



FERTIRRIGACIÓN

CON EXPERIENCIAS EN CÁLCULO

EL NUEVO
ECUADOR

Instituto Nacional de
Investigaciones Agropecuarias

FERTIRRIGACIÓN

CON EXPERIENCIAS EN CÁLCULO

Publicación miscelánea nro. 464



Instituto Nacional de
Investigaciones Agropecuarias



PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

Daniel Noboa Azín

MINISTRO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA

Júan Carlos Vega

DIRECTOR EJECUTIVO DEL INIAP

Raúl Jaramillo Velasteguí

AUTORES

Randon Stalin Ortiz Calle

Yamil Everaldo Cartagena Ayala

REVISIÓN TÉCNICA

Revisores internos

Comité de Publicaciones Estación Experimental Santa Catalina

Jorge Rivadeneira

Diego Peñaherrera

José Velásquez

Javier Garófalo

Comité de Publicaciones Administración Central

Dirección de Investigaciones

Dirección de Transferencia de Tecnología

Revisores externos

Pablo Álvarez - Universidad Nacional de Loja

Fabian Montesdeoca - Universidad Central del Ecuador.

BIBLIOGRAFÍA

Ortiz, R., & Cartagena, Y. (2024). Fertirrigación: con experiencias en cálculo. INIAP. Quito, Ecuador. Publicación miscelánea nro. 464.

DISEÑO

Unidad de Comunicación Social INIAP

Marco López Ordeñana

ISBN DIGITAL

Código 978-9942-22-626-6

Primera Edición, 2025

©Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).

Av. Eloy Alfaro N30-350 y Amazonas, Quito-Ecuador.

Teléfono: 593 2 256 7645

www.iniap.gob.ec

La reproducción parcial o total de esta publicación, en cualquier forma y por cualquier medio mecánico o electrónico, está permitida siempre y cuando sea citado correctamente.

DISTRIBUCIÓN GRATUITA

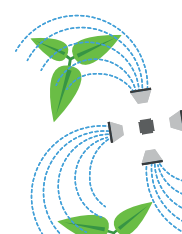
PROHIBIDA SU VENTA



Instituto Nacional de
Investigaciones Agropecuarias

INDICE DE CONTENIDO

Prefacio	23
Capítulo 1:	24
Fertirrigación	25
Capítulo 2:	27
Unidades de medida utilizadas en fertirrigación	28
2.1. Unidades de masa	28
2.2. Molaridad	28
2.3. Equivalente químico o normalidad	29
Capítulo 3:	36
Calidad del agua para riego	37
3.1. Norma de calidad del agua	37
3.2. Criterios principales	38
Capítulo 4:	44
Propiedades químicas de los suelos	45
4.1. Potencial hidrógeno	45
4.2. Conductividad eléctrica	50
4.3. Potencial osmótico	52
Capítulo 5:	54
Nutrientes utilizados por los cultivos	55
5.1. Los nutrientes y formas asimilables	55
5.2. Función de los nutrientes en los cultivos	56
5.3. Concentración de nutrientes en el tejido vegetal	57
5.4. Aplicación de los fertilizantes de acuerdo con el ciclo del cultivo	58
Capítulo 6:	59
Recomendaciones de fertilización	60
6.1. Interpretación de los análisis químicos de suelos	60
6.2. Fertilización a partir del análisis químico de suelos	62
6.3. Fertilización en base a la producción esperada	65
6.4. Fertilización para cultivos hidropónicos	66
6.5. Nutrientes en los estiércoles	67
6.6. Nutrientes en los bioles	67
Capítulo 7:	70
Fertilizantes	71
7.1. Información técnica	71
7.2. Composición química	74
Capítulo 8:	81
Cálculo de la fertilización	82
8.1. Relación de la dilución	83
8.2. Caudal del inyector de los fertilizantes	83
8.3. Relación de inyección o dilución	84
8.4. Volumen de agua y tanque	85
8.5. Peso y volumen de los fertilizantes	87



Capítulo 9:	90
Disolución de los fertilizantes	91
9.1. Tanques para las disoluciones	91
9.2. Compatibilidad de los fertilizantes	91
9.3. Preparación de una disolución	93
Capítulo 10:	95
Métodos de aplicación de los fertilizantes	96
10.1. Aplicación por volumen	97
10.2. Aplicación proporcional	99
10.3. Aplicación por control de la conductividad eléctrica	99
Capítulo 11:	100
Equipos de inyección de los fertilizantes	101
11.1. Inyectores hidráulicos	101
11.2. Inyector venturi	106
11.3. Grupos de bombeo (bomba)	109
11.4. Sistema Booster	110
11.5. Inyección en la cresta de un sifón	113
11.6. Inyección en la succión de una bomba	113
11.7. Fertiducto	113
11.8. Máquinas de fertirrigación	114
11.9. Equipo complementario	117
Capítulo 12:	118
Monitoreo de la solución del suelo	119
12.1. Equipo de medición manual	120
12.2. Monitoreo manual	122
12.3. Monitoreo en tiempo real	122
Capítulo 13:	125
Operación y mantenimiento	126
Capítulo 14:	127
Ejemplo de cálculo de la fertirrigación	128
14.1. Información de base	128
14.2. Conversión de las unidades de los análisis químicos de aguas	129
14.3. Dosis de nutrientes	130
14.4. Variables del riego	130
14.5. Peso de los fertilizantes	132
14.6. Concentración de nutrientes en el tanque y a la salida de los goteros	133
14.7. Disolución de los fertilizantes	134
14.8. Cantidad del ácido para regular el pH	135
14.9. Concentración de las sales a la salida de los goteros	136
14.10. Conductividad eléctrica a la salida del gotero	136
14.11. Programación de la inyección de los fertilizantes	136
14.12. Cantidad de nutrientes aplicados en cada gotero	137
Bibliografía	138
Anexos	142



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cálculo del peso molecular del nitrato de potasio.	29
Tabla 2. Peso atómico de los elementos químicos utilizados en fertirrigación.	29
Tabla 3. Cálculo del peso molecular del nitrato de calcio (tetrahidratado).	31
Tabla 4. Relación entre ppm y meq L ⁻¹ para los aniones y cationes.	32
Tabla 5. Peso molecular y equivalente químico de los fertilizantes.	32
Tabla 6. Conversión de unidades para análisis químicos de suelos (fila a columna).	34
Tabla 7. Conversión de nutrientes en los análisis químicos de suelos.	35
Tabla 8. Factores de transformación.	35
Tabla 9. Parámetros de los niveles guía de la calidad del agua para riego.	38
Tabla 10. Límites de calidad para aguas de uso agrícola.	40
Tabla 11. Calidad del agua en el sistema de riego Tumbaco – La Morita.	41
Tabla 12. Nutrientes aportados por el agua de riego.	42
Tabla 13. Producto de solubilidad para nutrientes.	46
Tabla 14. Necesidad de cal viva para incrementar el pH.	48
Tabla 15. Características químicas de los ácidos.	48
Tabla 16. pH óptimo para los cultivos.	50
Tabla 17. Unidades de medida de la conductividad eléctrica.	51
Tabla 18. Valores de CEs y su efecto sobre el rendimiento de los cultivos.	52
Tabla 19. Tolerancia relativa de los cultivos a la salinidad.	53
Tabla 20. Tolerancia relativa de los cultivos al sodio intercambiable.	53
Tabla 21. Forma asimilable y peso molecular de los nutrientes.	55
Tabla 22. Los nutrientes y su función en la planta.	56
Tabla 23. Concentración de nutrientes en el tejido vegetal.	57
Tabla 24. Duración de las etapas de crecimiento de los cultivos.	58
Tabla 25. Interpretación del potencial hidrógeno.	60
Tabla 26. Interpretación de iones presentes en suelos.	61
Tabla 27. Interpretación de los análisis químicos de suelos.	61
Tabla 28. Recomendaciones de fertilización para cultivos.	62
Tabla 29. Recomendaciones de fertilización para cultivos.	65
Tabla 30. Formulaciones de soluciones nutritivas.	66
Tabla 31. Formulación balanceada Steiner para cultivos hidropónicos.	66
Tabla 32. Contenido de nutrientes en los estiércoles.	67
Tabla 33. Contenido de nutrientes en el biol del estiércol de cuy.	67
Tabla 34. Fertilizantes, pureza y solubilidad.	71
Tabla 35. Proporción relativa de los nutrientes aportados por cada fertilizante.	72
Tabla 36. Concentración en porcentaje de los fertilizantes.	72
Tabla 37. Solubilidad (g L ⁻¹) de los fertilizantes en función de la temperatura.	73
Tabla 38. Fertilizantes (concentración 1% a 25 °C), pH y CE.	73
Tabla 39. Concentración del nutriente en relación a la CE.	74
Tabla 40. Concentración del nutriente en relación al pH.	74

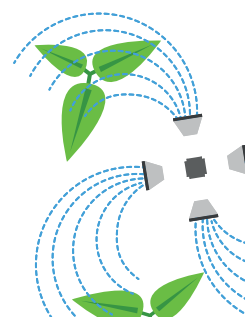


Tabla 41. Cálculo del porcentaje de nutrientes aportados por el nitrato de calcio.	75
Tabla 42. Factor de conversión de nutrientes aportados.	76
Tabla 43. Cálculo del porcentaje de calcio aportado por el óxido de calcio.	88
Tabla 44. Compatibilidad entre fertilizantes utilizados en fertirrigación.	91
Tabla 45. Parámetros técnicos de una bomba TMB.	103
Tabla 46. Parámetros técnicos de un Dosatron.	105
Tabla 47. Caudal motriz y de inyección de los inyectoros venturi.	107
Tabla 48. Rendimiento de un venturi.	108
Tabla 49. Nutrientes requeridos por el cultivo de pimiento.	128
Tabla 50. Análisis químico del agua de riego.	128
Tabla 51. Evapotranspiración real del cultivo de pimiento.	129
Tabla 52. Conversión de unidades del análisis de aguas.	129
Tabla 53. Dosis de nutrientes para aplicar en la fertirrigación.	130
Tabla 54. Cantidad de fertilizante a aplicarse a través de la fertirrigación.	133
Tabla 55. Concentración de los iones nutrientes en la salida del gotero.	134
Tabla 56. Compatibilidad entre los fertilizantes.	134
Tabla 57. Peso de los fertilizantes en los tanques.	135
Tabla 58. Distribución semanal de los nutrientes en el cultivo de fréjol.	143
Tabla 59. Nutrientes a aplicarse a través de la fertirrigación.	146
Tabla 60. Compatibilidad entre los fertilizantes.	146
Tabla 61. Distribución de los fertilizantes en los tanques A y B.	147
Tabla 62. Análisis químico del suelo.	149
Tabla 63. Conversión de unidades.	149
Tabla 64. Nutrientes para aplicarse a través del fertirriego.	150
Tabla 65. Análisis químico y físico del suelo.	152
Tabla 66. Análisis químico del agua de riego.	152
Tabla 67. Conversión de unidades del análisis químico de suelos.	152
Tabla 68. Conversión de nutrientes del análisis químico de aguas.	153
Tabla 69. Nutrientes a aplicarse a través de la fertirrigación.	153
Tabla 70. Concentración de los nutrientes a la salida del gotero.	157
Tabla 71. Fórmula de la solución nutritiva universal Steiner.	158
Tabla 72. Peso de los fertilizantes.	159
Tabla 73. Distribución de los fertilizantes en los tanques A y B.	159
Tabla 74. Información técnica del nitrato de calcio (Fernical).	165
Tabla 75. Información técnica del nitrato de amonio.	166
Tabla 76. Información técnica del fosfato mono amónico.	166
Tabla 77. Información técnica del fosfato mono potásico.	167
Tabla 78. Información técnica del sulfato de potasio.	168
Tabla 79. Información técnica del nitrato de potasio (Fernitrok).	169



