^3 = 50000 g/m^3. la relación de inyección sería:

$$\frac{50000}{446} = 112.$$ La relación sería 1:112.

Para el tanque del ácido fosfórico, necesitamos tener 147 g/m^3 en la solución, o 122.5 cm^3 de ácido comercial /m^3. Si redondeamos a 25 litros (25000 cm^3/m^3) y queremos tener en solución 122.5 cm^3:

$$\frac{25000}{122.5} = 204.$$ La relación sería 1:204.

En el caso del tercer tanque, hay dos abonos (nitrato de calcio y ácido nítrico) por lo que se puede complicar el cálculo.

Si ajustamos por el ácido nítrico, volvemos a redondear a 25 litros (25000 cm^3/m^3), y sabiendo que necesitamos 190 cm^3/L en la solución nutritiva, tendríamos:

$$\frac{25000}{190} = 132.$$ La relación sería 1:132.

Si ajustamos para el nitrato de calcio, redondeando a 100 kg (100000 g/m^3):

$\frac{100000}{940}$ = 106. La relación sería 1:106.

¿Qué relación elegimos?. Vemos que pasa en los 2 casos:

Usando una relación 1:132:
Ácido nítrico: 190 cm^3/m^3 . 132 = 25080 cm^3/m^3 = 25 L/m^3 en la solución madre, como habíamos calculado.
Nitrato de calcio: 940 g/m^3 . 132 = 124080 g/m^3 = 124 kg/m^3 en la solución madre. Esto es prácticamente 125 kg/1000L (5 sacos de 25 kg).

Usando una relación 1:106:
Nitrato de calcio: 940 g/m^3 . 106 = 99640 g/m^3 = 100 kg/m^3 en la solución madre, como lo calculado.
Ácido nítrico: 190 cm^3/m^3 . 106 = 38266 cm^3/m^3 = 38.3 L/m^3 en la solución madre.

En este caso, usaríamos la relación 1:132 del ácido nítrico. Estaríamos poniendo 1 kg/m^3 más de nitrato de calcio en la solución madre respecto al necesario para la solución nutritiva (equivalente a 0.03 mmol/L de Ca en la solución nutritiva) y seguiríamos teniendo múltiplos de envases en los tanques.

Tendríamos entonces, los siguientes aportes en solución madre:

Tanque		Cantidad (kg o L / 1000 L)	Relación de concentración g/m^3	Aporte de abono	
				mg/L	mmol/L
A	Nitrato calcio Ácido nítrico	125 25	1:132	947 148	4.38 2.35
B	Ácido fosfórico	25	1:204	147	1.50
C	Sulfato potásico	50	1:112	450	2.59

Como se comentó arriba, se recalculan los aportes:

mmol/L		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
"$Ca(NO_3)_2$"	4.38	9.64	0.88			4.38					
H_3PO_4	1.50			1.50							-1.50
HNO_3	2.35	2.35									-2.35
K_2SO_4	2.59				5.18					2.59	
aporte real		11.99	0.88	1.5		4.38				2.59	-3.85

Si comparamos los aportes antes y después del recálculo tendríamos:

Aportes	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	SO_4^- (*)	H_3O^+ (*)
Solución inicial	11.92	0.87	1.5	5.71	4.35	2.56	3.85
Solución final	11.99	0.88	1.5	5.18	4.38	2.59	3.85

*: Aportes sin tener en cuenta el H_2SO_4 del tanque del ácido.

Al hacer el recálculo, las concentraciones de nitratos, fosfatos calcio y sulfatos son similares salvo en el potasio (donde bajamos de 5.7 a 5.2 mmol/L al no aplicar nitrato potásico) y la ligera subida de nitratos y de calcio.

El aporte de ácidos no ha cambiado por lo que no serían de esperar cambios de pH respecto a lo previsto.

Si el automatismo trabajara en proporciones, las calcularíamos sumando las inyecciones de los 3 tanques:

132 (tanque A) + 204 (tanque B) + 112 (tanque C) = 448

Dividiendo las relaciones entre la suma, obtendríamos las proporciones:

29.4% tanque A; 45.5% tanque B; 25.0% tanque C

5.2.1. Preparación de soluciones madre para sistemas con una sola cabeza inyectora.

Las instalaciones con una sola cabeza inyectora son perfectamente viables en explotaciones con un solo cultivo, en suelo, donde no es necesario aportar todos los nutrientes en todos los riegos y donde la solución nutritiva en un momento dado es la misma.

En algunos casos, las aguas con alta alcalinidad (más de 10-15 meq/L) no permiten de forma económica la aplicación conjunta de fósforo y calcio ya que el pH de la solución nutritiva tiene que estar en unos valores bastante precisos para que no haya precipitaciones (ver apartado 4.5.1). Esto hace que se tenga que trabajar a efectos prácticos con una sola cabeza inyectora.

Aunque existe la posibilidad de aportar abonos incompatibles en un mismo riego con una sola cabeza inyectora, aplicándolos de forma secuencial, normalmente se trabaja con un esquema donde se va aplican abonos incompatibles entre sí en riegos diferentes. Se puede aplicar el calcio un día y los fosfatos y sulfatos en el siguiente, o realizarlo de forma semanal, donde se aplica en un solo día el calcio, mientras que en el resto de riegos semanales se añaden el resto de fertilizantes. En algunos cultivos sensibles a la carencia de calcio en determinados momentos, puede que este procedimiento pueda ser más recomendable a la inversa, con varias aplicaciones de calcio semanales y una sola con abonos que aporten fósforo o sulfatos.

El cálculo de concentraciones y equilibrios debe hacerse teniendo en cuenta el periodo en que se completa la adición de nutrientes: si el esquema es semanal, hay que calcular los aportes de nutrientes para lograr la concentración final y el equilibrio deseado en la suma de los riegos de ese periodo. Luego, se asignan en cada día de riego, los abonos que se van a aportar, procurando que la CE de cada riego no supere la marcada como consigna.

Ejemplo 5.2.4: **Se va a formular la solución nutritiva del ejemplo 4.1.8 en una finca con una sola cabeza inyectora en el cabezal y un esquema semanal de 3 riegos/semana**.

Una programación normal en Canarias para no aplicar calcio y fósforo en el mismo día sería usar el nitrato de calcio un solo día y el resto de fertilizantes en el resto de riegos. Para el cálculo se supone una dosis de riego en esa semana de 60 L/planta y semana.

La cantidad aplicada semanal sería la concentración por la dosis de riego:

Nitrato de calcio 22 mg/L . 60 L/planta.semana = 1320 mg/planta.semana
Fosfato monoamónico: 26 mg/L . 60 L/planta.semana = 1560 mg/planta.semana.
Nitrato de potasio: 114 mg/L . 60 L/planta.semana = 6840 mg/planta.semana.
Nitrato amónico: 89 mg/L . 60 L/planta.semana = 5340 mg/planta.semana.

Esta cantidad semanal se reparte entre los 3 riegos semanales:

Nitrato de calcio: 1320 mg/planta.semana / 1 riego: 1320 mg/planta.riego.
Fosfato monoamónico: 1560 mg/planta.semana / 2 riegos = 780 mg/planta.riego.
Nitrato de potasio: 6840 mg/planta.semana / 2 riegos = 3420 mg/planta.riego.
Nitrato amónico: 5340 mg/planta.semana / 2 riegos = 2670 mg/planta.riego

Abono	Concen-tración mg/L	Cantidad aplicada semanal mg/planta	Nº riegos	Cantidad aplicada riego		
				mg/ planta	g/ planta	mg/ L
Nitrato de calcio	**22**	1320	1	1320	1.32	66
F. monoamónico	**26**	1560	2	780	0.78	39
Nitrato de potasio	**114**	6840	2	3420	3.42	171
Nitrato amónico	**89**	5340	2	2670	2.67	134

Se calcula la concentración de abono en cada riego, que sería la que se había calculado inicialmente pero corregida por el número de riegos en las que tiene que repartirse. En el caso del nitrato cálcico se tiene que aportar toda la concentración de la semana en uno de los 3 riegos, habría que multiplicarla por 3. En el caso del resto de abonos, se aplicarían en 2 de los 3 riegos, por los que habría que multiplicarlos por 3/2. En la tabla estarían en la columna "cantidad aplicada riego".

Se observa que el valor consigna establecido (250 mg/L) se supera los lunes y los miércoles, yendo a 334 mg/L, mientras que el sábado se aplica sólo 66 mg/L. Esto se puede dar por bueno o aplicar parte del nitrato amónico o del potásico en el riego del sábado para compensar las concentraciones entre riegos.

Si se quiere dar la abonada en gramos por planta y riego (otra opción es dar la abonada por cada unidad operacional de riego, si se sabe la cantidad de plantas que hay) sería cuestión de ajustar las cantidades de abono a valores algo más sencillos, siendo recomendable realizar un recálculo para comprobar que el equilibrio y la concentración de abono no cambia de forma significativa.

En la tabla siguiente se realiza un ajuste de las cantidades para dar una recomendación en g/planta.semana, bajando ligeramente todas las concentraciones (salvo la de nitrato potásico) y se hace el recálculo para comprobar los posibles cambios en las condiciones de la solución:

Fertilizante	Dosis abono (g/planta y semana)			N	P2O5	K2O	CaO
	Ajuste (g/planta.riego)	Nº riegos	g/planta. semana				
Nitrato de calcio	1.32 → **1,0**	1	1.0	0,16			0,27
F. monoamónico	0.78 → **0.75**	2	1.5	0,18	0,9		
Nitrato de potasio	3.42 → **3.5**	2	7.0	0,91		3,22	
Nitrato amónico	2.6 → **2.5**	2	5.0	1,72			
Totales		3	14.5	2,97	0.9	3,22	0,27
Equilibrio				1	0.3	1,1	0,1

Al dividir la cantidad de abono total entre la dosis de riego, resulta una concentración de 241 mg/L.

Por lo tanto nos resulta un equilibrio ligeramente más rico en potasio (1:0,3:1,1 frente a 1:0,3:1) y algo más bajo en CE. Esto se puede dar por bueno o volver a tantear las cantidades de abono para que den números sencillos.

En ambos casos, se está asumiendo que no se va a cambiar la dosis de riego, lo cual puede ser un riesgo, sobre todo cuando se tratan de fórmulas que se van a usar durante varios meses, donde la demanda del cultivo puede variar de forma significativa. Esto puede ser peligroso sobre todo si la demanda baja ya que se pueden alcanzar CE peligrosamente altas.

Una opción, sabiendo el caudal y número de emisores por planta, sería proporcionar una tabla donde se indique la dosis de abono en función del tiempo de riego.

Si la planta tiene 4 emisores de 4 L/h, lo que daría 16 L/h.planta: Calculamos la concentración en g/L en cada riego, que resulta de la hipótesis anterior, con 20 L/riego y se multiplicaría esa concentración por la dotación de agua correspondiente a cada tiempo de riego;

Para el nitrato potásico: 3.5 g/20L = 0.175 g/L
Si teníamos un caudal de 16 L/h.planta, al pasar L/h a L/minuto, serían 0.267 L/minuto.planta.
Si queremos saber el nitrato potásico que hace falta para un riego de 45 minutos:
0.175 . 0. 267 . 45 = 2.1 g/planta y riego.

Podríamos construir una tabla como la siguiente:

Tiempo de riego	Nitrato cálcico	Nitrato potásico	Nitrato amónico	Fosfato monoamónico
	Cantidad de abono por riego (gramos por planta)			
.....	....	....	....	....
1 hora 10 minutos	0,93	3,27	2,33	0,70
1 hora 15 minutos	1.0	3.50	2.50	0.75
1 hora 20 minutos	1,07	3,73	2,67	0,80
....	....	....	....	....

Como se dijo al principio, **la elección de la forma de transmitir la abonada tiene que ser entendible y aplicable por la persona que finalmente realice la fertirrigación.**

Si se dispone de una abonadora o de un venturi trabajando con distintas posturas por cada unidad operacional de riego. Supongamos que las unidades operacionales de riego tengan 500 plantas:

	Fertilizante	**Dosis g/planta.riego**	**g a disolver en abonadora o tanque del venturi**
Riego del calcio	nitrato de calcio	1,0	500
Resto de riegos	fosfato monoamónico	0,75	375
	nitrato potásico	3,5	1750
	nitrato amónico	2,5	1250

Si se dispone de un sistema con automatismo de control y tanques de soluciones madre pero se decida que solo se va a utilizar una cabeza inyectora. En este caso, se tendría que calcular la CE para cada riego, para saber las consignas. En el caso anterior, como se vio:

Riego del nitrato cálcico: 66 mg/L que correspondería a un aumento de la CE de 77 µS/cm, inyectando solo del tanque del nitrato de calcio. Este aumento de CE es bajo y puede que haya problemas para alcanzarlo en el automatismo. Podría ponerse algo del nitrato potásico o amónico en ese riego.

Riegos con el resto de abonos: 343 mg/L, correspondientes a un aumento de la CE de 403 µS/cm y trabajando con el o los tanques que tengan los fertilizantes correspondientes.

Los abonos en los tanques se concentrarían a partir de las concentraciones anteriores usando la relación de inyección.