INDICE DE FIGURAS

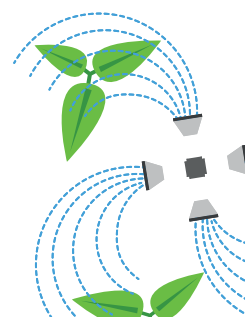
Figura 1. Escala de pH y de algunas soluciones.	45
Figura 2. Disponibilidad del zinc de acuerdo al pH del medio.	46
Figura 3. Disponibilidad del fósforo de acuerdo con el pH del medio.	47
Figura 4. Disponibilidad de los nutrientes en función del pH.	47
Figura 5. Diagrama de un cabezal típico de riego.	82
Figura 6. Tanques para disolver los fertilizantes.	86
Figura 7. Esquema de una instalación de tanques para disolver los fertilizantes.	86
Figura 8. Disolución de fertilizantes.	92
Figura 9. Disolución de fertilizantes para pequeñas explotaciones.	92
Figura 10. Agitadores mecánicos para la disolución de los fertilizantes.	93
Figura 11. Equipos mecánicos para la disolución de los fertilizantes.	94
Figura 12. Esquema del proceso de riego y fertirrigación.	96
Figura 13. Distribución del agua de riego y los fertilizantes.	97
Figura 14. Distribución del riego y la inyección de los fertilizantes disueltos.	98
Figura 15. Fertirrigación proporcional.	99
Figura 16. Inyector Fertic.	102
Figura 17. Inyector TMB.	103
Figura 18. Inyector hidráulico.	104
Figura 19. Inyector Dosatron.	106
Figura 20. Inyector venturi.	106
Figura 21. Esquema de inyector venturi.	107
Figura 22. Bomba vertical.	109
Figura 23. Esquema de instalación de un grupo de bombeo para fertirrigación.	109
Figura 24. Esquema de un sistema Booster.	110
Figura 25. Distribución de las presiones en un sistema Booster.	111
Figura 26. Venturis en paralelo.	111
Figura 27. Esquema de la instalación de un Booster con dos venturis en paralelo.	112
Figura 28. Esquema de instalación de un venturi.	112
Figura 29. Inyección en la cresta de un sifón.	113
Figura 30. Inyección en la succión de una bomba.	113
Figura 31. Control de pH y CE en línea.	114
Figura 32. Control de pH y CE con tanque mezclador.	115
Figura 33. Máquina de fertirrigación DISHUNIT.	115
Figura 34. Máquinas de fertirrigación.	116
Figura 35. Filtro para mejorar el mezclado del agua con los fertilizantes.	117
Figura 36. Silo o tanque de mezclado de los fertilizantes.	117
Figura 37. Succionador.	120
Figura 38. Materiales y equipos para el monitoreo manual.	120
Figura 39. Monitoreo manual de CE y nitratos.	122
Figura 40. Equipo para monitoreo en tiempo real.	122
Figura 41. Monitoreo en tiempo real de pH, CE y nitratos.	123
Figura 42. Monitoreo manual de pH, CE y nitratos.	123
Figura 43. Esquema del sistema de riego.	161

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Cálculo de la fertirrigación, con tablas guías de fertilización.	143
Anexo 2. Cálculo de la fertirrigación, con análisis químicos de suelos.	149
Anexo 3. Cálculo de la fertirrigación, con análisis químico de suelos y aguas.	152
Anexo 4. Cálculo de la fertirrigación, con nutrientes aportados por un biol.	156
Anexo 5. Cálculo de la solución madre utilizando un sustrato.	158
Anexo 6. Cálculo de la relación de inyección de los fertilizantes.	161
Anexo 7. Cálculo de las ecuaciones ajustadas con el peso de los fertilizantes.	165

ABREVIATURAS

Área	superficie (ha).
C	concentración de un ión.
CE	conductividad eléctrica en el agua de riego (dS m^{-1}).
CEs	conductividad eléctrica de la solución del suelo (dS m^{-1}).
CG	concentración del nutriente a la salida del gotero (mg L^{-1}).
CFG	concentración deseada del nutriente a la salida del gotero (mg L^{-1}).
CT	concentración de un nutriente en el tanque (mg L^{-1}).
CTS	cantidad de sales acumuladas en el suelo (kg ha^{-1}).
Cl	concentración del ión.
Da	densidad aparente (g cm^{-3}).
DA	densidad del ácido (g cm^{-3}).
Dr	densidad relativa (g cm^{-3}).
Efa	eficiencia de aplicación (%).
eq	equivalente químico (g).
ETr	evapotranspiración real (mm d^{-1}).
f	factor de ajuste (peso de una hectárea).
Ft	factor de conversión de unidades.
Fr	frecuencia de riego (días).
Far	frecuencia a regar (días).
H+	concentración de los iones hidrógeno (meq L^{-1}).
H	carga hidráulica (m).
IA	porcentaje de ingrediente activo (%).
Ip	intensidad de precipitación (mm h^{-1}).
kg ha^{-1}	kilogramo por hectárea.
meq L^{-1}	mili equivalente por litro.
meq 100 mL^{-1}	mili equivalente químico por 100 mililitros.
meq 100 g^{-1}	mili equivalente químico por 100 gramos de suelo.
MOS	contenido de materia orgánica (kg ha^{-1}).
MOS%	contenido de materia orgánica (%).
mmol L^{-1}	mili mol por litro.
mol L^{-1}	mol por litro.
NA	porcentaje de nutriente aportado (%).
ND	nitrógeno disponible (kg ha^{-1}).
NL	número de laterales de riego por hilera.
Nf	Número de fertilizaciones.
NT	contenido de nitrógeno total (kg ha^{-1}).
oH	Concentración de bicarbonatos.
P	pureza de un fertilizante o ácido (%).
Peso	peso del nutriente en el suelo (kg ha^{-1}).
PF	peso del fertilizante (kg).
PFg	peso del fertilizante aplicado a través del gotero (mg).
pH	potencial hidrógeno.
pHi	pH inicial del agua de riego.
pHf	pH deseado a la salida del goteo.
Pi	peso del ion (kg).



PM	peso molecular (g).
PN	peso del nutriente en la fórmula del fertilizante (g).
PO	potencial osmótico (centibares).
ppm	partes por millón (mg L^{-1} , mg kg^{-1}).
Psal	peso de una sal (kg ha^{-1}).
PSI	porcentaje de sodio intercambiable (%).
PS	peso del suelo (kg ha^{-1}).
Pr	profundidad efectiva del suelo (m).
Qe	caudal del emisor (L h^{-1}).
Qi	caudal de inyección de la solución madre (L h^{-1}).
QM	caudal matriz (L min^{-1}).
Qr	caudal de riego ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$).
RI	relación de inyección.
S	solubilidad del fertilizante (g L^{-1}).
Se	separación entre emisores (m).
SI	separación entre laterales de riego (m).
T	tiempo de duración de la disolución (días).
Tf	tiempo de fertirrigaciones (horas).
Tr	tiempo de riego (horas).
V	volumen de agua (m^3).
Va	volumen de agua en el cual se disuelve el fertilizante (litros).
VA	volumen de ácido (cm^3).
Val	valencia.
Vf	volumen del fertilizante a diluirse.
Va	volumen del agua.
Vmax	volumen máximo del tanque (litros).
Vmin	volumen mínimo del tanque (litros).
Vi	volumen inicial del agua (litros).
Vr	volumen de riego (litros).
Vv	volumen final de agua (litros).



PREFACIO

En la actualidad es esencial implementar una agricultura de precisión para satisfacer la demanda alimentaria de 1.20 mil millones de personas que carecen de alimentos, y con una población en continuo crecimiento. Se proyecta que, para el año 2050, la población mundial alcanzará los 9.70 mil millones, lo que implicaría un aumento del 18% en 25 años (<https://www.populationpyramid.net/es/mundo/2050/>). Este crecimiento demográfico sugiere que la producción agrícola mundial debe incrementarse en un 1% anual (FAO, 2015 y 2024).

Para enfrentar este desafío se pueden adoptar varias estrategias, como la modernización de los sistemas de riego, la tecnificación de las explotaciones agrícolas, el almacenamiento de agua durante la época lluviosa para su uso en época seca, la utilización de coberturas naturales para reducir la evaporación del agua, y el uso eficiente de fertilizantes inorgánicos y orgánicos.

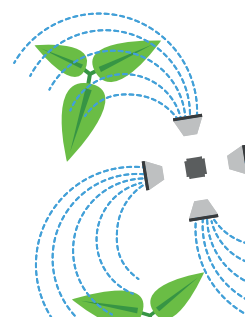
La modernización de los sistemas de riego, en los países en vías de desarrollo, tiene el potencial de duplicar la producción de cultivos, lo que ayudaría a garantizar la oferta de alimentos. En Ecuador, por ejemplo, se cuenta con una superficie irrigada de aproximadamente 950 mil hectáreas, pero el rendimiento de los cultivos solo alcanza el 25% del promedio mundial (MAGAP, 2013).

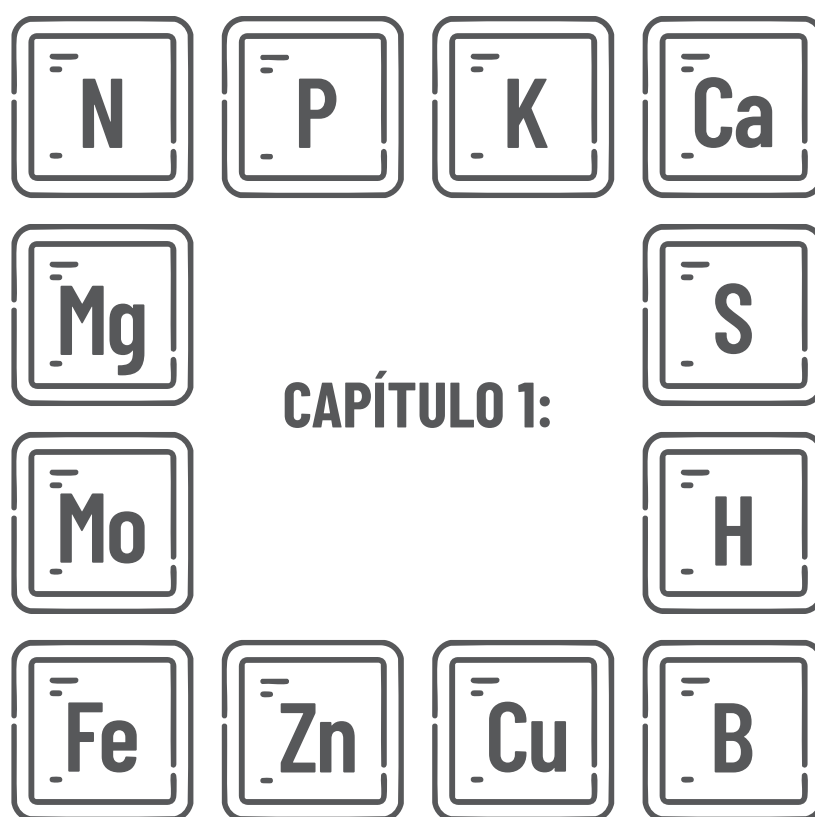
La modernización de los sistemas de riego implica la tecnificación del riego por gravedad y la implementación de sistemas presurizados, utilizando métodos de alta eficiencia, como la fertirrigación. Este proceso permite aplicar fertilizantes disueltos en el agua a través de métodos de riego por goteo, microaspersión o aspersión.