5.2.2. Preparación de soluciones madre para formular distintas soluciones nutritivas en un mismo automatismo.

En algunos casos, normalmente cuando se pretende formular con el mismo sistema de fertirriego diferentes soluciones nutritivas, se parte de una cantidad fija de abonos en cada solución madre y se cambian los porcentajes de inyección para formular cada una. Este suele ser un caso más frecuente en explotaciones en cultivo en suelo que cuando se trabaja con sustratos. También es uno de los casos donde más justificado está el uso de sistemas de control de la fertirrigación con varias cabezas inyectoras.

Una forma de calcular diferentes soluciones nutritivas sería mediante un método de tanteo, partiendo unas cantidades fijas de soluciones madre y cambiando los porcentajes de inyección. Como en el caso del cálculo directo de soluciones nutritivas, el cálculo se facilita utilizando una hoja de cálculo.

Ejemplo 5.2.5: **En un cabezal tenemos un sistema con 3 tanques de 1000 litros con las siguientes cantidades de abono:**

Tanque A: (calcio): 100 kg de nitrato de calcio y 25 L de ácido nítrico (12%N; densidad 1.3 g/cm^3).
Tanque B (fósforo): 75 kg de fosfato monoamónico.
Tanque C (potasio): 100 kg de nitrato de potasio.
Con estas soluciones madre se pretende manejar un cultivo en suelo de tomate con 3 equilibrios: 1:2:1; 1:1:1 y 1:0.5:2.

Para comenzar el tanteo, elegiríamos unos porcentajes de inyección, por ejemplo, basándonos en los equilibrios: 25% tanque A, 50% tanque B y 25% tanque C. Esto sería equivalente a por cada litro inyectado, corresponderían 250 cm^3 del tanque A, 500 cm^3 del tanque B y 250 cm^3 del C.

Se determinan las cantidades de nutriente que se inyectan, multiplicando la cantidad de abono por la riqueza por la inyección en tanto por uno.

En el tanque A, tendríamos que el nitrato de calcio aporta:
100 kg abono . 0.155 (tanto por uno riqueza en N) . 0.25 (tanto por uno inyección) = **3.9 kg de N**
100 kg abono . 0.27 (tanto por uno riqueza en CaO) . 0.25 (tanto por uno inyección) = **6.8 g/L de CaO.**

Para el ácido nítrico, primero tendremos que pasar de volumen a peso con la densidad :
25 L ácido . 1.3 kg/L (densidad ácido) = 32.5 kg ácido comercial.
32.5 kg abono . 0.12 (tanto por uno riqueza en N) . 0.25 (tanto por uno inyección) = **1.0 g/L de N**.

Si hacemos este cálculo con el resto de tanques, llegaríamos a unas cantidades de nutrientes y al siguiente equilibrio:

Fertilizante	Cantidad	% Inyección		Concentración (g/L inyectado)			
				N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	100	**Tanque A**	**25**	3.9			6.8
ácido nítrico	25			1.0			
fosfato monoamónico	75	**Tanque B**	**50**	4.5	23		
nitrato de potasio	100	**Tanque C**	**25**	3.3		12	
				13	23	12	7
Equilibrio				**1**	**1.8**	**0.9**	**0.5**

Con las inyecciones del tanteo, el equilibrio queda corto de fósforo y en menor medida de potasio. Volvemos a hacer un tanteo subiendo la inyección del tanque B y C y bajando consiguientemente la del A (que aporta más nitrógeno):

Fertilizante	Cantidad	% Inyección		Concentración (g/L inyectado)			
				N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	100	Tanque A	**20**	3.1			5.4
ácido nítrico	25			0,8			
fosfato monoamónico	75	Tanque B	**60**	5.4	27,0		
nitrato de potasio	100	Tanque C	**30**	3.9		13.8	
				13.2	27,0	13,8	5,4
Equilibrio				**1**	**2.0**	**1,0**	**0.4**

Podríamos dar por bueno el equilibrio, sabiendo que habría que inyectar el 20% del tanque A, el 60% del tanque B y el 30% del tanque C. Habría además que poner en el programador la CE y, en su caso, el pH de consigna.

Haciendo el mismo proceso de tanteo, ajustaríamos también el equilibrio 1:1:1 y el 1:0.5:2.

Fertilizante	Cantidad	% Inyección		Concentración (g/L inyectado)			
				N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	100	Tanque A	**39**	6.0			10.5
ácido nítrico	25			1.5			
fosfato monoamónico	75	Tanque B	**31**	2.8	14.0		
nitrato de potasio	100	Tanque C	**30**	3.9		13.8	
				14.3	14.0	13.8	10.5
Equilibrio				**1**	**1.0**	**1.0**	**0.7**

Para el equilibrio 1:1:1, habría que inyectar el 39% del tanque A, el 31% del tanque B y el 30% del tanque C

Fertilizante	Cantidad	% Inyección		Concentración (g/L inyectado)			
				N	P_2O_5	K_2O	CaO
nitrato de calcio	100	Tanque A	**25**	3.9			6.8
ácido nítrico	25			1.0			
fosfato monoamónico	75	Tanque B	**15**	1.4	6.8		
nitrato de potasio	100	Tanque C	**60**	7.8		27.6	
				14.0	6.8	27.6	6.8
Equilibrio				**1**	**0.5**	**2.0**	**0.5**

Para el equilibrio 1:0.5:2, habría que inyectar el 25% del tanque A, el 15% del tanque B y el 60% del tanque C.

Si en el proceso de tanteo, no llegamos al equilibrio deseado (suele pasar cuando se pretenden formular con las mismas soluciones madres equilibrios muy extremos como por ejemplo 1:3:1 y 1:0.5:2), tendremos que cambiar las cantidades iniciales en los tanques y volver a comenzar.

En algunos casos, nos podemos encontrar con qué hay que calcular de forma aproximada una solución nutritiva sabiendo la cantidad de abono en los tanques y las proporciones de inyección de cada uno de ellos.

Ejemplo 5.2.6: **Se está fertilizando tomate en cultivo sin suelo. Los tres tanques están inyectando en la misma proporción. La CE de consigna es de 2300 µS/cm. El agua tiene una CE de 1098 µS/cm y conocemos su análisis. Tenemos un sistema con 3 tanques de 1000 litros. con las siguientes cantidades de abono:**

Tanque A: (calcio): 125 kg nitrato de calcio y 75 litros ácido nítrico (60% ácido, 1.34 g/cm^3).
Tanque B (fósforo): 30 litros de ácido fosfórico (75% ácido, 1.57 g/cm^3).
Tanque C (potasio): 125 kg de sulfato de potasio.
Los tres tanques están inyectando en la misma proporción.

a) Calcular de forma aproximada la solución nutritiva que se está aportando con esa CE:

En primer lugar, calculamos los aportes en mmol/L de la solución madre:

Abono	kg/1000 L	L/1000L p. comercial	proporción	g/L	mmol/L
"Ca(NO3)2"	125		33	125.0	578.4
HNO3 (2)		75	33	59,9	950,8
H3PO4 (1)		30	33	35,3	360.2
K2SO4	125			125.0	717.2

1: riqueza 75%; densidad 1.57 g/cm3 | 2: riqueza 60%; densidad 1.33 g/cm3

En segundo lugar, calculamos el aporte total de abonos en función de la CE de consigna y la del agua de riego.

Tenemos un incremento "disponible" de CE por abonos: 2300 – 1098 = 1202 µS/cm.

Ese valor equivale a un aporte de abonos (asumimos un factor 0,85 por los valores de CE en el entorno de 2-3 dS/m)
1202 . 0.85 = 1022 mg/L.

Los datos de la solución nutritiva calculada serán aproximados, al calcularse de forma aproximada la CE. Una vez estimado la concentración total de abonos en la solución nutritiva, podríamos calcular la relación entre ese valor y la concentración en las soluciones madre:

Para calcular la concentración en la solución madre, consideramos que a pH 5.5 – 6.0 los ácidos no suben de forma apreciable la CE, el aporte total de abonos que subiría este parámetro serían:

125 kg/1000 L (nitrato calcio) + 125 kg/1000L (sulfato potasio) = 250 kg/1000L =250 g/L = 250000 mg/L en la solución madre.

Teniendo en cuenta las dos concentraciones (solución nutritiva y solución madre), la relación de de inyección en su conjunto tendría que aportar para alcanzar la CE de consigna (2300 µS/cm)

$$\frac{250000\frac{\text{mg}}{\text{L}}\text{en solución madre}}{1022\frac{\text{mg}}{\text{L}}\text{en solución madre}} = 244{,}6.$$

Usaremos este valor para dividir las concentraciones de TODOS los abonos de la solución madre (todos los tanques inyectan en la misma proporción) y obtener las concentraciones en la solución nutritiva:

mmol/L		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
aportes a. riego		0.3	0	0	0.62	0.46	2.4	7.3	4.4	0.6	7.0
"$Ca(NO_3)_2$"	578.4 / 244.6 = 2.37	5.21	0.47			2.37					
H_3PO_4	360,4 / 244.6 = 1.48			1.48							-1.48
HNO_3	950,8 / 244.6 = 3.90	3.90									-3.90
K_2SO_4	717.2 / 244.6 = 2.94				5.88					2.94	
aporte real		9.11	0.47	1.48	5.88	2.37				2.94	-5.38
totales		9.4	0.5	1.5	6,5	2,8	2.4	7.3	4.4	3,54	1.62

Relaciones: Ca/Mg= 1.2; K/Ca=2.3; K/Ca+Mg= 1.2; SO_4/NO_3=38%; NH_4/NO_3=5%

Viendo los valores calculados, vemos que

El pH de la solución muy probablemente será algo más alto que el deseado, al seguir habiendo 1.6 mmol/L de bicarbonatos sin neutralizar, en lugar de los 0.5 mmol/L que se recomiendan. Habría que comprobar si el pH medido tanto en el cabezal como en el emisor está en un valor aceptable.

Las relaciones indican que el Ca está algo bajo frente al potasio.

b) Intentar reajustar para lograr que el pH de la solución nutritiva quede en 5.5 – 6.0.

Además de con la adición de ácido, no se alcanzan los 0.5 mmol/L de bicarbonato a aportar, los valores de calcio están algo bajos. Tenemos varias posibilidades, las dos primeras modificando las consignas en el programador:

b.1): Subir la CE de consigna: Esta solución supone que se van a subir todos los aportes de abono al mismo tiempo y en la misma magnitud. Supongamos que subimos el valor de 2300 a 2500 µS/cm.

Tenemos un incremento de CE por abonos de 2500 – 1098 = 1402 µS/cm.
Esto equivaldría a 1202 . 0.85 =1192 mg/L de abono.
Los aportes de abono que influirán en la CE, considerando que a pH 5.5 – 6.0 serían los mismos que en el caso a:

Así que el sistema tendría que tener una relación de de inyección en su conjunto tendría que aportar para alcanzar la CE de consigna (2500 µS/cm)

$$\frac{250000\,\frac{\text{mg}}{\text{L}}\,\text{en solución madre}}{1402\,\frac{\text{mg}}{\text{L}}\,\text{en solución madre}} = 209{,}7$$

Usaremos este valor para dividir las concentraciones de TODOS los abonos de la solución madre y obtener las concentraciones en la solución nutritiva. Usando este coeficiente para **todos** los abonos aportados, nos quedaría:

mmol/L		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
aportes a. riego		0.3	0	0	0.62	0.46	2.4	7.3	4.4	0.6	7.0
"$Ca(NO_3)_2$"	578.4 / 209.7 =2.78	6,12	0.56			2.78					
H_3PO_4	360,4 /209,7 =1.73			1.73							-1.73
HNO_3	950,7 / 209,7 =4.56	4.56									-4.56
K_2SO_4	717.2 / 209,7 =3,44				6.88					3,44	
aporte real		10,59	**0.55**	1.73	6,88	2.78				3,46	-6,29
totales		**10,9**	**0.6**	**1.7**	**7,5**	**3,2**	**2.4**	**7.3**	**4.4**	**4.1**	**0,71**

Relaciones: Ca/Mg= 1.3; K/Ca=2.3; K/Ca+Mg= 1.3; SO_4/NO_3=37%; NH_4/NO_3=0.05

En este caso, ya llegamos a un valor aceptable de bicarbonatos y los niveles son más aceptables en general. Las relaciones se mantienen algo altas de potasio frente a calcio ya que los valores aumentan al mismo tiempo. La relación Ca/Mg es algo mejor ya que no hay aportes de magnesio en la solución.

Esto nos sugiere que teniendo en cuenta la salinidad del agua de riego, la CE consigna de 2300 podría ser una asunción optimista.

b.2): Cambiar la inyección de algún tanque: En este caso, sabiendo que el problema está en calcio y ácido, podríamos subir la inyección del tanque A. Esto supone bajar la inyección de los otros 2 tanques.

Si los porcentajes de inyección cambian de 33%:33%:33% a 40%:30%:30%, supone que el tanque a sube la inyección un 40/33 = 1.21 veces y que los tanques B y C la bajan en 30/33= 0.91 veces:

Abono	kg/1000 L	L/1000L p. comercial	proporción	g/L	mmol/L
"$Ca(NO_3)_2$"	125		40 (x1.21)	151,3	700,1
HNO_3 (2)		75		72,4	1149,2
H_3PO_4 (1)		30	30 (x 0.91)	32.1	327,6
K_2SO_4	125		30 (x 0.91)	112.5	645,4

1: riqueza 75%; densidad 1.57 g/cm^3 | 2: riqueza 60%; densidad 1.33 g/cm^3

En nuestro caso, cuando vemos la concentración en la solución madre, considerando que a pH 5.5 – 6.0 podemos asumir que los ácidos no suben de forma apreciable la CE, el aporte de abonos que subiría este parámetro serían:

151.3 kg/1000 L (nitrato calcio)+ 112.5 kg/1000L (sulfato potasio) = 263.8 kg/1000L = 263.8 g/L = 263800 mg/L en la solución madre.