En Ecuador, las empresas de riego han implementado tecnología en cultivos como rosas, hortalizas, plátano, banano, brócoli, cacao, cebolla, maíz, entre otros, con excelentes resultados. En 1998, se diseñó y construyó una máquina de fertirrigación para el sector florícola. Este proceso incluyó el diseño agronómico e hidráulico, además de una investigación exhaustiva sobre los fertilizantes y su aplicación. Como resultado, se creó la máquina de fertirrigación DISHUNIT, que ha permitido ahorrar hasta un 60% de los fertilizantes convencionales, mejorar la distribución uniforme de nutrientes y aumentar el rendimiento de los cultivos.

La experiencia adquirida en campo, combinada con el conocimiento sobre la química de los fertilizantes y la agronomía de los cultivos, ha sido recopilada en este libro. Se espera que sirva como una guía de cálculo para técnicos interesados, proporcionando una base completa para la preparación de disoluciones.

Este libro ofrece información metodológica sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y agua, la nutrición de los cultivos, los fertilizantes y el riego presurizado, considerándose así una guía práctica con conceptos básicos de fertirrigación para satisfacer las necesidades nutricionales de los cultivos.





FERTIRRIGACIÓN

El término Fertirrigación proviene de la combinación de las palabras **FERT**ilizantes e **IRRIGACIÓN** y se refiere a la aplicación de los fertilizantes disueltos en el agua de riego. Esta disolución se mezcla con el agua por el flujo turbulento que se produce en una red de tuberías, por medio de las cuales es transportada desde el cabezal de control hasta los laterales para ser aplicada directamente en la zona radical del cultivo a través de los emisores (Oxman, 1997).

La fertirrigación se desarrolló paralelamente con los sistemas de riego presurizados (goteo y micro aspersión), llegando a ser muy eficiente y ventajosa, disminuyendo el impacto ambiental (contaminación de acuíferos) generados por la fertilización y su aplicación a través de los sistemas de riego convencionales (aspersión y gravedad).

Las ventajas que proporciona la fertirrigación son (Pizarro, 1996):

- Ahorro de los fertilizantes químicos.
- Mejor asimilación y disponibilidad de nutrientes.
- Distribución uniforme de los nutrientes en la solución del suelo y sobre el campo cultivado.
- Aplicación de los fertilizantes en forma diaria e inclusive varias veces durante el día.
- Dosificación de los fertilizantes de acuerdo al estado fenológico del cultivo.
- Aplicación de los fertilizantes en forma inmediata para contrarrestar síntomas carenciales.
- Controlar el potencial hidrógeno y la conductividad eléctrica del agua de riego.
- Aplicar productos químicos como herbicidas, fungicidas y otro tipo de aplicaciones agrícolas.

La fertirrigación se utiliza en cultivos bajo invernadero (suelo y semi hidropónicos) y en campo como hortalizas y frutales que puedan ser irrigados a través de los sistemas de riego presurizados, especialmente goteo.

En cultivos altamente rentables, los fertilizantes disueltos se mezclan con el agua en tanques plásticos antes de que la solución ingrese al sistema de riego. En el tanque mezclador se realiza el control del pH y la conductividad eléctrica del agua de acuerdo a los requerimientos del cultivo.

Básicamente, en la fertirrigación se necesita conocer:

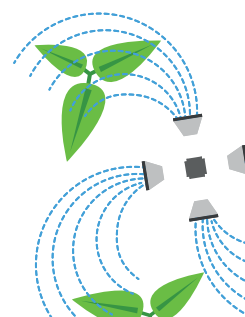
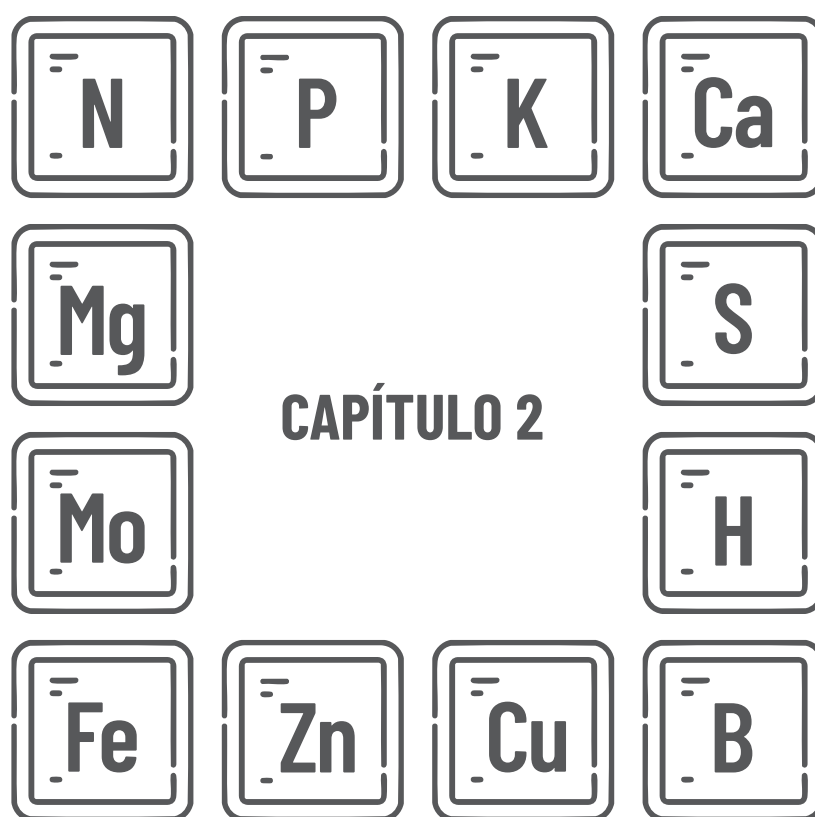
- Calidad del agua de riego.
- La fórmula o dosificación de cada nutriente a prepararse.
- Pureza química de cada fertilizante.
- Metodología utilizada para el cálculo del peso de los fertilizantes.
- Aforo de los caudales de riego y de los inyectores de fertilizantes.
- Mecanismo y precisión en el pesaje de los fertilizantes.
- Mecanismo de agitación para la disolución.
- Estado físico de funcionamiento y de regulación de los equipos de inyección.
- Ubicación de las válvulas que controlan el riego respecto al cabezal de riego.
- Calidad de los emisores.

En el Ecuador, a nivel del pequeño productor, el rendimiento de los cultivos es muy bajo (no alcanza el 25% del promedio mundial), debido a la falta de tecnificación en las siguientes áreas: uso de semillas mejoradas, densidades de siembra, labores culturales, control de plagas y enfermedades, riego y fertilización; por ejemplo, en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, el rendimiento del cultivo de cacao al temporal es de 0.32 t ha^{-1} ; con riego y fertirriego se puede alcanzar como mínimo 1.59 t ha^{-1} , aunque en la península de Santa Elena se alcanza rendimientos promedio de hasta 2.30 t ha^{-1} . En los Andes ecuatorianos, el cultivo de fréjol bajo riego por surcos y fertilización convencional puede alcanzar hasta 3.0 t ha^{-1} , mientras que con riego por goteo y fertirriego se alcanza mínimo 5.00 t ha^{-1} . El rendimiento del cultivo de maíz suave harinoso bajo riego por surcos es de $2.00 - 3.00 \text{ t ha}^{-1}$; ajustando el marco de plantación y cambiando la variedad de la semilla se puede obtener entre $6.00 - 7.00 \text{ t ha}^{-1}$ con fertirriego. El cultivo de cebolla, con riego por aspersión y fertilización convencional, produce entre $30.00 - 32.00 \text{ t ha}^{-1}$; con riego por goteo y fertirrigación el rendimiento puede llegar entre $50.00 - 60.00 \text{ t ha}^{-1}$.

En los cultivos en donde se utiliza la fertirrigación no se monitorea la solución del suelo, dando como resultado una excesiva inversión económica en los fertilizantes, además de la contaminación ambiental.

Los nuevos métodos del manejo de la fertilización en riego por goteo demuestran que se requiere un 50% de la dosis química recomendada, de tal manera que aún queda mucho por investigar sobre la dosis real de los fertilizantes, considerando que el riego por goteo permite alcanzar altas eficiencias en la distribución de los fertilizantes en el área irrigada.





UNIDADES DE MEDIDA UTILIZADAS EN FERTIRRIGACIÓN

Los iones (aniones o cationes) presentes en el agua de riego y en los suelos, se expresan en diferentes unidades, tales como: masa (ppm o mg kg^{-1}), molaridad (mol L^{-1} y mmol L^{-1}) y equivalentes o normalidad (eq L^{-1} y meq L^{-1}) (Valarezo, 1989).

2.1. Unidades de masa

Las unidades de masa se expresan en masa por masa (mg kg^{-1}) o masa por volumen (mg L^{-1}), considerando que la gravedad específica de la mayoría de las disoluciones es aproximadamente igual a la unidad (1.00 kg L^{-1}), una ppm es igual a 1.00 mg L^{-1} . Estas unidades se utilizan para cuantificar los nutrientes potasio, fósforo, manganeso, hierro, zinc y cobre. Una parte por millón (ppm) no considera el equivalente químico de los iones. (Valarezo, 1989).

Partes por millón (ppm) corresponde a la relación que existe entre una parte de una sal diluida en un millón de partes de agua. Si el peso de 1.00 litro de agua es de 1.00 kg, la unidad de medida de concentración de la sal será de 1 mg por litro ($1 \text{ mg L}^{-1} = 1 \text{ mg kg}^{-1}$), convirtiéndose en una unidad de masa por volumen (Valarezo, 1989; Navarro & Navarro, 2003).

$$1.00 \text{ ppm} = 1.00 \text{ mg L}^{-1} = 1.00 \text{ g m}^{-3} = 0.001 \text{ kg m}^{-3}$$

$$1.00 \text{ g L}^{-1} = 1\,000 \text{ mg L}^{-1} = 1\,000.00 \text{ ppm}$$

$$1.00 \text{ ug L}^{-1} = 0.001 \text{ mg L}^{-1} = 0.001 \text{ ppm}$$

$$1.00\% = 10\,000.00 \text{ ppm}$$

$$\text{ppm} = \text{mmol L}^{-1} \times \text{PM} \quad (1)$$

$$\text{ppm} = \text{meq L}^{-1} \times \text{eq} \quad (2)$$

En las Ecuaciones 1 y 2, ppm es la concentración del soluto (mg L^{-1}); mmol L^{-1} , corresponde a una mili mol de una sustancia disuelta en un litro de agua (mmol L^{-1}); meq es el mili equivalente de una sustancia disuelta en un litro de agua (meq L^{-1}); PM es el peso molecular de la sustancia o ion (g); eq es el equivalente químico del soluto (g).

2.2. Molaridad

Esta unidad es muy utilizada en el cálculo del peso de los fertilizantes para suministrar a los cultivos y en el análisis de la calidad del agua con fines de riego. Un mol puede expresarse en unidades de masa mol kg^{-1} y de volumen mol L^{-1} (Navarro & Navarro, 2003). Una mol corresponde a 6.023×10^{23} átomos o moléculas (número de Avogadro) y es el peso molecular de una sustancia; por ejemplo, una mol de nitrógeno pesa 14 gramos y en este peso existen 6.023×10^{23} átomos de nitrógeno (Argus controls, 2009).

$$1.00 \text{ mol} = 1\,000.00 \text{ mili moles (mmol)}$$

$$1.00 \text{ mmol} = 0.001 \text{ mol}$$

$$\text{mol L}^{-1} = \frac{\text{ppm}}{1\,000 \times \text{PM}} \quad (3)$$



$$\text{mmol L}^{-1} = \text{mol L}^{-1} \times 1000 = \frac{\text{ppm}}{\text{PM}} \quad (4)$$

En las Ecuaciones 3 y 4, mol L^{-1} corresponde a la mol de una sustancia disuelta en un litro de agua (mol L^{-1}).

Ejemplo 2.1: Cálculo del peso molecular del nitrato de potasio, utilizando la información de las Tablas 1 y 2. Los pesos se distribuyeron de la siguiente manera:

Tabla 1. Cálculo del peso molecular del nitrato de potasio.

Elemento	Símbolo	Cantidad	Peso atómico (g)	Peso total (g)
Potasio	K	1	39.10	39.10
Nitrógeno	N	1	14.01	14.04
Oxígeno	O	3	16.00	48.00
Peso molecular (g)				101.14

Fuente: Autoría propia.

Se tiene que 1.00 mmol de nitrato de potasio (KNO_3) pesa 101.14 gramos y 1.00 mmol equivale a 101.14 mg.

Tabla 2. Peso atómico de los elementos químicos utilizados en fertirrigación.

Elemento	Ion	PM (g)	eq (g)	meq (g)
Potasio	K	39.10	39.10	39.10
Calcio	Ca	40.02	20.04	20.04
Magnesio	Mg	24.31	12.15	12.15
Cobre	Cu	63.54	31.77	31.77
Sodio	Na	22.99	22.99	22.99
Amonio	NH_4	18.04	18.04	18.04
Nitrato	NO_3	62.00	62.00	62.00
Fosfato diácido	H_2PO_4	96.99	96.99	96.99
Sulfato	SO_4	96.06	48.03	48.03
Cloro	Cl	35.50	35.50	35.50
Hierro	Fe	55.85	27.92	27.92
Manganeso	Mn	54.94	27.47	27.47
Zinc	Zn	65.37	32.68	32.68
Molibdato	MoO_4	160.00	80.00	80.00
Boro	B	10.81	10.81	10.81
Hidrógeno	H	1.008	1.008	1.008
Molibdeno	Mo	95.94	95.94	95.94
Nitrógeno	N	14.01	14.01	14.01
Oxígeno	O	16.00	8.0	8.0
Fósforo	P	30.97	30.97	30.97
Azufre	S	32.06	16.03	16.03
Zinc	Zn	65.37	33.65	33.65

PM, peso molecular; eq, equivalente químico; meq, mili equivalente químico.

Fuente: Valarezo, 1989; Navarro & Navarro, 2003.

2.3. Equivalente químico o normalidad

El equivalente (eq), o mili equivalente químico (meq), se utiliza para preparar las disoluciones en fertirrigación. Sirve para analizar la relación entre aniones y cationes. Generalmente, previo a la determinación del peso de los fertilizantes a inyectarse a través del agua de riego, debe equilibrarse la concentración de los aniones y los cationes, considerando que el agua de riego contiene los aniones y cationes en forma balanceada. También se utiliza para determinar el volumen de ácido necesario para neutralizar los bicarbonatos o corregir el pH del agua (Melendres, 1998).

El equivalente (eq) es el mol o peso molecular de una sustancia que contiene un mol de cargas. En otros términos, un equivalente químico es igual al peso molecular o mol de una sustancia dividido para su valencia. También se utiliza la unidad mili equivalente por litro y es la millonésima parte de un equivalente de soluto diluido en un volumen de agua de un litro (Valarezo, 1989; Navarro & Navarro, 2003).

$$eq = \frac{PM}{Val}$$

$$meq = \frac{eq}{1\,000} = \frac{PM}{1\,000 \times Val} \quad (6)$$

En las Ecuaciones 5 y 6, meq es el mili equivalente químico de un ion (g); Val es la valencia del ion; eq es el peso de un equivalente químico (g). Val se define de acuerdo a las siguientes recomendaciones:

- Cuando se trata de cationes, la valencia (Val) es igual al número de cargas eléctricas, por ejemplo, para calcio, Val = 2.
- Para oxidrilos, la valencia es igual al número de oxidrilos (OH), por ejemplo, para el hidróxido de calcio, $Ca(OH)_2$, Val = 2.
- Para las sales, la valencia es igual a la carga total del radical, por ejemplo, para el nitrato de aluminio, $Al(NO_3)_3$, Val = 3.
- Para los óxidos, Val es igual a la carga total del catión (valencia por el número de cationes), por ejemplo, para el óxido de aluminio, Al_2O_3 , Val = 6 (Argus controls, 2009).

$$meq\,L^{-1} = \frac{ppm}{eq} \quad (7)$$

$$meq\,100\,mL^{-1} = \frac{PM}{10 \times eq} = \frac{meq\,L^{-1}}{10} \quad (8)$$

$$meq\,L^{-1} = mmol\,L^{-1} \times Val \quad (9)$$

En las Ecuaciones 7 y 8, el mili equivalente por litro es $meq\,L^{-1}$; donde 10 es el factor de transformación de volumen para obtener $meq\,100\,mL^{-1}$.

Ejemplo 2.2: Cálculo de mili equivalente químico del calcio (Ecuaciones 5 y 6).

$$eq = \frac{PM}{Val} = \frac{40.08}{2} = 20.04 \text{ g}$$

$$meq = \frac{eq}{1000} = \frac{20.04}{1000} = 0.0204 \text{ g}$$

El equivalente químico del calcio es de 20.04 gramos y el mili equivalente químico del calcio 0.02004 gramos (20.04 mg).

Ejemplo 2.3: Convertir 2.5 meq 100 mL⁻¹ de calcio a: meq L⁻¹, ppm y mmol L⁻¹.

$$meq \text{ L}^{-1} = meq \text{ 100 mL}^{-1} \times 10 = 2.50 \times 10 = 25.00 \text{ meq L}^{-1}$$

$$ppm = 10 \times meq \text{ 100 mL}^{-1} \times eq = 10 \times 2.50 \times 20.04 = 501.00 \text{ ppm}$$

$$ppm = meq \text{ L}^{-1} \times eq = 25 \times 20.04 = 501.00 \text{ ppm}$$

$$ppm = mmol \text{ L}^{-1} \times PM = 12.50 \times 40.08 = 501.00 \text{ ppm}$$

$$mmol \text{ L}^{-1} = \frac{meq \text{ L}^{-1}}{Val} = \frac{25.00}{2.00} = 12.50 \text{ mmol L}^{-1}$$

$$mmol \text{ L}^{-1} = \frac{ppm}{PM} = \frac{501.00}{40.08} = 12.50 \text{ mmol L}^{-1}$$

Entonces, 2.50 meq 100 mL⁻¹ de calcio equivalen a 25 meq L⁻¹, a 501 ppm y 12.50 mmol L⁻¹.

Ejemplo 2.4: Cálculo del equivalente químico del nitrato de calcio (tetrahidratado), con la información de la Tabla 3.

Tabla 3. Cálculo del peso molecular del nitrato de calcio (tetrahidratado).

Elemento	Símbolo	Cantidad	Peso atómico (g)	Peso total (g)
Calcio	Ca	1	40.08	40.08
Nitrógeno	N	2	14.01	28.02
Oxígeno	O	10	16.00	160.00
Hidrógeno	H	8	1.008	8.064
Peso molecular (g)				236.164

Fuente: Autoría propia.

$$eq = \frac{PM}{Val} = \frac{236.164}{2} = 118.082 \text{ g}$$

El nitrato de calcio tiene un peso molecular de 236.164 gramos y un equivalente químico de 118.082 gramos.

$$\text{meq L}^{-1} = \frac{\text{ppm}}{\text{eq}} \times \frac{\text{PM}}{\text{PN}} \quad (10)$$

En la Ecuación 10, PM es el peso molecular del nutriente (NO_3^- es 61.9914) presente en la fórmula del fertilizante (g).

$$\text{meq L}^{-1} = \frac{\text{ppm} \times \text{PM}}{\text{eq} \times \text{PN}} = \frac{1 \times 61.9914}{61.9914 \times 14.01} = 0.0714 \text{ meq L}^{-1}$$

Se presenta una relación de la información en las Tablas 1 y 4, para tener la Tabla 5, por ejemplo, para obtener 1.00 ppm de nitrógeno (N) del catión amonio, se requiere 1.2857 ppm de NH_4^+ , equivalente a 0.0714 meq L^{-1} (Ecuación 10).

Tabla 4. Relación entre ppm y meq L^{-1} para los aniones y cationes.

Nutrientes	ppm	Formula	ppm	meq L^{-1}
K	1.0	K^+	1.00	0.02557
Ca	1.0	Ca^{2+}	1.00	0.04990
Mg	1.0	Mg^{2+}	1.00	0.08227
N	1.0	NH_4^+	1.2878	0.07138
N	1.0	NO_3^-	4.4260	0.07138
P	1.0	H_2PO_4^-	3.1316	0.03229
S	1.0	SO_4^{2-}	2.9960	0.03119

Fuente: Autoria propia.

Tabla 5. Peso molecular y equivalente químico de los fertilizantes.