Así que el sistema tendría que aportar, con las nuevas concentraciones en los tanques y 230 µS/cm:

$$\frac{263800 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{en solución madre}}{1082 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{en solución madre}} = 241{,}6$$

Usando este coeficiente para **todos** los abonos aportados, nos quedaría:

mmol/L		NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
aportes a. riego		0.3	0	0	0.62	0.46	2.4	7.3	4.4	0.6	7.0
"$Ca(NO_3)_2$"	700.1/ 241.6 =2.73	6,01	0.55			2.73					
H_3PO_4	327,6 / 241,6 = 1.28			1.28							-1.28
HNO_3	1149.2 / 241,6 = 4.48	4.48									-4.48
K_2SO_4	645.4 /241,6 = 2.52				5,04					2,52	
aporte real		10,5	**0.54**	1.28	5,04	2.73				**2,52**	-5.76
totales		**10,8**	**0.5**	**1.3**	**5,6**	**3,2**	**2.4**	**7.3**	**4.4**	**3.1**	**1.2**

Relaciones: Ca/Mg= 1.3; K/Ca=1,8; K/Ca+Mg= 1,0 ; SO4/NO3=29%; NH4/NO3=0,05

Aunque hemos subido la cantidad de nitrato y de calcio, sigue quedando una cantidad alta al calcular los bicarbonatos ya que el aumento de ácido nítrico no compensa la disminución del fosfórico. La cantidad de potasio también es menor, aunque las relaciones indican que estaría dentro de lo aceptable. Si aumentamos el porcentaje de inyección del tanque A y del B para tener más ácido, la concentración de potasio sería todavía menor, así como la de fosfato.

b.3.): Cambiando la cantidad de abono en los tanques: En este caso, se podrían aumentar las cantidades en el tanque A y el B o bajar la del C. El tanque C tiene una concentración de sulfato potásico en el límite superior de su solubilidad que no nos permite un aumento

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

A la hora de la formulación de varias soluciones nutritivas a partir del mismo cabezal debe tenerse en cuenta una especie de "inercia" en instalaciones grandes con tuberías secundarias de largo considerable, que puede hacer que la solución nutritiva que llegue de forma efectiva al cultivo no coincida con la que se esté inyectando en ese momento, sino que primero se aporte lo que quede en las conducciones generales la de la unidad operacional de riego anterior.

En cultivo sin suelo esa inercia puede ser muy importante, ya que los bajos tiempos de riego por unidad operacional de riego (menos de 5 minutos en algunos sustratos), y puede originar que la solución nutritiva que esté llegando a la planta sea bastante diferente de la esperada, causando en algunos casos problemas serios si las soluciones nutritivas de unidades operacionales de riego sucesivas son muy diferentes. En estos casos puede ser recomendable diseñar una sucesión de turnos que evite un cambio brusco de solución nutritiva entre distintas unidades operacionales de riego o bien el uso de una solución nutritiva similar para todas ellas, con unas concentraciones de compromiso entre las distintas necesidades.

CAPÍTULO 6

COLOCACIÓN DE LOS ABONOS EN LOS TANQUES

6.1. Incompatibilidades químicas en los tanques

Una vez determinadas las cantidades de abono a aportar, redondeadas, y corregidas para el volumen de cada tanque, se tiene que decidir en qué tanque de solución madre deben colocarse. Para ello se deben conocer las incompatibilidades químicas entre sales fertilizantes, ya que se está trabajando con concentraciones bastante altas. Para ello hay que tener en cuenta una serie de consideraciones, siendo las dos primeras las más importantes:

- Como base, no deben colocarse en un mismo tanque abonos que contengan calcio con fosfatos o sulfatos, bien de macroelementos (K_2SO_4, $(NH_4)_2SO_4$, $MgSO_4$) o de microelementos ($MnSO_4$, $CuSO_4$, $ZnSO_4$).

El nitrato potásico y el nitrato amónico normalmente pueden colocarse en cualquier tanque desde el punto de vista de incompatibilidades químicas.

- Debido a la relativamente baja solubilidad del sulfato potásico, cuando se tenga una concentración alta en la solución madre, puede ser recomendable no mezclarlo con otros abonos que contengan potasio (nitrato, fosfato o cloruro) o sulfatos (amónico, magnésico) para evitar posibles precipitaciones por el efecto del ion común

Tabla 16: Cuadro de compatibilidades para mezclas de abonos en soluciones madre

	Ácido nítrico	Nitrato cálcico	Nitrato potásico	Nitrato amónico	Nitrato de magnesio	Sulfato amónico	Fosfato monoamónico	Urea fosfato	Ácido fosfórico	Fosfato monopotásico	Sulfato potásico	Cloruro potásico	Sulfato magnesio	Cloruro cálcico	Urea
Ácido nítrico	SI														
Nitrato cálcico	SI	SI													
Nitrato potásico	SI	SI	SI												
Nitrato amónico	SI	SI	SI	SI											
Nitrato de magnesio	SI	SI	SI	SI	SI										
Sulfato amónico	SI	NO	PR	SI	SI	SI									
Fosfato monoamónico	SI	NO	SI	SI	PR	SI	SI								
Urea fosfato	SI	NO	SI	SI	PR	SI	SI	SI							
Ácido fosfórico	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI						
Fosfato monopotásico	SI	NO	SI	SI	PR	SI	SI	SI	SI	SI					
Sulfato potásico	SI	NO	PR	SI	SI	PR	SI	SI	SI	PR	SI				
Cloruro potásico	SI	SI	SI	SI	SI	PR	SI	SI	SI	SI	PR	SI			
Sulfato magnesio	SI	NO	PR	SI	SI	SI	PR	PR	SI	PR	PR	PR	SI		
Cloruro cálcico	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI	
Urea	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

SI: Compatible; NO: Incompatible; PR: precaución al realizar la mezcla (ver texto).

- No se recomienda mezclar sales de magnesio con fosfatos a pH mayores de 5.2 y siempre con concentraciones relativamente bajas. Cuando se usa como fuente de magnesio el nitrato, se recomienda colocarlo en el tanque del calcio.

En la tabla 16 se presenta las compatibilidades para mezclar abonos en soluciones madre, a partir de las consideraciones anteriores.

Además de lo anterior, algunos ácidos fosfóricos pueden contener impurezas que reaccionan con los sulfatos apareciendo precipitados mucilaginosos en el fondo de los tanques. En algunos casos, el sulfato potásico puede contener impurezas que también intervienen en la aparición de ese fenómeno. Algo parecido ocurre en algunos casos si se colocan los microelementos en el tanque de los fosfatos.

Los microelementos se podrían añadir en cualquier tanque en teoría, siempre después de añadir el ácido (si lo llevara) y comprobar que el pH está dentro de los rangos de estabilidad óptima de los quelatos (ver figura 25). En el caso del hierro, el EDDHA tiene una menor estabilidad a pH bajos (por debajo de 3) mientras que el EDTA y el DTPA mantienen su estabilidad aproximadamente hasta pH 1.

Por otra parte, si alguno de los elementos viene como sulfato, no sería recomendable ponerlo en el tanque del calcio. Entonces se coloca en el tanque del

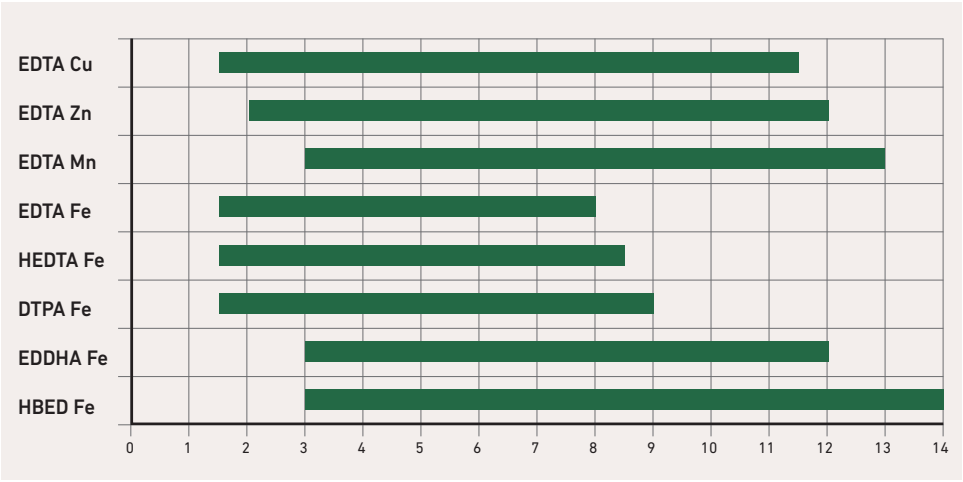


Figura 25: Estabilidad de diferentes quelatos en función del pH (Van der Lugt, 2017)

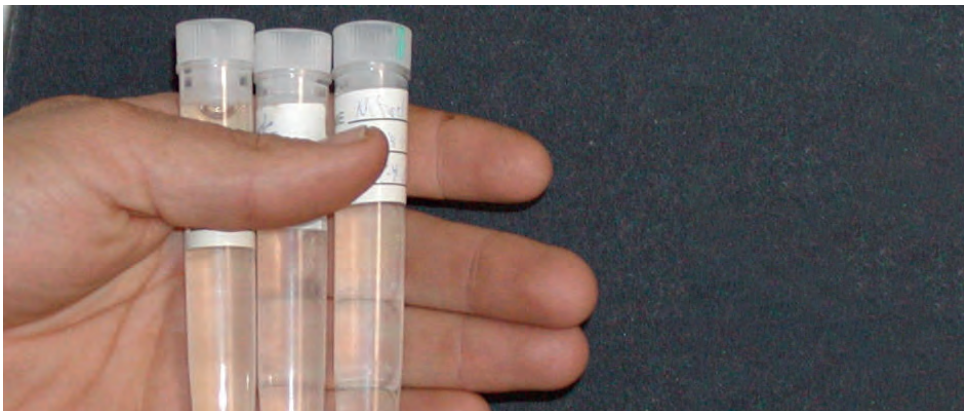


Figura 26: Estabilidad de diferentes quelatos con una misma solución nutritiva

potasio si su pH está dentro de los valores normales. Puede ser recomendable realizar una prueba de estabilidad de diferentes quelatos comerciales en la solución del tanque (ver figura 26).

En los cabezales que lo permitan por el número de tanques, la mejor solución es que haya uno específico para los microelementos. Hay que tener precaución al mezclar quelatos de microelementos productos de reacción alcalina (como el fosfato dipotásico o fosfato diamónico o quelatos de potasio, entre otros).

6.1.1. El número de tanques y la elección de abonos para disolver

En función de lo anterior, el primer criterio a la hora de disolver los abonos en los tanques de solución madre es evitar las incompatibilidades entre ellos. Para manejar todas las incompatibilidades anteriores, se trabaja con un número de tanques determinados. En general:

- A mayor número de tanques, menos problemas de incompatibilidad de abonos y más flexibilidad para cambiar las soluciones modificando las inyecciones de cada tanque.

- Por otra parte, a mayor número de tanques, mayores necesidades de espacio en el cabezal, mayor complicación del sistema de inyección y mayores costes.

Si se desea poder aplicar una solución nutritiva completa se debe disponer al menos de 2 tanques (uno con el calcio y otro con los fosfatos y sulfatos). En automatismos de fertirrigación es más frecuente que se disponga de un mínimo de 3 tanques (dos tanques de los que se inyecta por la CE más uno de ácido que lo haría por pH (figura 27), y tendríamos estas opciones:

Tanque Ácido: lo normal sería poner una proporción alta del ácido nítrico (salvo una pequeña parte en el tanque donde se disuelva el nitrato de calcio, en su caso) o la totalidad del sulfúrico. Como se comentó más arriba, salvo casos muy contados, el ácido fosfórico no se inyecta por consigna de pH.

Tanque A: se pone el nitrato cálcico y el nitrato de magnesio con parte del ácido nítrico (como mínimo hasta dejar el pH alrededor de 6.5, para evitar precipitaciones de calcio).

Tanque B: en este tanque se colocarían los sulfatos y las fuentes de fósforo (ácido fosfórico o fosfatos).

En función de las concentraciones totales de los tanques o de posibles cambios en las inyecciones para conseguir distintas soluciones nutritivas, se puede colocar parte o la totalidad del nitrato potásico o del nitrato amónico en el tanque del calcio o en el de los sulfatos y fosfatos. Con respecto a los microelementos se podrían poner en el tanque del calcio si el pH es mayor de 3 o si no en el otro.



Figura 27: Izquierda: Sistemas de 3 tanques. Derecha. Sistema de 2 tanques más uno de ácido (de menor volumen). (Foto 27 derecha: Oscar Saavedra Oliva).

En el caso de tener cuatro tanques (tres tanques por consigna de pH y uno de ácido), una opción lógica sería (entre varias posibles):

Tanque del ácido: ácido nítrico, ácido sulfúrico.

Tanque A: sulfatos (amónico, potasio, magnesio, microelementos como sales simples), nitrato amónico, nitrato potásico.