Elemento	Fórmulas	PM (g)	eq (g)
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	236.164	118.082
Nitrato de Amonio	NH_4NO_3	80.052	80.052
Nitrato de Potasio	KNO_3	101.110	101.110
Nitrato de Magnesio	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	256.426	128.213
Fosfato mono potásico	KH_2PO_4	136.086	136.086
Fosfato mono amónico	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	115.028	115.028
Sulfato de Potasio	K_2SO_4	174.26	87.130
Sulfato de Magnesio	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246.482	123.241
Sulfato de Amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	132.144	66.241
Sulfato de Manganeseo	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	169.016	84.508
Sulfato de Zinc	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	287.542	143.771
Sulfato de Hierro	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	278.022	139.011
Sulfato de Cobre	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	249.680	124.84
Molibdato de Amonio	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	1 163.832	193.972
Ácido Orto fosfórico	H_3PO_4	97.994	32.665
Ácido Nítrico	HNO_3	63.018	63.018
Ácido Sulfúrico	H_2SO_4	98.076	49.038
Oxido de potasio	K_2O	94.192	47.096
Pentóxido de fósforo	P_2O_5	141.96	14.196

PM: peso molecular de la sustancia; **eq:** equivalente químico.

Fuente: Resh, 1997.

Ejemplo 2.5: Cálculo de la cantidad de nitrógeno (N) presente en 1.00 meq L⁻¹ del anión nitrato (NO₃⁻).

$$\text{ppm} = \frac{\text{meq L}^{-1} \times \text{eq} \times \text{PN}}{\text{PM}} = \frac{1 \times 62 \times 14.01}{62} = 14.01 \text{ ppm}$$

Por tanto, 1.00 meq L⁻¹ del anión nitrato (NO₃⁻), contiene 14.01 ppm de nitrógeno (N).

Ejemplo 2.6: Cálculo de la cantidad de nitrógeno (N) presente en 1.00 meq L⁻¹ del fertilizante nitrato de calcio.

$$\text{ppm}_N = \frac{\text{meq L}^{-1} \times \text{eq} \times \text{PN}}{\text{PM}} = \frac{1 \times 118.082 \times 28.02}{236.164} = 14.01 \text{ ppm}$$

$$\text{ppm}_{\text{Ca}} = \frac{\text{meq L}^{-1} \times \text{eq} \times \text{PN}}{\text{PM}} = \frac{1 \times 118.082 \times 40.02}{236.164} = 20.01 \text{ ppm}$$

Así, 1.00 meq L⁻¹ de nitrato de calcio contiene 14.01 ppm de nitrógeno (N) y 20.01 ppm de calcio (Ca).

De otra forma:

$$\text{ppm} = \text{meq L}^{-1} \times \text{eq} = 1 \times 118.082$$

$$\text{ppm}_N = \frac{\text{ppm} \times \text{PN}}{\text{PM}} = \frac{118.082 \times 28.02}{236.164} = 14.00 \text{ ppm}$$

$$\text{ppm}_{\text{Ca}} = \frac{\text{ppm} \times \text{PN}}{\text{PM}} = \frac{118.082 \times 40.02}{236.164} = 20.00 \text{ ppm}$$

De igual forma, 118.02 ppm de nitrato de calcio contienen 14.00 ppm de nitrógeno (N) y 20.00 ppm de calcio (Ca).

Ejemplo 2.7: Convertir 90 ppm (mg L⁻¹) de calcio a mmol L⁻¹ y meq L⁻¹. El peso molecular del calcio es de 40.08 gramos (Tabla 1) y la valencia igual a 2.

$$\text{mmol L}^{-1} = \frac{\text{ppm}}{\text{PM}} = \frac{90}{40.08} = 2.245 \text{ mmol L}^{-1}$$

$$\text{meq L}^{-1} = \frac{\text{ppm}}{\text{EQ}} = \frac{90}{20.04} = 4.491 \text{ meq L}^{-1}$$

Entonces, 90 ppm de calcio equivalen a 2.245 mmol L⁻¹ y a 4.491 meq L⁻¹.

El meq 100 g⁻¹ de suelo es una unidad de medida utilizada en los laboratorios de suelos para expresar los contenidos de aluminio, calcio, magnesio, potasio, sodio y la capacidad de intercambio catiónico y su equivalencia es: 1.00 meq 100g⁻¹ = 1.00 cmol kg⁻¹.

De la Tabla 6, el factor C es la concentración del ion en estudio; f es el factor que corresponde a una profundidad efectiva y una densidad aparente determinada del suelo, por ejemplo, si la profundidad efectiva del suelo es de 0.20 metros y la densidad aparente de 1.00 g cm⁻³, el factor f sería igual a 2.00.

Tabla 6. Conversión de unidades para análisis químicos de suelos (fila a columna).

Unidades	Porcentaje	ppm	meg 100 g ⁻¹	kg ha ⁻¹
%	1	C X 10 ⁴	(10 X C) / meq	f X C X 100
ppm	C 10 ⁻⁴	1	C / (meq X 10)	f X C
meq 100g ⁻¹	(C X meq) / 1000	10 X C X meq	1	10 X f X C X meq
kg ha ⁻¹	5 X C X 10 ⁻⁵	0.5 X C	C / (meq X 10 X f)	1

Fuente: Autoría propia.

Ejemplo 2.8: Cálculo de la cantidad de óxido de potasio (K₂O) que corresponde a una concentración de potasio (K) de 0.35 meq 100 g⁻¹ de suelo, densidad aparente de 1 100 kg m⁻³ y profundidad del suelo de 0.25 metros.

$$P_{sal} = \frac{\text{meq } 100 \text{ g}^{-1} \times \text{eq} \times \text{Da} \times \text{Pr} \times \text{Ft}}{10} \quad (11)$$

En la Ecuación 11, P_{sal} es el peso de la sal (fertilizante) en estudio (kg ha⁻¹); Ft es el factor de conversión del ion a sal (Tabla 8); eq es el equivalente químico del ion en análisis (no de la sal).

$$P_{sal} = \frac{0.35 \times 39.1 \times 1\,100 \times 0.25 \times 1.2046}{10} = 453.34 \text{ kg ha}^{-1}$$

Se tiene que 0.35 meq 100g⁻¹ de potasio (K) corresponden a 376.34 kg ha⁻¹ de potasio (K) y a 453.34 kg ha⁻¹ de K₂O. Esta transformación es muy útil para determinar los requerimientos de los nutrientes en base a los análisis de suelos.

Resultado similar se obtiene al utilizar la Ecuación de la Tabla 6 (fila 3, columna 5).

$$10 \times C \times f \times \text{meq} = 10 \times 0.35 \times 1.10 \times 2.50 \times 39.10 = 376.34 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$P_{sal} = 10 \times C \times f \times \text{meq} \times \text{Ft} = 10 \times 0.35 \times 1.10 \times 2.5 \times 39.10 \times 1.2046 = 453.34 \text{ kg ha}^{-1}$$

Ejemplo 2.9: Utilizando las ecuaciones presentadas en la Tabla 6, transformar a todas las unidades posibles una concentración del 0.15% de nitrógeno, 36 ppm de fósforo, 0.92 meq 100 g⁻¹ de potasio y 200 kg ha⁻¹ de calcio.

Los resultados se presentan en la Tabla 7 y se tiene que:

- El 0.15% de nitrógeno equivale a una concentración de 1 500 ppm ó 0.1071 meq 100 g⁻¹ y a 30 kg ha⁻¹ de nitrógeno.
- Las 36 ppm de fósforo equivalen a una concentración del 0.0036% ó 0.1165 meq 100 g⁻¹ y a 72 kg ha⁻¹.
- Los 0.92 meq 100 g⁻¹ de potasio equivalen a 359.72 ppm de potasio al 0.0359% de concentración y a 719.44 kg ha⁻¹.
- Los 200 kg ha⁻¹ de calcio equivalen a 0.499 meq 100 g⁻¹ de calcio, a 100 ppm y al 0.01%.

Tabla 7. Conversión de nutrientes en los análisis químicos de suelos.

Unidades	Procentaje	ppm	meq 100 g	kg ha ⁻¹
Nitrógeno	0.15	$0.15 \times 10^4 = 1\,500.00$	$(10 \times 0.15) / 14.01 = 0.1071$	$2 \times 0.15 \times 100 = 30.00$
Fósforo	$36 \times 10^{-4} = 0.0036$	36.00	$36 / (30.97 \times 10) = 0.1165$	$2 \times 36 = 72.00$
Potasio	$0.92 \times 39.1 = 0.0359$	359.72	0.92	$10 \times 2 \times 0.92 \times 39.1 = 719.44$
Calcio	$5 \times 200 / 10^5 = 0.010$	$0.5 \times 200 = 100.00$	$200 / (20.04 \times 10 \times 2) = 0.499$	200.00

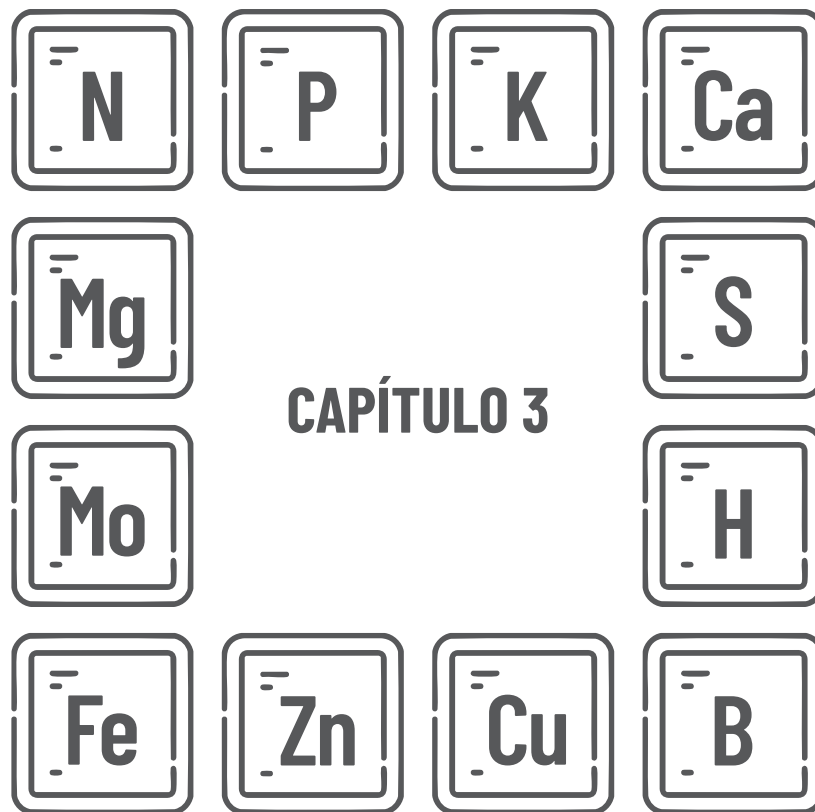
Fuente: Autoria propia.

Los factores de transformación (Ft), para macro y microelementos en estado puro y óxidos, se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Factores de transformación.

Nutrientes	A (ppm)	B (ppm)	meq 100 g
Nitrógeno (N)	N	NO ₃	4.4266
	NO ₃	N	0.22591
	N	KNO ₃	7.22
	KNO ₃	N	0.13855
	KNO ₃	NO ₃	0.61331
	NO ₃	KNO ₃	1.63
	N	NH ₃	1.216
	NH ₃	N	0.8235
	N	NH ₄	1.2878
	NH ₄	N	0.7778
Fósforo (P)	P	P ₂ O ₅	2.2951
	P ₂ O ₅	P	0.43646
	P	H ₂ PO ₄	3.1316
	H ₂ PO ₄	P	0.3193
Potasio (K)	K	K ₂ O	1.2046
	K ₂ O	K	0.83013
Sodio (Na)	Na	Na ₂ O	1.3479
	Na ₂ O	Na	0.74191
Magnesio (Mg)	Mg	MgO	1.6579
	MgO	Mg	0.60317
	Mg	MgCO ₃	3.4675
	MgCO ₃	Mg	0.28839
Calcio (Ca)	Ca	CaO	1.3992
	CaO	Ca	0.71469
	Ca	CaCO ₃	2.4973
	CaCO ₃	Ca	0.40044
Azufre (S)	S	SO ₄	2.996
	SO ₄	S	0.3338
Boro (B)	B	B ₂ O ₃	3.2181
	B ₂ O ₃	B	0.31074
Zinc (Zn)	Zn	ZnO	1.2447
	ZnO	Zn	0.80339
Manganeso (Mn)	Mn	MnO	1.2913
	MnO	Mn	0.77443
Hierro (Fe)	Fe	Fe ₂ O ₃	1.4298
	Fe ₂ O ₃	Fe	0.69940
Cobre (Cu)	Cu	CuO	1.2517
	CuO	Cu	0.79892
Molibdeno (Mo)	Mo	MoO ₃	1.5003
	MoO ₃	Mo	0.66655

Fuente: Cartagena, 2005.



CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO

En este capítulo se analiza la química del agua para riego, enfocado en el proceso de fertirrigación, considerando el potencial hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica (CE) y algunos nutrientes que pueden aportar en el proceso de cálculo de la dosificación de los fertilizantes.

La concentración de las sales en el agua de riego está en función del material que compone el cauce del río y de las áreas de escorrentía. El flujo del agua produce una fuerza de rozamiento y transporte de los sedimentos. Las acciones combinadas de estas dos fuerzas permiten que el flujo del agua transporte materiales orgánicos e inorgánicos en suspensión, a partir de los cuales, las sales se disuelven por el efecto bipolar del agua. Estas sales en disolución son las que se evalúan para determinar su calidad con fines de riego. La concentración de las sales se incrementa en la dirección del flujo del agua.

El estudio de la química del agua es muy importante en todo sistema de irrigación, debido a que la cuantificación de los diferentes parámetros que permiten determinar su efecto sobre las estructuras hidráulicas y los componentes del sistema de riego, sobre la modificación de las características físicas y químicas de la solución del suelo y el resultado en el rendimiento de los cultivos, por otro lado, la acumulación de las sales en suelos irrigados es inevitable (Valarezo, 1989; Navarro & Navarro, 2003).

En relación a los sistemas de riego, los sólidos en suspensión (arena, limo, arcilla y/o materia orgánica) influyen en el diseño de las estructuras hidráulicas para la sedimentación, la determinación de los métodos químicos o físicos para su floculación (en caso de ser necesario), la selección del tipo de filtrado, la colmatación de las redes de tuberías, la sedimentación y pérdida de volumen de reservorios, el deterioro de los aspersores (desgaste de la boquilla), el taponamiento de los goteros y el desgaste acelerado de las bombas (carcasa e impulsor), tuberías y de los emisores, entre otros componentes.

Los sólidos en suspensión y los iones presentes en el agua de riego influyen en el suelo de varias maneras, como: aporte de nutrientes para los cultivos, el calcio mejora el pH, la estructura y la textura del suelo, y en el caso extremo, una excesiva salinidad puede deteriorar las propiedades físicas de los suelos, así como, reducir el rendimiento de los cultivos; suelos cultivados en la parte baja de una cuenca hidrográfica tienen el riesgo potencial de salinizarse y sodificarse por la alta concentración de sales en el agua de riego, especialmente en zonas áridas (Valarezo, 1989; Masis et al., 2017).

Para conocer la variación de la calidad del agua de riego a lo largo del tiempo, se debe realizar un monitoreo de tipo permanente, a través de análisis químicos del agua, información que permitirá evaluar los cambios de las concentraciones de los diferentes iones en el agua. En época lluviosa, la cantidad de sales presentes en el agua es menor que en época seca, por efecto de su dilución en un mayor volumen de agua.

3.1. Norma de calidad del agua

Los parámetros de la calidad del agua para riego se encuentran establecidos en la norma de calidad ambiental y descarga de efluentes: recurso agua (MAE, 2014).

La aplicación de esta norma ambiental sirve para determinar el uso del agua con fines de riego según la valoración de los diferentes elementos físicos, químicos y biológicos que transporta el agua en suspensión y también se debe considerar la aplicación de los fertilizantes químicos, debido a que mediante este proceso se adicionan sales, las cuales modificarán el potencial hidrógeno y la conductividad eléctrica de la solución del suelo (Tablas 9 y 10).

La conductividad eléctrica debe considerarse en la fertilización debido a que un incremento no deseado por efecto de los fertilizantes incrementa el potencial osmótico de la solución del suelo y consecuentemente, una disminución del agua disponible para los cultivos.

Tabla 9. Parámetros de los niveles guía de la calidad del agua para riego.

Problema potencial	Unidades	*Grado de restricción			
		Ninguno	Ligero	Moderado	Severo
Salinidad (1):					
CE (2)	dS m ⁻¹	0.70	0.70	3.00	>3.00
SDT (3)	mg L ⁻¹	450.00	450.00	2000.00	>2000.00
Infiltración (4):					
RAS = 0 – 3 y CE		0.70	0.70	0.20	<0.20
RAS = 3 – 6 y CE		1.20	1.20	0.30	<0.30
RAS = 6 – 12 y CE		1.90	1.90	0.50	<0.50
RAS = 12 – 20 y CE		2.90	2.90	1.30	<1.30
RAS = 20 – 40 y CE		5.00	5.00	2.90	<2.90
Toxicidad por ion específico (5):					
- Sodio					
Irrigación superficial RAS (6)		3.00	3.00	9.00	>9.00
Aspersión	meq L ⁻¹	3.00	3.00		
- Cloruros					
Irrigación superficial	meq L ⁻¹	4.00	4.00	10.00	>10.00
Aspersión	meq L ⁻¹	3.00	3.00		
- Boro	mg L ⁻¹	0.70	0.70	3.00	>3.00
Efectos misceláneos (7):					
- Nitrógeno (N-NO ₃)	mg L ⁻¹	5.00	5.00	30.00	>30.00
- Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	meq L ⁻¹	1.50	1.50	8.50	>8.50
pH. Rango normal		6.50 – 8.40			

Fuente: MAE, 2014.

*Es un grado de limitación que indica el rango de factibilidad para el uso del agua en riego.

(1) Afecta a la disponibilidad de agua para los cultivos.

(2) Conductividad eléctrica del agua: regadío (1 milimhos cm⁻¹ = 1000 micromhos cm⁻¹).

(3) Sólidos disueltos totales.

(4) Afecta a la tasa de infiltración del agua en el suelo.

(5) Afecta a la sensibilidad de los cultivos.

(6) RAS, relación de absorción de sodio ajustada.

(7) Afecta a los cultivos susceptibles.

Ejemplo 3.1: Cálculo de la cantidad de sodio (Na⁺) que se almacena en el suelo, el volumen de agua suministrado al cultivo es de 4 000.00 m³ y la concentración del sodio en el agua de riego es de 2.40 meq L⁻¹. En la Tabla 1, el equivalente químico del sodio es de 22.99 gramos.

$$\text{ppm} = \text{meq L}^{-1} \times \text{eq} = 2.40 \times 22.99 = 55.176 \text{ mg L}^{-1}$$

$$P_i = \frac{\text{ppm} \times V}{1\,000} \quad (12)$$

En la Ecuación 12, P_i es el peso el ion en análisis (kg) y V es el volumen de agua (m^3).

$$\text{Na}^+ = \frac{55.176 \times 4\,000}{1\,000} = 220.70 \text{ kg ha}^{-1}$$

Si el volumen de agua a aplicarse en una hectárea fuera de 4 000.00 m^3 , la cantidad de sodio que se acumularía en el suelo sería de 220.70 kg ha^{-1} .

Ejemplo 3.2: Cálculo de la cantidad de aluminio (Al^{3+}) que se almacena en el suelo, el volumen de agua suministrado para el cultivo es de 5 000.00 m^3 en una superficie de una hectárea, para una concentración del aluminio de 10 ppm.

$$\text{Al}^{3+} = \frac{\text{ppm} \times V}{1\,000} = \frac{10 \times 5\,000}{1\,000} = 50.00 \text{ kg}$$

La cantidad de aluminio que se deposita en el suelo en una superficie de una hectárea es de 50 kg; según la norma ambiental, el límite máximo de aluminio en el agua con fines de riego es de 5 ppm, al ser la concentración del aluminio de 10 ppm, el agua tiene serias restricciones para ser utilizada con fines de riego.

Ejemplo 3.3: Cálculo de la cantidad de hierro que se almacena en el suelo en una superficie de una hectárea, si el volumen de agua suministrado para el cultivo es de 5 000.00 m^3 y la concentración del hierro de 8.00 ppm.

$$\text{Fe}^{3+} = \frac{\text{ppm} \times V}{1\,000} = \frac{8 \times 5\,000}{1\,000} = 40.00 \text{ kg}$$

La cantidad de hierro transportado por el agua de riego y que se deposita en el suelo en una superficie de una hectárea es de 40.00 kg. Según la norma ambiental, el límite máximo de hierro en el agua con fines de riego es de 5 ppm, al ser la concentración de 8 ppm, el agua tiene restricciones para ser utilizada con fines de riego y debe emplearse medios mecánicos o químicos para la reducción de su concentración en el agua; si el requerimiento de hierro para la fertilización de un determinado cultivo es de 5 ppm, no se necesita de su incorporación dentro de la formulación para fertirrigación, sin embargo, debe examinarse la forma del ion presente en el agua y la forma requerida por el cultivo (Tabla 10).



Tabla 10. Límites de calidad para aguas de uso agrícola.

Parámetros	Expresión	Unidad	Límite máximo
Aluminio	Al	mg L ⁻¹	5.00
Arsénico (total)	As	mg L ⁻¹	0.10
Bario	Ba	mg L ⁻¹	1.00
Berilio	Be	mg L ⁻¹	0.10
Boro (total)	B	mg L ⁻¹	1.00
Cadmio	Cd	mg L ⁻¹	0.01
Carbonatos totales	-	mg L ⁻¹	0.10
Cianuro (total)	CN ⁻	mg L ⁻¹	0.20
Cobalto	Co	mg L ⁻¹	0.050
Cobre	Cu	mg L ⁻¹	2.00
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg L ⁻¹	0.10
Flúor	F	mg L ⁻¹	1.00
Hierro	Fe	mg L ⁻¹	5.00
Litio	Li	mg L ⁻¹	2.50
Materia flotante	visible	-	Ausencia
Manganeso	Mn	mg L ⁻¹	0.20
Molibdeno	Mo	mg L ⁻¹	0.01
Mercurio (total)	Hg	mg L ⁻¹	0.001
Níquel	Ni	mg L ⁻¹	0.20
Organofosforados (totales)	-	mg L ⁻¹	0.10
Organoclorados (totales)	-	mg L ⁻¹	0.20
Plata	Ag	mg L ⁻¹	0.05
Potencial hidrógeno	pH		6.90
Plomo	Pb	mg L ⁻¹	0.05
Selenio	Se	mg L ⁻¹	0.02
Sólidos disueltos totales	-	mg L ⁻¹	3 000.00
Transparencia de las aguas medidas con el disco secchi	-	-	mínimo 2.00 m
Vanadio	V	mg L ⁻¹	0.10
Aceites y grasa	-	mg L ⁻¹	0.30
Coliformes totales	nmp 100 mL ⁻¹		1 000.00
Zinc	Zn	mg L ⁻¹	2.00

Fuente: MAE, 2014.