Tanque B: fosfatos (H_3PO, $(NH_4)H_2PO_4$ o KH_2PO_4).

Tanque C: nitrato de calcio, nitrato de magnesio y parte del ácido nítrico.

Se podría también poner parte del nitrato potásico en el tanque B o C si la concentración de sulfato potásico es alta para evitar el posible efecto del ion común.

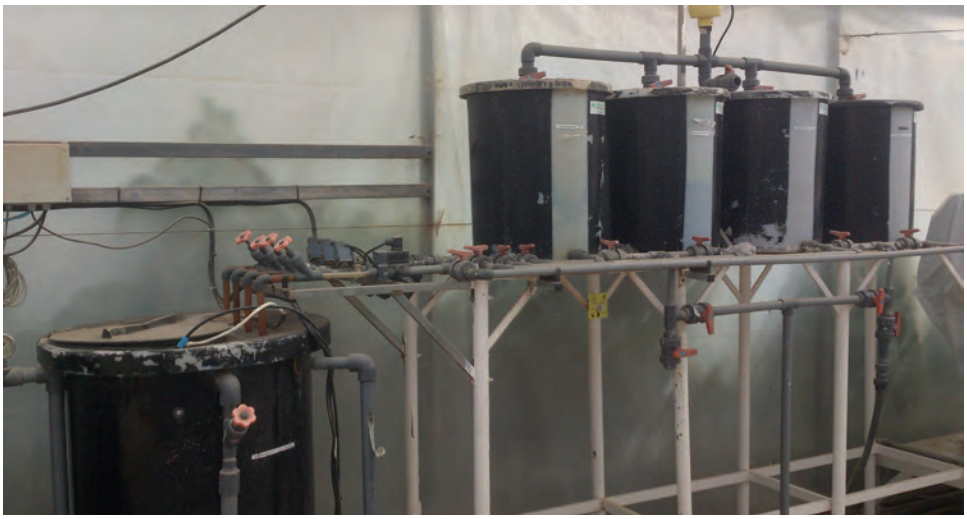


Figura 28: Sistema para una explotación pequeña con 4 tanques.

En el caso de tener más de tres tanques, las opciones se abren mucho (figura 28, 29 y 30). Lo más usual es un tanque con las fuentes de potasio y magnesio, junto con NH_4NO_3, otro con el fósforo, un tercero con el nitrato de calcio y el cuarto con los microelementos.

Ejemplo 6.1.1: Se quiere repartir los abonos de la solución nutritiva de los ejemplos 4.2.8 y 4.2.9 en 2 tanques (ambos comandados por consigna de CE) y en 3 tanques (dos comandados por CE y uno por sonda de pH). La solución madre se concentrará 75 veces. En ambos casos, los tanques son de 1000 litros.

Para el ejemplo 4.2.8 (uso de ácido nítrico para bajar el pH):
Haremos un redondeo de cantidades a kg o L. Siempre que hagamos un redondeo debemos hacer un recálculo, sobre todo en el caso de los ácidos:

Abono	mmol/L	mg/L = g/m³	cm³/L p. comercial	relación de concentración	kg/1000 L	L/1000 L
"$Ca(NO_3)_2$"	3.90	843		1:75	63.2 → 63	
H_3PO_4 *	1.50	147	125			9.4 → 9
HNO_3 **	4.70	296	368			27.6 → 28
K_2SO_4	3.40	593			44.5 → 45	
$MgSO_4$	0.50	124			9.3 → 9	
H_2SO_4***	0.00	0.00	0			0

*: ácido fosfórico 75%, 1.57 g/cm³ | **: Ácido nítrico 60%, 1.34 g/cm³
***: Ácido sulfúrico 98%, 1,89 g/cm³

Recalculamos las cantidades de ácido redondeadas para comprobar.
Para el ácido fosfórico:

9/75 = 0.12 = 120 cm³/L ácido comercial; 120 . 1.57 =
188 mg/L ácido comercial;
188 . 075 = 141 mg/L H_3PO_4 ; 141/98 = 1,44 mmol/L H_3PO_4 =
1.44 mmol/L alcalinidad destruida (valencia 1 para pH 5.5 – 6.0)

Para el ácido nítrico:

28/75 = 0.373 = 373 cm³/L ácido comercial; 373 . 1.34 = 500 mg/L ácido comercial;
500 . 0,6 = 300 mg/L HNO_3 ; 300/63 = 4,76 mmol/L HNO_3 = 4.76 mmol/L alcalinidad destuida

Destruimos 4.76 + 1.44 = 6.2 mmol/L de bicarbonatos con la s.n. redondeada y 4.70+1.5 = 6.2 mmol/L con la primera. No hay problemas. Si la alcalinidad destruida al redondear fuera **mayor** que la calculada en primer lugar, podríamos quedarnos sin tampón en la solución nutritiva (recordemos que se hace el cálculo para dejar sólo 0.5 mmol/L de bicarbonatos).

En el caso de tener sólo 2 tanques hay que controlar que la alcalinidad no cambie de forma significativa para evitar cambios de pH peligrosos. También debe tenerse un especial cuidado si se cambia la consigna de CE, ya que puede influir bastante en el pH de la solución.

Con los abonos de la solución no tenemos muchas opciones, al no poder poner en el mismo tanque nitrato de calcio con sulfato potásico, sulfato de magnesio o con ácido fosfórico:

Tanque A	
Nitrato cálcico	63 kg
Ácido nítrico	28 L

Tanque B	
Ácido fosfórico	9 L
Sulfato potásico	45 kg
Sulfato magnesio	9 kg

En el tanque B no debería haber problemas con mezclar magnesio con fosfatos Con la adición de 9.4 L de ácido fosfórico en 1000 L de agua es de esperar que el pH sea muy bajo.

En este caso, el pH de los tanques hará que la adición de microelementos en cualquiera de los dos sea complicada, sobre todo en el caso de EDDHA o HEBD que dejan de ser estables por debajo de 3.0.

En 3 tanques, pondríamos una parte del HNO_3 en el tanque de ácidos y otra en el tanque A, para disminuir las fluctuaciones de la concentración de nitratos por cambios de la alcalinidad. En este caso, suponemos que la alcalinidad no varía demasiado, y pondríamos el contenido de un envase en el tanque del ácido (25 L) y el resto (27.6 – 25 = 2.6 L) en el tanque A:

Tanque A		Tanque B		Tanque ácidos	
Nitrato cálcico	**63 kg**	**Ácido fosfórico**	**9 L**		
Ácido nítrico	**3 L**	**Sulfato potásico**	**45 kg**		
		Sulfato magnesio	**9 kg**	**Ácido nítrico**	**25 L**

Además de por la comodidad de poner un envase completo en el tanque del ácido, podríamos poner un quelato tipo EDDHA o HEBD, ya que probablemente, el pH del tanque A estará por encima de 3.5 por la adición de esa pequeña cantidad de ácido nítrico.

Si se esperaran cambios de alcalinidad de consideración, habría que poner una menor cantidad de ácido nítrico en el tanque comandado por sonda de pH y más en el tanque A, teniendo el problema de dónde poner los quelatos.

Para el ejemplo 4.2.8 (uso de ácido sulfúrico y nítrico para bajar el pH):

Abono	mmol/L	mg/L = g/m³	cm³/L p.comercial	relación de concentración	kg/1000 L	L/1000 L
"$Ca(NO_3)_2$"	3.90	843		1:75	63.2 → 63	
H_3PO_4 *	1.50	147	125			9.4 → 9
HNO_3 **	3.92	247	307			23 = 23
K_2SO_4	3.40	593			44.5 → 45	
$MgSO_4$	0.50	124			9.3 → 9	
H_2SO_4***	0.39	38	21			1.6 → 2

*: ácido fosfórico 75%, 1.57 g/cm³ **: Ácido nítrico 60%, 1.34 g/cm³
***: Ácido sulfúrico 98%, 1,89 g/cm³

Recalculamos las cantidades de ácido redondeadas para comprobar.
Para el ácido fosfórico:
9/75 = 0.12 = 120 cm^3/L ácido comercial; 120 . 1.57 =
188 mg/L ácido comercial;
188 . 075 = 141 mg/L H_3PO_4 ; 141/98 = 1,44 mmol/L H_3PO_4 = 1.44 mmol/L alcalinidad destruida (valencia 1 para pH 5.5 – 6.0)

Para el ácido nítrico:
23/75 = 0.307 = 307 cm^3/L ácido comercial; 373 . 1.34 = 411 mg/L ácido comercial;
411 . 0,6 = 247 mg/L HNO_3 ; 247/63 = 3,92 mmol/L HNO_3 = 3,92 mmol/L alcalinidad destuida

Para el ácido sulfúrico:
2/75 = 0.027 = 27 cm^3/L ácido comercial; 373 . 1.89 = 51 mg/L ácido comercial;
51 . 0,98 = 50 mg/L H_2SO_4; 247/63 = 0,51 mmol/L H_2SO_4= 1,02 mmol/L alcalinidad destuida (valencia 2)

Destruimos 3.92 + 1,44 + 1.02 = 6.4 mmol/L de bicarbonatos con la s.n. redondeada y 3,92+1.5+0,78 = 6.2 mmol/L con la primera. Podrían haber problemas ya que estamos neutralizando 0.2 mmol/L más al redondear, sobre todo en aguas con baja alcalinidad. En el caso de la opción con 2 tanques con la inyección sería por consigna de CE puede ser más probable una bajada de pH a niveles peligrosos.

En 2 tanques no tenemos muchas opciones, al no poder poner en el mismo tanque nitrato de calcio con sulfato potásico, sulfato de magnesio o con ácido fosfórico. No sé redondeará la cantidad de ácido sulfúrico para mantener los 0.5 mmol/L de bicarbonatos tamponando la solución nutritiva:

Tanque A	
Nitrato cálcico	63 kg
Ácido nítrico	23 L

Tanque B	
Ácido fosfórico	9 L
Sulfato potásico	45 kg
Sulfato magnesio	9 kg
Ácido sulfúrico	1.6 L

Como en el caso anterior, con la adición de 9.4 L de ácido fosfórico en 1000 L de agua es de esperar que el pH sea muy bajo por lo que no debería haber problemas con mezclar magnesio con fosfatos

El pH de los tanques hará que la adición de microelementos en cualquiera de los dos sea complicada, sobre todo en el caso de EDDHA o HEBD que dejan de ser estables por debajo de 3.0.

En 3 tanques, pondríamos el ácido sulfúrico en el tanque de ácidos, mientras que pondríamos en el tanque A todo el ácido nítrico para que la concentración de nitratos no cambie al hacerlo la alcalinidad. En este caso, si podríamos trabajar con 2 L de ácido sulfúrico ya que a trabajar con consigna de pH a menor alcalinidad por destruir tras la acción del nítrico y fosfórico, menor inyección.

Tanque A	
Nitrato cálcico	63 kg
Ácido nítrico	23 L

Tanque B	
Ácido fosfórico	9 L
Sulfato potásico	45 kg
Sulfato magnesio	9 kg

Tanque ácidos	
Ácido sulfúrico	2 L

De nuevo, tanto el tanque A como el tanque B van a estar a un pH por debajo de 3.0 – 3.5 por la adición de ácidos y no sería recomendable usar un quelato tipo EDDHA o HEBD. Para poder hacerlo, la opción podría ser acidificar el tanque A hasta un pH por encima de 3.5 con ácido nítrico y poner el resto de ese producto (que sería una cantidad bastante mayor) en el tanque de los ácidos.

En el tanque de ácido, como trabaja por consigna de pH, podríamos poner una cantidad mayor de ácido sulfúrico. En este caso, el gasto de ese tanque será menor que el de los otros dos.

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

En la medida de lo posible, es conveniente utilizar el menor número de abonos en un mismo tanque para evitar problemas de incompatibilidades. Por otra parte, puede ser más difícil cambiar la formulación de las soluciones si tenemos muchos abonos en el mismo tanque (por ejemplo, si tenemos todos los abonos con fósforo y con potasio en un mismo depósito, si cambiamos la inyección, cambiará de la misma forma la cantidad de estos nutrientes que se aportan).



6.2. La importancia de la solubilidad en las soluciones madre.

Una vez calculadas la cantidad de abonos, y decidido en que tanque se colocan, debe comprobarse si se supera la solubilidad máxima de los abonos sólidos. En la tabla 17 vienen listadas las solubilidades de los principales abonos sólidos. Se han consultado varias fuentes, poniendo los valores máximos y mínimos encontrados, cuando se han tenido. También se señalan las cantidades recomendables a colocar que podrían servir como valores de referencia.

Tabla 17: Intervalos de solubilidad de los principales abonos utilizados en fertirrigación

Fertilizante	Solubilidad (kg/1000 L)	Concentración en tanque de solución madre para evitar problemas de uso (Alarcón, 2006)
	kg/1000 L	
Ácido nítrico	*	---
Nitrato cálcico	1000 – 1200	300
Nitrato potásico	140 – 320	100 – 150
Nitrato amónico	250 – 1700	350
Nitrato de magnesio	280 – 500	200
Sulfato amónico	400 – 760	---
Fosfato monoamónico	200 – 300	150
Fosfato diamónico	500 - 700	---
Urea fosfato	250 – 350	---
Ácido fosfórico	*	---
Fosfato monopotásico	170 – 230	150
Fosfato dipotásico	1500 – 1600	---
Ácido sulfúrico	*	---
Sulfato potásico	70 – 120	70 – 100
Cloruro potásico	270 – 340	200
Sulfato de magnesio	260 – 400	150
Cloruro cálcico	600	200
Urea	1000 – 1200	---

*: solubles en cualquier proporción

La solubilidad está muy influida por la temperatura. Las posibilidades de cambiar la temperatura del agua son muy limitadas en la inmensa mayoría de las explotaciones. En general, cuanto menor sea la temperatura del agua, menor solubilidad. El sulfato potásico, el fertilizante menos soluble de los usados en fertirrigación, tiene una solubilidad máxima de 6.9 kg/100L a 1ºC subiendo hasta 11 kg/100L a 20ºC.