La concentración de los diferentes iones presentes en el agua varía entre la Sierra y la Costa, por esto, es necesario realizar un análisis químico; en los ríos de la Sierra, la concentración de los iones es baja; mientras que, en los ríos de la Costa, la concentración es alta de hierro, calcio, magnesio y carbonatos.

Ejemplo 3.4: Cálculo de la cantidad total de sales (CTS) que se acumularán en el suelo en una superficie de una hectárea, si el volumen de agua en un año suministrado para el cultivo es de 10 000.00 m³, considerando una concentración de sales de 0.10 dS m⁻¹, en un tiempo de 5 años.

$$CTS = 0.64 \times CE \times V \times T \quad (13)$$

En la Ecuación 13 (Pizarro, 1996), CTS es la cantidad total de sales depositadas en el suelo (kg ha⁻¹); CE es la conductividad eléctrica del agua de riego (dS m⁻¹); T es el tiempo (años).

$$CTS = 0.64 \times 0.10 \times 10\,000 \times 5 = 3\,200.00 \text{ kg ha}^{-1}$$

En un tiempo de 5 años, se acumulará un total de 3 200.00 kilogramos de sales en una superficie de una hectárea.

Ejemplo 3.5: Cálculo del incremento de la conductividad eléctrica de la solución del suelo, considerando la cantidad de sales determinada en el ejercicio 3.4, para una profundidad del suelo de 1.00 metro.

$$CEs = \frac{CTS}{0.64 \times \text{Area} \times \text{Pr}} \quad (14)$$

En la Ecuación 14, CEs es la conductividad eléctrica de la solución del suelo (dS m^{-1}); Área es la superficie (ha); Pr es la profundidad efectiva (m). Esta ecuación permite determinar en forma muy general la incidencia de las sales en el suelo, debiéndose enfatizar que, para determinar este valor en forma real, se requiere realizar un balance de sales en el suelo de tipo permanente (riego, precipitación, fertirrigación y lixiviación).

$$CEs = \frac{3200.00}{0.64 \times 100 \times 100 \times 1.00} = 0.50 \text{ dS m}^{-1}$$

El incremento de la conductividad eléctrica de la solución del suelo es de 0.50 dS m^{-1} . Si este valor fuese de 0.35 dS m^{-1} , en 5 años la conductividad sería de 0.85 dS m^{-1} , sin considerar las sales aportadas por los fertilizantes. Por estos motivos, es necesario realizar un monitoreo de la solución del suelo de tipo permanente, para determinar la variación de la conductividad eléctrica a lo largo del tiempo con el objeto de prevenir la salinización del suelo.

Espín (2015) realizó el monitoreo de la calidad del agua en el sistema de riego Tumbaco, en los sectores: La Morita, La Tola Chica, El Arenal, La Esperanza y Collaquí, desde los meses de julio hasta diciembre de 2015 (Tabla 11).

Tabla 11. Calidad del agua en el sistema de riego Tumbaco – La Morita.

Ion	Unidad	Máximo	Mínimo	Promedio
Boro	mg L^{-1}	0.70	0.10	0.36
Calcio	mg L^{-1}	34.00	1.07	21.20
Cloruros	mg L^{-1}	11.16	6.91	8.80
Cobre	mg L^{-1}	0.05	0.05	0.05
Fósforo	mg L^{-1}	1.27	0.56	0.78
Magnesio	mg L^{-1}	15.31	5.15	11.26
Nitratos	mg L^{-1}	1.70	0.10	0.80
pH	mg L^{-1}	8.50	7.36	7.96
Potasio	mg L^{-1}	9.20	5.00	6.11
Sulfatos	mg L^{-1}	59.30	1.70	24.47
Coliformes fecales	nmp 100 mL^{-1}	2900.00	1200.00	1816.67
Coliformes totales	nmp 100 mL^{-1}	6200.00	1800.00	4050.00

Fuente: Espín, 2015.

Boro: La dosis promedio recomendada para fertilizar el cultivo es de 0.39 ppm; en el agua de riego, el valor promedio es de 0.36 ppm; en el cálculo del peso de los fertilizantes a ser aplicados únicamente se debería considerar una cantidad de 0.03 ppm debido a que el agua de riego aporta el 91.70% de este micronutriente; sin embargo, un análisis foliar permitirá ajustar la dosificación del boro (Tabla 10).

Cobre: La dosis recomendada para fertilizar el cultivo es de 0.05 ppm; en el agua de riego, el valor promedio es de 0.05 ppm; en el cálculo del peso de los fertilizantes no se debería considerar aplicar el cobre, dado que el agua aporta el 100% de este micronutriente.

Calcio: El cultivo requiere 162.00 ppm y el agua de riego aporta en promedio 21.20 ppm, faltando por adicionar 142.80 ppm.

Magnesio: La dosis recomendada para fertilizar el cultivo es de 39.30 ppm; en el agua de riego, el valor promedio es de 11.26 ppm; en el cálculo del peso de los fertilizantes se debería considerar suministrar 28.04 ppm.

Sulfatos: La dosis recomendada para fertilizar el cultivo es de 68.50 ppm; en el agua de riego, el valor promedio es de 24.47 ppm; en el cálculo del peso de los fertilizantes se debería aplicar 44.03 ppm.

Nitratos: La dosis recomendada es de 192.70 ppm; en el agua de riego, el valor promedio es de 0.80 ppm; en el cálculo del peso de los fertilizantes se debería considerar adicionar la dosis de 191.90 ppm.

Fósforo: La dosis recomendada es de 32.90 ppm; en el agua de riego, el valor promedio es de 0.78 ppm; en el cálculo del peso de los fertilizantes se debería aplicar la dosis de 32.12 ppm.

Potasio: La dosis recomendada es de 238.70 ppm; en el agua de riego, el valor promedio es de 6.11 ppm; en el cálculo del peso de los fertilizantes se debería suministrar la dosis de 232.59 ppm.

Ejemplo 3.6: Cálculo de la cantidad de nutrientes aportados por el agua de riego considerando un volumen de 2 000.0 m³ en una superficie de 1.0 hectárea. Con la información de la Tabla 10 y la Ecuación 3.2 se tiene:

Al agua de riego aporta 1.60 kg ha⁻¹ de nitrógeno; 1.56 kg ha⁻¹ de fósforo; 12.22 kg ha⁻¹ de potasio; 42.40 kg ha⁻¹ de calcio; 22.52 kg ha⁻¹ de magnesio; 48.94 kg ha⁻¹ de azufre; 0.72 kg ha⁻¹ de boro y 0.10 kg ha⁻¹ de cobre (Tabla 12).

Tabla 12. Nutrientes aportados por el agua de riego.

Elemento	Símbolo	Cantidad (kg ha ⁻¹)
Nitrógeno	N	0.80 X 2 000
Fósforo	P	0.78 X 2 000
Potasio	K	6.11 X 2 000
Calcio	Ca	21.20 X 2 000
Magnesio	Mg	11.26 X 2 000
Azufre	S	24.4 X 2 000
Boro	B	0.36 X 2 000
Cobre	Cu	0.05 X 2 000

Fuente: Autoría propia.



3.2. Criterios principales

Con fines de riego, los parámetros principales que se analizan son: conductividad eléctrica, pH, sodio, aluminio, entre otros elementos (Valarezo, 1989; Masis et al., 2017).

Conductividad eléctrica (CE)

Valores:	0.70 – 3.00 dS m ⁻¹ .
Suelo:	Incremento del potencial osmótico (menos agua disponible para las plantas), antagonismo entre aniones y cationes.
Cultivo:	Restricción para algunos cultivos y disminución del rendimiento.
Equipo de riego:	Daño en componentes de riego metálicos, especialmente de aluminio, riesgo de taponamiento de los goteros por la precipitación de fosfatos de calcio y fosfatos de magnesio.

Potencial hidrógeno (pH)

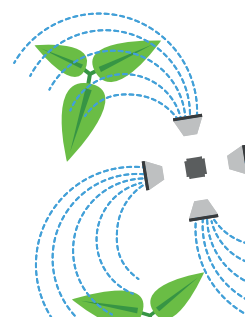
Valores:	6.50 – 8.40.
Suelo:	Valores de pH mayores a 7 se denominan alcalinos, presentan altas concentraciones de carbonatos y bicarbonatos, salinización paulatina de los suelos.
Cultivo:	Valores de pH menores a 5.50, requieren de la adición de bases (iones oxidrilo, OH ⁻) para subir el pH; valores mayores a 7.00, requieren de la adición de ácidos (iones hidronio, H ⁺) para reducir el pH; el pH influye directamente en la disponibilidad de los nutrientes.
Equipo de riego:	Valores de pH alcalinos producen daños en componentes de riego metálicos (Al); riesgo de taponamiento de los goteros por la precipitación de fosfatos de calcio y fosfatos de magnesio.

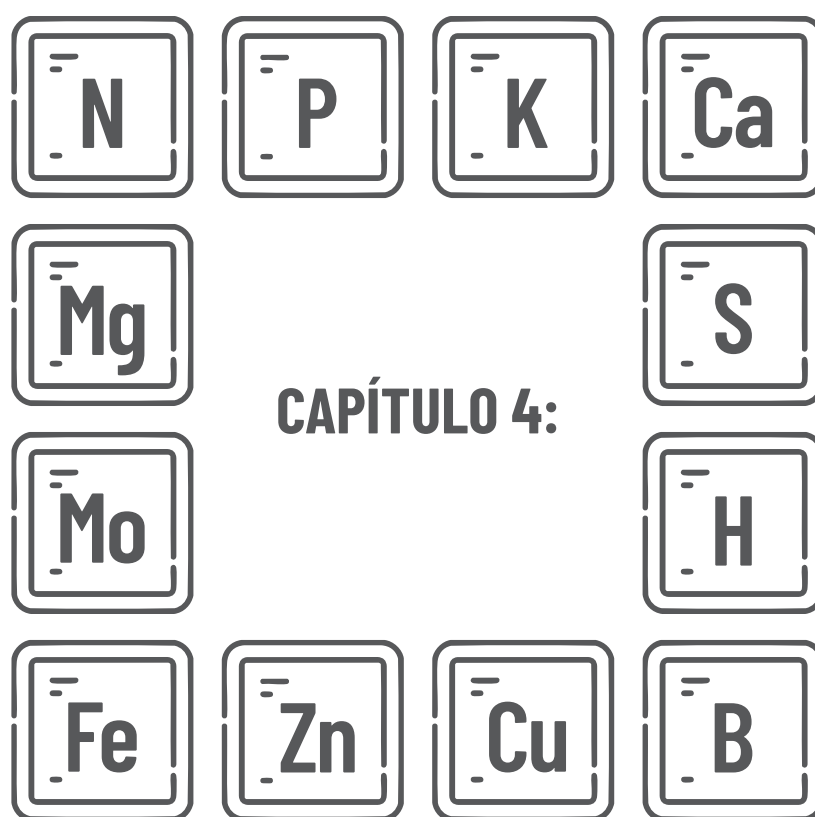
Sodio (Na)

Valores:	3 – 9 meq L ⁻¹ .
Suelo:	Sodificación, destrucción de la estructura del suelo, compactación y disminución de la velocidad de infiltración del agua.
Cultivo:	Reducción en el rendimiento, requiere lavados permanentes para lixiviar el sodio.