Hay que tener en cuenta que los abonos nitrogenados, en especial el nitrato amónico y en menor medida el potásico y la urea, al disolverse enfrían el agua, tanto más cuanta más cantidad se disuelva. (si se disuelven 50 kg de NH_4NO_3 en 100 L de agua a 26º, la temperatura baja a casi 0º). A esta temperatura, la solubilidad de de otras sales que se estén disolviendo en el mismo tanque baja notoriamente. Por lo tanto, las cantidades máximas de nitrato amónico y potásico para evitar problemas de sobresaturación se alejan bastante de las solubilidades máximas, siendo recomendable trabajar con los valores bajos de los intervalos señalados en la tabla 17.

Por otra parte, la reacción de disolución de los ácidos en el agua desprende mucha energía, calentando la solución. En el caso del ácido sulfúrico, esta subida de temperatura es muy notable. Recuerde que siempre este ácido debe diluirse aplicándolo en una cantidad de agua respetable para que la subida no sea muy alta y nunca al revés.

Debe tenerse en cuenta el efecto del ion común, como el caso de la disolución en un tanque de sulfato potásico junto con otro fertilizante que aporte bien K^+ (nitrato potásico, fosfato monopotásico, etc.) o SO_4^{2-} (sulfato amónico, sulfato de magnesio, etc).

$$\mathbf{2K^+\ (soluble) + SO_4^{2-}\ (soluble) \longleftrightarrow K_2SO_4\ (insoluble)}$$

Cuando añadimos un ion común (K^+ o SO_4^{2-} en este caso) estamos modificando la concentración de uno de los iones de la expresión de equilibrio, con lo que el proceso, de acuerdo con el principio de Le Chatelier, se desplazará hacia la derecha, precipitando una fracción mayor del compuesto insoluble. Por tanto, el efecto del ion común hace que disminuya la solubilidad de la sal en disolución.

Teniendo en cuenta los posibles cambios de la solubilidad por la temperatura o por posibles efectos de ion común se suelen usar como normas de cálculo:

- Tener un coeficiente de seguridad del 80-90% de los datos de solubilidad de la tabla 17. En el caso del sulfato potásico, por su baja solubilidad frente al resto de fertilizantes y por la facilidad de tener problemas de ion común cuando se colocan los abonos en los tanques de solución madre, puede ser conveniente no pasar de 75 kg/1000L.

- La suma de todos los abonos aplicados a cada tanque no debe superar el 15% (150 kg /1000 l de agua) con temperaturas del agua frías o el 20% (200 kg / 1000 L de agua) si la temperatura de la solución está en los alrededores de 20ºC.

Ejemplo 6.2.1: **Se tiene un cabezal con 3 tanques de 1000 L y se desea disolver las siguientes cantidades. Determinar si se pueden presentar problemas de solubilidad:**

Tanque A: 100 kg nitrato de calcio:

Tanque B: 25 L ácido fosfórico (densidad 1.55 g/cm^3 y 75% pureza) y 25 kg sulfato de magnesio

Tanque C: 75 kg sulfato de potasio.

Vamos a ver si hay problemas de solubilidad en los tanques:

Tanque A:
Aplicando un margen del 90% de la solubilidad máxima, para el nitrato de calcio este valor sería:

0.9 x 1000 kg/1000 L (en este caso, por seguridad escojo el valor más bajo de la tabla 16) = 900 kg/100 L
En este caso, la concentración es 100 kg/1000 L < 900 kg/1000L.
No hay problemas de solubilidad.
Si aplico un valor máximo de carga del 15 %.
La carga del tanque sería 100 kg /1000 L = 10 kg/100 L = 10% carga < < 15%. **No hay problemas de solubilidad**

Tanque B:
Aplicando el 90% de la solubilidad máxima, tengo que tener en cuenta que el ácido fosfórico es miscible en cualquier proporción, mientras que sulfato de magnesio tendría:

0,9 x 240 kg/1000 L (valor más bajo de la tabla 16) = 220 kg/100L
En este caso, la concentración es 25 kg/1000 L < < 220 kg/100L. **No hay problemas de solubilidad.**
Si aplicamos el valor máximo del 15% de carga:
En este caso, tendremos en cuenta el aporte del ácido fosfórico, teniendo en cuenta que:
25 L ácido fosfórico comercial x 1.55 = 38,75 kg ácido comercial; 38.75 x 0,75 = 29 kg ácido puro
29 kg ácido fosfórico + 25 kg sulfato de magnesio = 54 kg abono/1000 L = 5.5 kg/100L = 5.5 % carga < 15 %. **No hay problemas de solubilidad.**

Tanque C:
Aplicando un margen del 90% de la solubilidad máxima, para el sulfato de potasio este valor sería:

0.9 x 7 kg/1000 L (por seguridad escojo el valor más bajo de la tabla 16) = 63 kg/100 L
En este caso, la concentración es 75 kg/1000 L > 63 kg/1000L**.** **Puede problemas de solubilidad sobre todo con agua fría y/o mezclas que favorezcan el efecto del ión común.**
Si tomo como valor de solubilidad máxima, la media del intervalo de la tabla 15, 9,5 kg/100L
0,9 x 95 kg/100 L = 85,5 kg/100 L > 7.5 kg/100L. **No habría problemas de solubilidad.**

Si aplico un valor máximo de carga del 15 %.
La carga del tanque sería 75 kg /100 L = 7.5 kg/100 L = 7.5% carga < 15%. **No hay problemas de solubilidad**

Ejemplo 6.2.2: Se quiere concentrar 125 veces la solución nutritiva del ejemplo 4.2.9. Calcular las cantidades de abono, la incidencia de precipitaciones y repartir en 3 tanques (2 comandados por CE y 1 por pH). Concentre el tanque de ácido para que se consuma a la misma velocidad que los otros 2.

De nuevo, consideraramos un redondeo a kilogramos. En este caso no recalcularemos, aunque siempre habría que hacerlo.

Abono	mmol/L	mg/L = g/m3	cm3/L p. comercial	relación de concentración	kg/1000 L	L/1000 L
"$Ca(NO_3)_2$"	3.90	843		1:125	105.4 → 105	
H_3PO_4 *	1.50	147	125			15.6 → 16
HNO_3 **	3.92	247	307			38.4 → 38
K_2SO_4	3.40	593			74.2 → 74	
$MgSO_4$	0.50	124			15.5 → 16	
H_2SO_4***	0.39	38	21			2.62 → 3

*: ácido fosfórico 75%, 1.57 g/cm^3 **: Ácido nítrico 60%, 1.34 g/cm^3
***: Ácido sulfúrico 98%, 1,89 g/cm^3

En el caso de la opción de 3 tanques (2+1 ácido), tenemos que poner juntos el sulfato potásico y el de magnesio, por lo que de esperar un efecto de ión común.
La distribución y cantidades serían las siguientes:

Tanque A	Tanque B	Tanque ácidos
Nitrato cálcico 105 kg	**Ácido fosfórico 16 L**	
Ácido nítrico 38 L	**Sulfato potásico 74 kg**	
	Sulfato magnesio 16 kg	**Ácido sulfúrico 3 L**
136 kg/1000 L = 13.6%	108 kg/1000 L = 10.5%	4.9 kg/1000L =0.5%
38.4 L . 1.34 . 0.6 = 30.4 kg a. nítrico	15.5 L . 1.57 . 0.75 = 18.4 kg. a. fosfórico	2.6 L . 1.89 . 0.98 = 4.9 kg a. sulfúrico

Aunque desde el punto de vista de carga, los tanques están dentro de lo aceptable, habría que tener un especial cuidado en vigilar posibles precipitados en el tanque B debido a la alta concentración de K_2SO_4 y al efecto del ion común por la presencia conjunta de $MgSO_4$.

Si el riesgo de precipitación de sulfato de potasio se considerara no aceptable, habría 2 opciones:

a) Bajar la relación de concentración: En el ejemplo 6.1.1, con una relación 1:75, las cantidades de sulfato potásico y magnésico serían menores y podría considerarse dentro de unos valores de seguridad.

b) Mantener la relación de concentración y cambiar el sulfato de magnesio por nitrato de magnesio, desapareciendo el ion común. Vamos a calcular la nueva solución con esa premisa.

En este caso, ponemos el nitrato de magnesio antes que el ácido nítrico para ajustar la concentración total de nitratos.
El resto de bicarbonatos no destruidos por el ácido fosfórico y el nítrico se eliminaría con ácido sulfúrico.

Iones		**NO_3^-**	**NH_4^+**	**$H_2PO_4^-$**	**K^+**	**Ca^{2+}**	**Mg^{2+}**	**Na^+**	**Cl^-**	**$SO4^{2-}$**	**HCO_3^-**
Solución nutritiva		12.50	0.50	1.50	7.00	4.50	2.00	---	---	2.00	0.50
Aportes a. riego		0	0	0	0.20	0.60	1.50	4.40	2.60	0	6.70
Aportes previstos		12.50	0.50	1.50	6.80	3.90	0.50	0	0	2.00	-6.20
Abono	mmol/L	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	$SO4^{2-}$	HCO_3^-
"$Ca(NO_3)_2$"	3.90	8.58	0.78			**3.90**					
H_3PO_4	1.50			**1.50**							-1.50
$Mg(NO_3)_2$	0.50	1.00					**0.50**				
HNO_3	2.92	**2.92**									-2.92
K_2SO_4	3.40				**6.80**					3.40	
H_2SO_4	0.89									0.89	**-1.78**
Aporte real		12.50	*0.78*	1.50	6.80	3.90	0.50	--	--	*4.29*	6.20
Totales		**12.50**	**0.78**	**1.50**	**7.00**	**4.50**	**2.00**	**4.40**	**2.60**	**4.29**	**0.50**

Se marca en otro color el valor de aporte por la que se determina la cantidad de abono.

Con las concentraciones de la solución nutritiva, calculamos las de la soluciones madre. A la hora de redondear, lo hacemos al alza con el fosfórico y el sulfúrico y a la baja con el nítrico para que cuando se hiciera el correspondiente recálculo, se garanticen los 0.5 mmol/L de bicarbonatos en la solución nutritiva:

Abono	mmol/L	mg/L = g/m³	cm³/L p. comercial	relación de concentración	kg/1000 L	L/1000 L
"$Ca(NO_3)_2$"	3.90	843		1:125	105.4 → 105	
H_3PO_4 *	1.50	147	125			15.6 → 16
HNO_3 **	2,92	184	229			28,6 → 28
K_2SO_4	3.40	593			74.2 → 74	
$Mg(NO_3)_2$	0.50	128			15.5 → 16	
H_2SO_4***	0.89	87	47			2.62 → 3

*: ácido fosfórico 75%, 1.57 g/cm³ **: Ácido nítrico 60%, 1.34 g/cm³
***: Ácido sulfúrico 98%, 1,89 g/cm³

Finalmente, repartimos los abonos en los 3 tanques (2+1comandado por sonda de pH). El pH del tanque B, con 16 L de ácido fosfórico/1000L es de esperar que esté muy por debajo de 5.2 por lo que no debería haber problemas con mezclar magnesio con fosfatos. Aun así, colocaremos el nitrato de magnesio en el tanque A:

Tanque A	Tanque B	Tanque ácidos
Nitrato cálcico 105 kg		
Ácido nítrico 28 L	**Ácido fosfórico 16 L**	
Nitrato magnesio 16 kg	**Sulfato potásico 74 kg**	**Ácido sulfúrico 3 L**
142,8 kg/1000 L = 14,3%	93,8kg/1000 L = 9,4%	5.6 kg/1000L =0.6%
28 L . 1.34 . 0.6 = 21,8 kg a. nítrico	16 L . 1.57 . 0.75 = 18,8 kg. a. fosfórico	L . 1.89 .0.98 = 5.6 kg a. sulfúrico

En el tanque de ácido, como trabaja por consigna de pH, podríamos poner una cantidad mayor de ácido sulfúrico, sabiendo que el gasto de ese tanque será menor que el de los otros dos.

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

Ejemplo 6.2.3: Se quiere saber si es posible concentrar 200 veces la solución nutritiva del ejemplo 5.2.1, trabajando con 2 tanques más uno de ácido:

Al concentrar 200 veces la solución nos encontraríamos con los siguientes valores:

Abono	mmol/L	mg/L = g/m³	cm³/L p. comercial	relación de concentración	kg/1000 L	L/1000 L
"$Ca(NO_3)_2$"	4.35	940		1:200	188	
H_3PO_4 (1)	1.50	147 (puro)	125			25
KNO_3	0.59	60			12	
HNO_3 (2)	2.35	148 (puro)	184			37
K_2SO_4	2.56	446			89	
H_2SO4 (3)	3.12	306 (puro)				34

1: ácido fosfórico 75%, 1.57 g/cm³ 2: Ácido nítrico 60%, 1.34 g/cm³
3: Ácido sulfúrico 98%, 1,89 g/cm³

En un tanque tendría que ir el nitrato de calcio y en otro los fosfatos y sulfatos. El nitrato potásico se podría poner en ambos tanques. En el tanque de ácido queremos que sólo esté el ácido sulfúrico (y no, el ácido nítrico) para que las posibles variaciones de alcalinidad no cambien la concentración de nitratos.

En el tanque A, con 188 kg/1000L de nitrato de calcio, ya estaríamos en el tope de carga. Lo más que podríamos hacer es poner el ácido nítrico, soluble en cualquier proporción.

En el tanque B, tendríamos que poner el sulfato potásico. Estaríamos sobrepasando ligeramente los valores máximos recomendados para evitar precipitaciones (70-120 kg/1000L). Por otra parte, tendríamos que poner también el nitrato potásico. Tendríamos un posible efecto de ion común, lo que podría aumentar la posibilidad de precipitación de K_2SO_4:

Tanque A	Tanque B	Tanque ácidos
Nitrato cálcico 188 kg	Ácido fosfórico 25 L	
Ácido nítrico 37 L	Sulfato potásico 89 kg	
	Nitrato potásico 12 kg	Ácido sulfúrico 34 L
217.7 kg/1000 L = 21.8%	130.4 kg/1000 L = 13.4%	63.0 kg/1000L =0.6%
37 L . 1.34 .0.6 =29.7 kg a. nítrico	25 L . 1.57 0.75=29.4 kg. a. fosfórico	34 L . 1.89 . 0.98 = 63.0 kg a. sulfúrico

Sería mejor quedarnos una relación de concentración inferior para no estar en los límites de solubilidad.

Si tuviéramos que mantener la relación de concentración, sería interesante intentar que las soluciones madre se gasten lo antes posible para no dar tiempo a una precipitación significativa.

Otra opción sería explorar la eliminación del nitrato potásico, que está en una concentración muy baja (0.59 mmol/L).

"$Ca(NO_3)_2$": Ponemos la fórmula entre comillas para recordar que el fertilizante es $5Ca(NO_3)_2.2H_2O.NH_4NO_3$.

En el caso de que algún abono supere la solubilidad máxima, o que la suma de abonos de un tanque sea mayor del 15-20% se presentan varias opciones:

- Se pueden diluir las cantidades de abono en los tanques como en el ejemplo anterior, hasta que el problema desaparezca. Esto supondrá que las soluciones madre se gastarán antes y tendrán que reponer más a menudo (ver apartado 6.3).

- Redistribuir los abonos en los tanques: Si el problema ocurre con el nitrato potásico o el amónico, estos abonos se pueden distribuir entre los tres tanques sin ningún problema, o si el problema ocurre con algún sulfato, se podría colocar parte en el tanque C, donde van los fosfatos. En el ejemplo 6.2.2 el nitrato de magnesio se puede colocar en el tanque A, con el nitrato de calcio y el ácido nítrico o en el tanque B, con el ácido fosfórico y el sulfato potásico.

Ejemplo 6.2.3: Se quiere saber si es posible concentrar 200 veces la solución nutritiva del ejemplo 5.2.1, trabajando con 2 tanques más uno de ácido:

Al concentrar 200 veces la solución nos encontraríamos con los siguientes valores:

Abono	mmol/L	mg/L = g/m3	cm3/L p. comercial	relación de concentración	kg/1000 L	L/1000 L
"$Ca(NO_3)_2$"	4.35	940		1:200	188	
H_3PO_4 (1)	1.50	147 (puro)	125			25
KNO_3	0.59	60			12	
HNO_3 (2)	2.35	148 (puro)	184			37
K_2SO_4	2.56	446			89	
H_2SO4 (3)	3.12	306 (puro)				34

1: ácido fosfórico 75%, 1.57 g/cm^3 2: Ácido nítrico 60%, 1.34 g/cm^3
3: Ácido sulfúrico 98%, 1,89 g/cm^3

En un tanque tendría que ir el nitrato de calcio y en otro los fosfatos y sulfatos. El nitrato potásico se podría poner en ambos tanques. En el tanque de ácido queremos que sólo esté el ácido sulfúrico (y no, el ácido nítrico) para que las posibles variaciones de alcalinidad no cambien la concentración de nitratos.

En el tanque A, con 188 kg/1000L de nitrato de calcio, ya estaríamos en el tope de carga. Lo más que podríamos hacer es poner el ácido nítrico, soluble en cualquier proporción.

Ejemplo 6.2.4: Calcular si es necesario diluir una solución madre en un tanque de 1000 L compuesta de los abonos que se presentan:

Para calcular el porcentaje de concentración, se suman las concentraciones de todos los abonos del tanque y se pasa a kg/100 L que sería un equivalente a tanto por ciento.

Abono	kg/1000 L	% (kg/100 L)
Nitrato cálcico	150	
ácido nítrico	25	
Total	175	**17.5**

En el tanque se está dentro de los valores máximos recomendados (15 - 20% de concentración).

Si se considerar muy alto, se podría diluir la cantidad de abono hasta bajar del 15% y subir la inyección de ese tanque proporcionalmente para mantener las concentraciones. El cálculo del aumento de la inyección, para quedarse en esa concentración total, se podría realizar como sigue:

$$\frac{15\ (\text{carga máxima})}{17{,}5\ (\text{carga obtenida})} = 0{,}857 \text{ veces hay que diluir la cantidad de abono;}$$

Abono	Inicial (kg/1000L)	Tras diluir (kg/1000 L)
Nitrato cálcico	150	**128,5**
ácido nítrico	25	**21.4**
Total	175 (17.5%)	**150 (15%)**

También podríamos bajarlo algo más, buscando unos pesos con números algo más redondos (125 kg nitrato de calcio y 20 L ácido nítrico) pero siempre recalculando para no descompensar los aportes a la solución nutritiva de ambos abonos y recalculando

Además habría que tener en cuenta en algunos automatismos que habría que aumentar ligeramente la inyección de ese tanque para no descompensar los aportes del resto de abonos de los otros tanques.

$$\frac{17.5 \text{ (carga inicial para lograr concentración en SN}}{15 \text{ (carga final)}}$$

= 1.17 veces habría que aumentar la inyección para lograr la concentración deseada de nitrato de calcio y de ácido nítrico.

6.3. Otras cuestiones de manejo de los tanques de soluciones madre.

Existe una relación entre el tamaño de los tanques, el tiempo que tardan en vaciarse y la concentración de las soluciones madre. Teniendo en cuenta los dos últimos factores:

- No es recomendable preparar soluciones madre que estén durante periodos prolongados en los tanques (considerando que para soluciones madre muy concentradas, este periodo sería un máximo de una 1 semana y para las más diluidas de hasta 1 mes) ya que los posibles problemas de precipitación se van agravando con el tiempo.

- La solución madre debe estar lo suficientemente concentrada para que no haya que reemplazarla en muy poco tiempo. La concentración de las soluciones madres debería permitir que duraran al menos 1 día.

El tercer factor que se ha de tener en cuenta es el volumen de esos tanques. La capacidad de los tanques está relacionada a la superficie y a los cultivos en concreto, en función de su demanda de fertilizantes. La capacidad de los tanques es un parámetro que se calcula a priori cuando se diseña la instalación y por ello suele ser un valor fijo en los cálculos.

Para calcular el tiempo que durarían los tanques, se debe saber la cantidad diaria de agua con la que se riega, bien con los datos de contadores, o a partir

de los caudales de los emisores y el tamaño de las parcelas. Con ese volumen, se elige uno de los abonos y se multiplica la concentración en la solución nutritiva por el volumen diario de riego. Este valor sería el gasto diario. Finalmente se divide la cantidad presente en la solución madre de ese fertilizante entre ese valor, obteniendo la duración.

Ejemplo 6.3.1: **Se trabaja en una finca que tiene un total de 100.000 plantas, donde se están realizando 10 riegos de 3 minutos. A cada conjunto de dos plantas le corresponde un gotero de 3 l/h. El tanque limitante donde está el sulfato potásico tiene una concentración de 45 kg/1000 L y el aporte a solución nutritiva es de 2.56 mmol/L de K_2SO_4. Todos los tanques tienen la misma relación de inyección. Se desea conocer la frecuencia de carga de los tanques de solución madre para capacidades de 1000 y 500 L.**

En primer lugar calculamos el gasto diario de solución nutritiva:
100.000 plantas. 3L/h. 0.5 goteros/planta=150.000 L/h=150 m^3/h; 150 m^3/h. 0.5 h/día=75 m^3/día

En segundo lugar, calculamos el gasto diario de sulfato potásico.
La cantidad de sulfato potásico a aportar sería: 2.56 mmol/L . 174.3 = 446 mg/L = 446 g/m^3 = 0,446 kg/m^3
El consumo en un día sería 0,446 kg/m^3. 75 m^3/día = 33.45 kg de K_2SO_4/día.

Podríamos calcular cuánto se ha concentrado la solución madre:

$$\frac{45}{0{,}446} = 100.9 \sim 100 \text{ veces se concentra la solución nutritiva}$$

Para el caso de los tanques de 1000 L: Con los datos anteriores y con la concentración en la solución madre (45 kg/tanque de 1000 L), la duración sería:

45 kg / 33.45 kg = **1.34 días para tanques de 1000 L.**

Si este periodo es muy bajo se puede aumentar la concentración en el tanque teniendo como límite la solubilidad máxima del sulfato potásico.

En el caso del ejemplo, el sulfato potásico estaría solo en el tanque por lo que se podría concentrar la solución sin problemas hasta 70 kg/1000L , modificando las inyecciones. En este caso, pasaríamos de concentrar 100 veces a:

$$\frac{70}{0{,}446} = 1{,}56;\ 156 \text{ veces}$$

La duración estimada sería 70 / 33.45 = 2.09 días.

Si tenemos tanques de 500 litros y manteniendo la concentración (45 kg/1000L), tendríamos 22.5 kg/tanque,

22.5 kg en el tanque / 33.45 kg/día = **0.65 días para tanques de 500 L.**

En este caso, habría que llenar los tanques más de 1 vez al día. Tendríamos que ir a concentrar más los tanques de solución madre, teniendo de nuevo que podríamos concentrar sin problemas hasta 35 kg de sulfato potásico por tanque de 500 L. En este caso, la duración de los tanques sería 35/33.45 = 1.04 días.

En el caso de no poder concentrar más las soluciones madre, la siguiente opción sería tener que cambiar los tanques a otros de mayor volumen, lo que puede ser un problema cuando las instalaciones son pequeñas. En otro caso, habrá que colocar los tanques fuera del inmueble.

En el caso que haya tanques con diferentes relaciones de inyección, habría que hacer el cálculo con el que tenga el valor más alto, ya que se gastará rápido (mayor relación de inyección).

El orden en que se disuelven los abonos en un tanque sería primero el ácido y luego el resto en orden inverso a su solubilidad: de menos a más solubles. Si se añade nitrato amónico (o en menor medida, potásico) debe tenerse en cuenta la posible bajada de temperatura que pueda afectar a la disolución de los otros elementos.

Por lo general, se llenan de agua los tanques hasta la mitad, se aplica lentamente el ácido concentrado para evitar salpicaduras y luego se disuelve el resto de abonos, de menos a más solubles, aprovechando para terminar de llenar. La carga es uno de los procesos donde peores consecuencias puede tener un accidente.

En el caso de no usar ácidos, se llena con agua hasta dos tercios, se añade el abono, no demasiado rápido, para que se vaya disolviendo. Los microelementos se pondrían en último lugar, tras comprobar que no habrá problemas con el pH.

Cuando se aportan varios abonos en cada tanque es muy importante trabajar de forma cuidadosa para evitar olvidar la adición de alguno o añadirlo dos veces. Es importante marcar los tanques para evitar que se pongan los abonos que no corresponden (figura 34 izquierda).

CAPÍTULO 7

ALGUNAS CONSIDERACIONES PRÁCTICAS SOBRE EL MANEJO DE SISTEMAS DE FERTIRRIGACIÓN

La bondad de un automatismo de fertirrigación depende, entre otras cosas, de que las sondas de pH y CE funcionen correctamente. Esto, a su vez, depende de la colocación y del mantenimiento de las sondas.

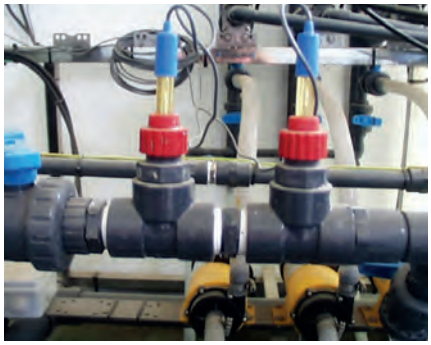


Figura 29: Cabezal con doble sonda de pH.

Las sondas deben estar colocadas de forma que la mezcla entre los abonos y el agua de riego sea lo más homogénea posible y que la reacción entre los ácidos y el bicarbonato se realice. De esa forma, las lecturas serán más fiables. En sistemas con tanque de mezcla están en un sistema paralelo (ver figura 19). En sistemas de inyección directa, se coloca algún elemento mezclador dentro de la tubería aguas arriba o se instalan tras un tramo relativamente largo. Normalmente la inyección en paralelo se conecta a la instalación de forma que la reimpulsión está aguas arriba de la entrada del "bypass" para ayudar a un mejor mezclado y a que la lectura de las sondas se realice en la solución ya mezclada.

Además de los controles rutinarios en la explotación de que la solución en los emisores corresponde a los valores de consigna, las sondas deben revisarse de forma periódica, sobre todo las de pH. Debe tenerse cuidado que no pasen por las sondas soluciones en las que se estén inyectando de soluciones madre con materia orgánica porque las ensucian muy rápidamente. En algunas instalaciones, las sondas se duplican para tener una mayor seguridad (figura 29).

La comprobación de las medidas (pH, CE, volumen aportado) debe hacerse tanto sobre el equipo de fertirrigación como en campo, que sería el valor realmente importante. Estas medidas nos indican la bondad del cálculo de la solución como del funcionamiento del sistema de inyección. Para ello debería comprobarse, como mínimo, el volumen del riego, la CE y el pH en diferentes emisores de la explotación.

En cultivos sin suelo esta comprobación debe hacerse de forma diaria, comprobándose en todas las unidades operacionales de riego. En el caso de cultivos en suelo, debería hacerse siempre después de cambiar la solución, siendo recomendable un control periódico.

Para poder realizar este control se debe disponer de medidores de pH y Conductividad (Figura 30). Estos aparatos deben tener un mantenimiento correcto, ya que en caso contrario se podrían cometer errores graves en el seguimiento:

- Los pHmetros normalmente deben calibrarse cada vez que se encienden. En el caso que el pHmetro no se calibre de forma correcta, puede ser mejor medir el pH de forma aproximada con papel indicador de color que en función del color nos dan un valor del pH (Figura 30). Por otra parte, es recomendable elegir un pHmetro con un electrodo de bajo mantenimiento.

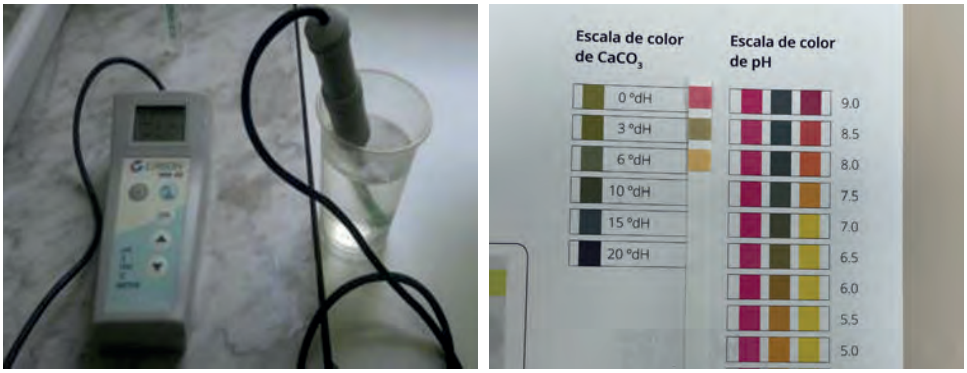


Figura 30: Arriba: Multímetro (medidor de pH y CE en la misma sonda. Derecha Papel indicador de pH de 3 colores

- Los CEmetros suelen ser bastante estables, pudiendo mantener la calibración durante meses. El electrodo es muy sencillo.

En los últimos años, los sistemas de análisis rápido en campo se han vuelto más asequibles y menos complicados de utilizar, como los electrodos selectivos de iones, conocidos a veces como ISE (figura 31). Las concentraciones de nitratos, fosfatos, potasio, sodio y en menor medida de calcio se pueden obtener sin demasiados problemas con esta tecnología. Sin embargo, como en el caso de los pHmetros, la bondad de sus resultados es muy dependiente de la correcta calibración y mantenimiento de los equipos.



Figura 31: Maletín con sensores de pH, CE, nitratos, calcio, potasio y sodio

Junto con esta comprobación rutinaria debe hacerse siempre un control visual del cultivo tras la realización de la solución para comprobar si hay problemas.

Las realizaciones de análisis periódicos de las soluciones nutritivas dan las concentraciones que realmente se están aportando al cultivo. Los análisis de drenajes o de los extractos saturados de los suelos, así como los foliares pueden ayudar a ir ajustando las concentraciones. La utilización de los sistemas de cuadernos de campo puede detectar a posteriori la relación entre uso de soluciones nutritivas y producciones o factores de calidad.

Por otra parte, en algunos casos se pueden observars comportamientos anómalos en las lecturas de las sondas que no provienen de una falta de mantenimiento:

- Si la solución madre está muy concentrada, el sistema de inyección puede encontrar problemas para mantener la CE consigna constante: la adición de sales en la inyección de un solo pulso es muy grande, sube mucho la CE, deja de inyectarse, hasta que cae a valores inferiores en que vuelve a introducirse una nueva embolada. Este problema es importante sobre todo

en riegos de corta duración, donde será complicado alcanzar los valores de CE consigna.

- Si la solución de ácido está muy concentrada, y en aguas salinas y con altos contenidos de bicarbonatos cuando se pretende una CEconsigna baja, al inyectarse ácido, sube momentáneamente la CE hasta el valor de consigna y el sistema responde prácticamente no inyectando fertilizantes del resto de los tanques. Como en el caso anterior, el problema es más grave en riegos de baja duración.

La concentración en el tanque de ácido no tienen problemas de solubilidad y no suele ser tan relevante de calcular como la de los otros tanques ya que el consumo dependerá sólo de la alcalinidad del agua de riego. Normalmente se suele usar una concentración similar a la del resto de tanques (si no cambia el agua de riego, el consumo de solución madre sería similar al resto) o un múltiplo de las capacidades de los envases usados, facilitando su manejo y evitando riesgos asociados a la medida:

- Por una parte, la concentración debe ser lo suficientemente alta para que el volumen del tanque no se consuma muy rápido.

- Por otra parte, si se observan descensos muy bruscos de pH durante el riego, la concentración en los tanques es muy alta; con pequeños volúmenes de inyección de ácido concentrado, el pH baja bruscamente. Debería bajarse esa concentración.

La regulación del pH puede provocar descompensaciones en la solución nutritiva ante cambios en la alcalinidad del agua de riego. Hay que tener en cuenta que si se usa ácido nítrico, una bajada de 1 mmol/L de alcalinidad supone un aumento de 1 mmol/L de nitratos. Por esta misma razón no se suele usar ácido fosfórico en el tanque de ácido, ya que requeriría un agua con una alcalinidad baja (menor de 1.5 – 2.0 mmol/L) y muy estable para evitar variaciones muy significativas en los aportes de fosforo.

Suele recomendarse añadir parte del ácido necesario en los otros tanques para que la bajada del pH no recaiga exclusivamente sobre el tanque de ácido.

Figura 32: Tanque 2000L

Una posibilidad sería colocar alrededor de un 25% de los ácidos en el tanque comandado por pH y distribuir el resto en los otros tanques, pero habría que estudiar caso a caso.

Por otro lado, puede ser recomendable situar una cabeza inyectora aguas debajo del sistema principal para poder adicionar por ejemplo productos fitosanitarios (evitando que pasen por el proceso de mezcla donde puede haber cambios de pH bruscos), materias orgánicas líquidas (que podrían averiar las sondas de pH o que tengan un aporte de CE muy bajo) o en algunos casos, microelementos. Normalmente esta cabeza inyectora trabaja de forma volumétrica.

Como se comentó arriba, la capacidad de los tanques está relacionada con la superficie y los cultivos en concreto, en función de su demanda de fertilizantes. La capacidad de los tanques es un parámetro que se calcula a priori cuando se diseña la instalación.



Figura 32: Tanque 2000L

Uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta a la hora de dimensionar las edificaciones donde se situarán los cabezales es el número y dimensiones de los tanques de solución madre (figura 32). Un tanque de 1000 litros suele tener un alto de 1.4 a 1.5 m y un diámetro de 1.0 a 1.2 m. La superficie para una edificación para un cabezal con 4 tanques de 1000 L, sistema de inyección y un equipo de filtrado no muy potente podría ocupar aproximadamente unos 65 m^2.

Junto a los tanques, hay que tener en cuenta la instalación de algún tipo de escalón o muelle para facilitar la carga de los abonos (figura 33). Muchas veces este espacio sirve de almacén a corto plazo de los fertilizantes.



Figura 33: Izquierda: Tanques con muelle de carga superior. Derecha: Con 2 escalones para facilitar la carga de abono

Es importante tener en cuenta en el diseño es facilitar la logística de posibles limpiezas períodicas de los tanques. Por ejemplo, los tanques suelen colocarse sobre una estructura que permita el uso de válvulas de limpieza en el fondo.

Otra cuestión a tener en cuenta a la hora de diseñar el cabezal es la presencia de zonas de contención de posibles derrames (Figura 34). Hay que ceñirse a la normativa vigente en Prevención de Riesgos Laborales. En el caso de usar ácidos concentrados a granel, deben usarse tanques homologados y todas las medidas de control de derrames establecidas.



Figura 34: Tanques de solución madre con paredes de contención

Las impurezas de los abonos y los posibles precipitados hacen que se coloquen pequeños filtros en las salidas de la aspiración de la inyección para evitar que esos precipitados terminen averiando las cabezas inyectoras y/o las electroválvulas. El filtrado es imperativo si se están inyectando productos con cantidades apreciables de elementos no solubles, como serían los tés de compost, purines y similares, para evitar problemas en las electroválvulas, bombas volumétricas y otros accesorios. Para ello, se recomienda un tamaño de filtrado de 120 micras (130 mesh). También es recomendable poner sistemas de prefiltrado anteriores para evitar colmataciones frecuentes de los filtros.

El uso de agitadores (mecánicos o sopladores (figura 35)) siempre es muy recomendable cuando se preparen las soluciones madre para ayudar en la disolución, especialmente con abonos que tardan en disolverse como el sulfato potásico o el nitrato cálcico. En soluciones madre muy concentradas puede darse un gradiente de concentración, de abajo hacia arriba, con mayor concentración en la parte más baja, por lo que el uso de agitadores que mezclen en profundidad es de gran importancia para que la inyección sea constante en el tiempo.



Figura 35: Elemento impulsor (turbina) de un soplador

Debe tenerse en cuenta que si el tanque tiene una cantidad apreciable de precipitados en el fondo (figura 36) el agitado los pondría en suspensión y pasarían al filtro a la salida del tanque. Por lo tanto, no es recomendable el agitado justo antes de un riego para evitar el riesgo de obturaciones.

Cuando se usan soluciones madre muy concentradas se puede producir un gradiente de abajo a arriba. Esto hace que pueda ser recomendable en ese caso que se realice un ciclo de agitado un tiempo antes del comienzo de la inyección para igualar la concentración.



Figura 36 Insolubles en el fondo de un tanque de solución madre. Las tuberías en el fondo corresponden al sistema de agitación mediante sopladores

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Alarcón Vera, A. 1998. **Modificaciones de conductividad eléctrica en fertirrigación**. *Horticultura,* 130: 50-53.

Alarcón Vera, A. 2006. **Cálculo y preparación de soluciones nutritivas para cultivos sin suelo** p. 53-67. En: Alarcón A. (Ed.) Cultivos sin suelo. Compendios de Horticultura. 17. Ediciones de Horticultura. Reus.

Ayers, R.S. y D.W. Westcot. 1985. **Water quality for agriculture**. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Roma

Bar Yosef, B. 1999. **Advances in fertigation**.*Advances in Agronomy,* 65: 1-77.

Baixauli, C. y Maroto. J.V. 2016. **Broculis, coliflores y coles**. p. 371-374. En: Maroto, J.V. y Baixauli, C. (Coord.). Cultivos hortícolas al aire libre. CAJAMAR Caja Rural. Almería. 786 p.

Bariya, H.M.; Bagtharia, S. y Patel, A. 2014. **Boron: a promising nutriente for increasing growth and yield of plants.** 153-170. En: Hawkesford, M.J. ; Kopriva, S. y De Kok, L. (Eds). Nutrient use efficiency in plantas. Springer.

Bragg, N. 1995. **Growing media.** Grower Handbook 1.Grower Books, Nexus Media Ltd. Kent. 106 pp.

Cadahía, C. (Ed.) 1998. **Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales.** Mundi-Prensa. Madrid. 475 pp.

California Fertilizer Association. 1995. **Manual de fertilizantes para horticultura**. Limusa. Méjico. 297 p.

Cánovas, F. y J.R. Díaz. (Eds.) 1993. **Curso superior de especialización sobre cultivos sin suelo**. Instituto de Estudios Almerienses, Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. Almería. 372 pp.

Casas, A. y E. Casas. 1999. **El análisis de suelo – agua – planta y su aplicación a la nutrición de los cultivos hortícolas en la zona del sureste peninsular.** Caja Rural de Almería. Almería 250 p

Castilla, N. 2005. **Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo.** Mundi-Prensa. Madrid. 462 p.

Charpentier, S. 1985. **Equilibres chimiques et précipitation dans les solutions nutritives.** *PHM Revue Horticole,* 258: 19-24

Chojnacka, K., A. Witek, K. Moustakas, D. Skrzypczak, K. Mikula y M. Loizidou. 2020. **A transition from conventional irrigation to fertigation with reclaimed wastewater: prospects and challenges**. *Renewable and Sustainable energy Reviews*, 130: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109959

Combrink, N.J.J. 2019. **Nutrient solution management**. Department of Agronomy. Stellenbosch University. http://www.boetniek.co.za/wp-content/uploads/2021/08/Nutrient-Solution-Management-E-versionFin.pdf

Consejerías de Agricultura, Ganadería y Pesca y Alimentación y de Transición Ecológica, Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial. 2021. **Orden conjunta de 22 de abril de 2021, por la que se modifica el Programa de Actuación para prevenir y reducir la contaminación causada por los nitratos de origen agrario aprobado por Orden de 27 de octubre de 2020.** Boletín Oficial de Canarias nº 89 de 3/5/2021. 20182–20219

https://www.gobiernodecanarias.org/cmsgobcan/export/sites/agricultura/galerias/doc/contaminacion/boc-a-2021-089-2335.pdf

Contreras, J.I.; Baeza, B.; Cánovas, G. y Alonso, F. 2018. **Fertirrigación del cultivo de calabacín en invernadero: influencia sobre el desarrollo vegetativo y la absorción de nutrientes**. XLVIII Seminario de Técnicos y Especialistas en Horticultura. Santander. 11- 14 junio 2018.

Domínguez, E. y C. Nogueroles. 2012. **Fertirrigación**. p. 115-126. En. Nogueroles, C. (Ed). Calidad y sostenibilidad en el cultivo de la platanera en Canarias. ASPROCAN. 223 p.

Haifa. 2019. **Nutritional recommendations for Potato**. Disponible en línea en https://www.haifa-group.com/files/Guides/Potato.pdf

Hernández, J.M., J. Mascarel, S. Duarte, A. Pérez, J.L. Santana y A.R. Socorro. 1980. **Seminario sobre interpretación de análisis químicos de suelos, aguas y plantas**. Centro Regional de Extensión Agraria de Canarias.

Hernández Moreno, J. M. 2021. **Suelos volcánicos de Canarias: propiedades específicas e implicaciones agronómicas y ambientales. Monografías agroambientales 1.** Edita: Cabildo Insular de Tenerife. Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca. Servicio Técnico de Agricultura y Desarrollo Rural. 167 pp.

Incrocci, L. Massa, D. y A. Pardossi. 2017. **New trends in the fertigation management of irrigated vegetable crops.** *Horticulturae,* 32: https://doi.org/10.3390/horticulturae3020037

García, M. y T. Moreno. 2010. **Diez años de mejora en la fertirrigación de los cultivos sin suelo**. Finca Experimental Nacla-Puntalón. Caja Rural de Granada. 98 p.

Gímenez Montesinos, M. 1996. **Fertilizantes para la fertirrigación por goteo**. III Jornadas de Fertilización de los Cultivos Agrícolas. Santa Cruz de Tenerife. 29-30 de mayo de 1996.

Grieve, C.M., S.R. Grattan y E.V. Maas. 2012. **Plant salt tolerance**. En: Wallender, W.W. y K.K. Tanji (Eds). Agricultural salinity assessment and management. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Reston VI. EEUU

Joubert, G., Hutin, C.; Leteinterier, J.; Moras, P; Navez, B.; Odet, J.; Pelletier, J.; Perus, M. y Stengel, B. 1997. **Laitues**. Ctfil. Paris. 281 p

Kafkaki, U. y J. Tarchitzky. 2011. **Fertigation: a tool for efficiente fertilizer and water management**. International Fertilizar Industry Association. International Potash Institute. Paris.138 p.

Khalid Mahmud Khokhar. 2019. **Mineral nutrient management for onion bulb crops – a review**, *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1613935

Koch, M.; Nauman, M. Pawelzik, E.; Gransee, A. y Thief, H. 2020. **The importance of nutrient management for potato production Part I: plant nutrition and yield.** *Potato Research*, 63: 97-119.

De Kreij; C: 1995. **Latest insights into water and nutrient control in soiless cultivation**. *Acta Horticulturae,* 408: 47-61.

Lahav, E. y Kadman, A. 1980. **Fertilizing for high yield avocado**. Bullletin International Potash Institute Bulletin nº6. Bern. Switzerland. 26 p.

Lahav, E. y Turner, D.W. 1989. **Fertilizing for high yield-banana**. 2º Ed. International Potash Institute Bulletin nº7. Bern. Switzerland. 62 p.

Lemaire, F., A. DArtigues, L.M. Riviere, S. Charpentier y P. Morel. 2005. **Cultivos en macetas y contenedores**. Mundi-Prensa. INRA. Madrid. 210 p.

Lieth, J.H. y Oki, L.R. B. 2019. **Irrigation in soilless production.** p. 387-424. En: Raviv, M., Lieth, J.H. y Bar Tal, A. (Eds). Soilless culture: theory and practice. Academic Press. 691 p.

López, S., C. Correas y J.J. Lucena. 2012. **Novel chelating agentes as manganese and zinc fertilizers: characterisation, theoretical speciation and stability in solution**. *Chemical Speciation and Bioavailibity*, 24 (3): 147-158.

Lucena, J. J. 2009. **El empleo de complejantes y quelatos en la fertilización de micronutrientes** *Revista Ceres*, (56) 4: 527-535.

Van der Lugt. G. (Ed), 2017. **Nutrient solutions for greenhouse crops.** Yara. Azko Nobel. SQM. Eurofins. http://geertenvanderlugt.nl/wp-content/uploads/2016/09/171221nutrient-solutions-for-greenhouse-crops.pdf

Maas, E.W. y S.R. Grattan. 1999. **Crop yields as affected by salinity.** En: Skaggs, R.W. Y J. Van Schilfgaarde (Eds). Agricultural Drainage. Agronomy Monograph, 38. ASA, CSSA, SSSA. Madison. EE.UU.

Marchal J. y Mallesard, R. 1979. **Comparison des immobilisations minerale de quatre cultivars de bananiers a fruits pour cuisson et de deux 'Cavendish'**. Fruits, 34 (6): 373-39

Marschner, P. 1995. **Mineral nutrition of higher plants**. 2ª Edición. Academic Press. London. 889 p.

Martínez, E. y M. García. 1993. **Cultivos sin suelo: Hortalizas en clima mediterráneo**. Compendio de Horticultura nº 3. Ed. de Horticultura. Reus. 123 pp.

Mellado-Vázquez, A., S. Salazar, R. Goenaga y A. López. 2020. **Survey of fruit nutrient removal by mango (Mangifera indica L.) cultivars for the export market in various producing regions of Mexico**. *Terra Latinoamericana,* 37: 437-447.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). 2010. **Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España**. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. 259 p.

Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. 2022**. Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios.** Boletín Oficial del Estado nº 312 de 29/12/2022. 188873–188916.https://www.boe.es/boe/dias/2022/12/29/pdfs/BOE-A-2022-23052.pdf

Norvell, W.A. 1983. **Equilibrio de los quelatos métalicos**. p. 127-152. En:Mortvedt, J.J., P.M. Giordano y W.L. Lindsey (Eds.) Micronutrientes en agricultura.AGT Editor. México.

Van Os, E.A., Gieling, Th.H. y Lieth, J.H. 2019. **Technical equipment in soilless production sytems.** p. 587-636. En: Raviv, M., Lieth, J.H. y Bar Tal, A. (Eds). Soilless culture: theory and practice. Academic Press. 691 p.

Pato, A., F. Condés, M. Noguera, F.E. Vicente y A. Soria. 2006. **Fertirrigación en la zona vulnerable del Campo de Cartagena**. Consejería de Agricultura y Agua. Región de Murcia. 40 p.

Peet, M.M. 2005. **Irrigation and fertilization**. p 171-198. En: Heuvelink, E. (Ed). Tomatoes. Crop Production Science in Horticulture. CABI Publishing. Oxford.

Pérez, J.; Santos, B.; Ríos, D.; Cruz, J.L. y Trujillo, L. 2008. **Absorción de macronutrientes en tomate de exportación cultivado en picón (ceniza volcánica) en Tenerife (Islas Canarias).** *Actas de Horticultura,* 50, 241-246

Pomares, F. 2008. **La fertilización y la fertirrigación, programas de nutrición, influencia sobre la programación**. *Actas de Horticultura,* 50, 133-143

Reed, D.W. 1996. **A grower's guide: water, media and nutrition for greenhouse crops**. Ball Publishing. Batavia IL. EE.UU. 314 p.

Richa, A., Fizir, M. y Touil, S. 2021 **Advanced monitoring of hydroponic solutions using ion-selective electrodes and the internet of things: a review**. *Environmental Chemistry Letters,* https://doi.org/10.1007/s10311-021-01233-8

De Rijck y E. Schrevens. 1997. **pH influenced by the elemental composition of nutrient solutions**. *Journal of Plant Nutrition,* 20 (7-8): 911-923

Rincón, L.; Pellicer, C.; Saez, A.; Abadía, A.; Pérez, A. y. Marín, C. 2001. **Crecimiento vegetativo y absorción de nutrientes de la coliflor**. *Investigación Agraria: Producción Vegetal,* 16(1): 119-130.

Rincón, L. 2005. **La fertirrigación de la lechuga Iceberg.** IMIDA. Región de Murcia. Murcia. 183 p.

Ríos, D. y B. Santos. 2012. **Manejo práctico del riego en cultivo sin suelo**. Información Técnica. Servicio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cabildo de Tenerife. 6 p.

Rodrigo, J., J.M. Hernández, A. Pérez y J. González. 1997. **Riego localizado**. Mundi-Prensa. 407 p.

Ross, J. 1998. **Hydroponic tomato production.** Casper Publishing. Narrabeen. Australia. 207 pp.

Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A. Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R. y Cesco, S. 2019. **Hydroponic Solutions for Soilless Production Systems: Issues and Opportunities in a Smart Agriculture Perspective**. *Frontiers in Plant Science*. 10. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923

Santos, B., D. Ríos, F. Rodríguez y J.L. Cruz. 2020. **Absorción de macronutrientes en en fresa cultivada en fibra de coco en Tenerife (Islas Canarias).** P. 166-174. En: Pereira, J.A.; Rodrigues, B. y Ramos, A.C (Eds). Actas Portuguesas de Horticuluta. VIIII Congresso Ibericio de Ciencias Hortícolas. Asociaçao Portuguesa de Horticultura.Lisboa.

Santos, B. y D. Ríos. 2013. **El picón como sustrato para cultivo sin suelo**. Información Técnica. Servicio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cabildo de Tenerife. 14 p.

Santos, B. y D. Ríos. 2023. **Physical Properties of the Canary Islands' Volcanic Pyroclastic Materials as Horticultural Substrates**. Horticulturae, Vol. 9, Núm. 4. https://doi.org/10.3390/horticulturae9040414

Segura, M.L. 2012. **Gestión sostenible de la reutilización de aguas residuales urbanas en los cultivos hortícolas.** IFAPA. Almería. 129 p.

Sonneveld, C. 1989. **A method for calculating the composition of nutrients solutions for soilless cultures**. 3ª Ed. traducida. Voedingsoplossingen glastuinbouw nº 10. Glasshouse Crops Research Station. Naaldwijk. 13 p.

Sonnenveld, C. y N. Straver. 1994. **Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates.** 3ª Ed. traducida. Voedingsoplossingen glastuinbouw nº 8. Glasshouse Crops Research Station. Naaldwijk. 45 p.

Sonnenveld, C y Voogt, W.2009. **Plant nutrition of greenhouse crops**. Springer. Dordrecht. 431 p.

Steiner, A.A. 1961. **A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition**. *Plant and Soil*, 15 (2): 134-154.

Steiner, A.A. 1988. **La composición de las soluciones nutritivas**. *Horticultura*, 41: 97-103.

Steiner, A.A. 1996. **Principles of plant nutrition by a recirulating nutrient solution.** ISOSC 8th International Congress of Soiless Culture Proceedings: 505-513.

Thompson, R., I. Decour, E. Berckmoes Y E. Stavridou. 2018**. The fertigation bible: technologies to optimise fertigation in intensive horticulture. Transfer of Innovative techniques for sustainable water use in fertigated cropos (Fertinnowa)**. http://www.fertinnowa.com/the-fertigation-bible/

Urrestarazu, M. 2004. **Tratado de cultivo sin suelo**. 3ª Edición. Mundi-Prensa. Madrid. 914 p.

Voogt, W. y Bar Yosef, B. 2019. **Water and nutrient management and crops response to nutrient solution recycling in soilless growing systems in greenhouses**. p. 425-508. En: Raviv, M., Lieth, J.H. y Bar Tal, A. (Eds). Soilless culture: theory and practice. Academic Press. 691 p.

Weinert, M. y Simpson, M. 2016. **Subtropical banana production: matching nutrition requeriments to growth demands**. New South Wales Department of Primary Industries. https://www.musalit.org/seeMore.php?id=20017

Wreesmann, C. 1996. **Chelated micro-nutrients for soilless culture**. ISOSC 8th International Congress of Soiless Culture Proceedings: 559-572.

Yara. 2020. **Fertigation Manual**. Yara. https://www.yara.co.uk/siteassets/crop-nutrition/media/uk/uk-product-brochures/specialities/yara-fertigation-manual-2020.pdf/



Gobierno de Canarias

Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Soberanía Alimentaria.
Dirección General de Agricultura
Gobierno de Canarias

Área de Industria, Comercio, Sector Primario y Bienestar Animal
Cabildo Insular de Tenerife