Aluminio (Al)

Valores:	Menor a 5 ppm.
Suelo:	El Al presenta la mayor cantidad de problemas cuando el pH de la solución del suelo es menor a 5.50; a valores de pH mayores a 5.50, el aluminio no causa daños en la estructura del suelo; para contrarrestar su efecto, se debe encalar los suelos (subir el pH mínimo a 6.00); la cantidad de cal a aplicarse en el suelo se determina en función de la capacidad de intercambio catiónico y de los iones potasio, calcio, magnesio, aluminio e hidrógeno.
Cultivo:	Reduce la disponibilidad de fósforo, azufre y de otros nutrientes.





PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS SUELOS

Los análisis químicos de suelos y aguas son muy importantes en el proceso del cálculo de los fertilizantes a ser aplicados en los cultivos; en función de su ubicación dentro de una cuenca hidrográfica, el agua de riego y los suelos contienen cantidades de nutrientes superiores a las que demandan los cultivos, por ejemplo, en zonas áridas o semiáridas, los contenidos de calcio, magnesio y hierro son superiores a los necesitados por los cultivos, no requieren ser aplicados éstos iones durante la fertilización, aunque el pH alcalino demandará de una corrección para solubilizar algunos iones para que puedan ser aprovechados por las plantas.

La aplicación de los fertilizantes sin regular el pH del medio representa una pérdida económica debido a que los fertilizantes suministrados no son aprovechados por los cultivos, aun cuando las raíces acidifiquen el suelo circundante (Israelí, 2002).

La Agrónica (electrónica aplicada a la agricultura) ha permitido automatizar el monitoreo y el control de la aplicación de los fertilizantes, asegurando la disminución de las cantidades de fertilizantes utilizados tradicionalmente, y de esta forma, reducir la contaminación ambiental causada por esta práctica agrícola.

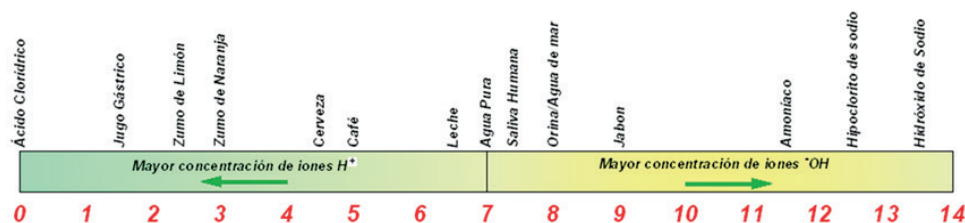
4.1. Potencial hidrógeno

El potencial hidrógeno (pH) es un índice que permite conocer la acidez o la alcalinidad de una disolución, se define como el logaritmo negativo de la concentración actual de los iones hidrógeno y afecta a la disponibilidad de los nutrientes para los cultivos (Iñiguez, 1999).

La escala del pH varía entre 0 y 14 (Figura 1), siendo ácido para valores menores a 7 (predominan los iones hidrógeno, H^+), neutro para 7 y alcalino para valores mayores a 7 (predominan los iones oxidrilo, OH^-). Un pH de 5 es 10 veces más ácido que un pH de 6 (Iñiguez, 1999).

En la naturaleza, el pH varía entre 3.50 y 8.50, es ácido en regiones lluviosas y es alcalino en regiones áridas; es ácido en lugares en donde la precipitación es mayor a la evapotranspiración y alcalino en lugares en donde la precipitación es menor a la evapotranspiración (Valarezo, 1989).

Figura 1. Escala de pH y de algunas soluciones.



Fuente: Autoría propia.

En la fertilización de los cultivos, las sales disueltas no alcanzan la saturación, por lo tanto, su disponibilidad y forma asimilable está en función del pH de la solución del suelo.

La forma química en la que se encuentra un nutriente en el agua está en función de su concentración y de la relación que existe entre el producto de solubilidad y el pH del medio. El producto de solubilidad es la fuerza de un ácido o una base para liberar iones hidrógeno, cuando el pH es mayor al producto de solubilidad, un ácido libera un ion hidrógeno y una base formará un precipitado, dejando en libertad iones hidrógeno de acuerdo a su valencia.

El potasio siempre se encontrará presente en su forma catiónica (hidratado), debido a que su producto de solubilidad es mayor al valor máximo de pH (Tabla 13).

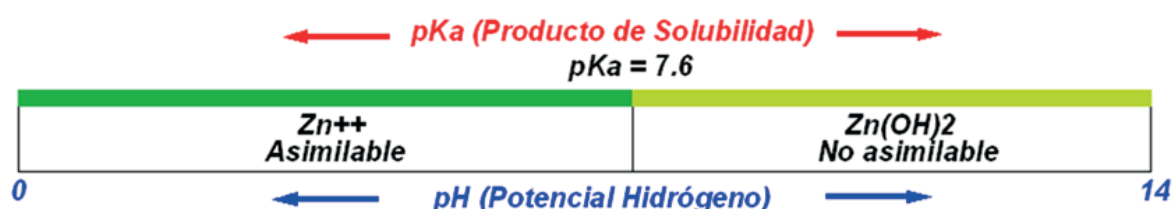
El zinc permanece como catión asimilable para las plantas (Zn^{2+}) hasta un pH de 7.60, valor igual al producto de solubilidad (pKa), para valores de pH mayores, el zinc deprotoniza como hidróxido de zinc $Zn(OH)_2$, dejando en libertad dos iones hidrógeno, forma química no asimilable para las plantas (Valarezo, 1989), como se presenta en la Tabla 13 y la Figura 2.

Tabla 13. Producto de solubilidad para nutrientes.

Nutriente	pKa	Nutriente	pKa
K^+	14.80	Fe^{3+}	3.00
Ca^{2+}	12.60	Al^{3+}	5.00
Mg^{2+}	11.60	H_2CO_3	6.80/10.30
Mn^{2+}	10.60	H^3BO_3	9.20
Fe^{2+}	9.50	H_3PO_4	2.10/7.00/12.00
NH_4^+	9.20	H_2SO_4	-3.00/2.00
Zn^{2+}	7.60	HNO_2	3.40
Cu^{2+}	7.50	HNO_3	-1.00

Fuente: Valarezo, 1989.

Figura 2. Disponibilidad del zinc de acuerdo al pH del medio.

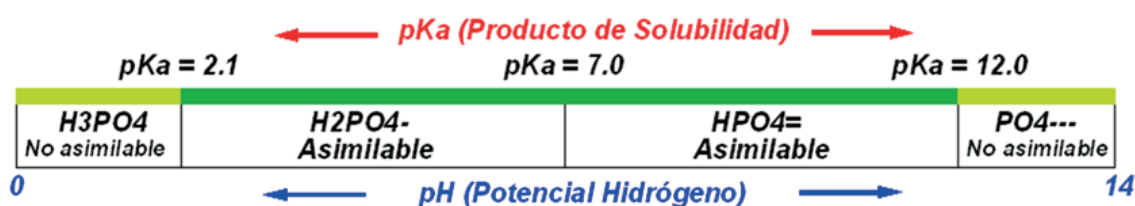


Fuente: Autoría propia.

El fósforo se mantiene como ácido fosfórico (H_3PO_4) hasta un pH de 2.10; a un pH mayor, el ácido deja en libertad un ion hidrógeno y pasa a la forma de ion monofosfato ($H_2PO_4^-$); para un pH mayor a 7, el ion monofosfato deja en libertad un ion hidrógeno y adopta la forma de ion bifosfato (HP_4^{2-}); para un pH mayor a 12, el ion bifosfato pasa a la forma de ion fosfato (PO_4^{3-}). El fósforo es asimilado por las plantas como ion mono y bifosfato (Figura 3), (Valarezo, 1989; Navarro & Navarro, 2003).



Figura 3. Disponibilidad del fósforo de acuerdo con el pH del medio.



Fuente: Autoría propia.

En el proceso descrito anteriormente, no se considera la presencia de otras sales en la solución del suelo, por lo cual y de acuerdo al pH, los nutrientes se pueden encontrar en sus formas asimilables o disponibles, combinados con otros aniones o cationes, dando lugar a la formación de sales o precipitados no disponibles para las plantas. La mayoría de los cultivos se desarrollan satisfactoriamente en un rango de pH de la solución del suelo comprendido entre 5.50 y 7.50 (Figura 4). El pH influye en la actividad biológica de los suelos, cuando el pH es menor a 5.50, la actividad de las bacterias y los actinomicetos es baja; los hongos se desarrollan favorablemente en un pH ácido; bajo condiciones neutras, las bacterias ayudan a los procesos de nitrificación, fijación de nitrógeno, mineralización y amonificación; el sistema radical de las plantas se ve afectado cuando el pH es menor a 4 (Proaño, 2010).

Figura 4. Disponibilidad de los nutrientes en función del pH.

pH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
N	no disponible	no disponible	baja disponibilidad	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	baja disponibilidad	baja disponibilidad	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible
P	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	baja disponibilidad	disponible	disponible	disponible	baja disponibilidad	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible
K	no disponible	no disponible	no disponible	baja disponibilidad	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	baja disponibilidad	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible
Ca	no disponible	no disponible	no disponible	baja disponibilidad	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	baja disponibilidad	baja disponibilidad	no disponible
Mg	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible
S	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	no disponible
Fe	no disponible	baja disponibilidad	disponible	disponible	disponible	disponible	baja disponibilidad	baja disponibilidad	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible
Mn	no disponible	no disponible	baja disponibilidad	disponible	disponible	disponible	baja disponibilidad	baja disponibilidad	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible
B	no disponible	no disponible	baja disponibilidad	disponible	disponible	disponible	baja disponibilidad	baja disponibilidad	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible
Zn	no disponible	no disponible	baja disponibilidad	disponible	disponible	disponible	baja disponibilidad	baja disponibilidad	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible
Cu	no disponible	no disponible	baja disponibilidad	disponible	disponible	disponible	baja disponibilidad	baja disponibilidad	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible	no disponible
Mo	no disponible	no disponible	no disponible	baja disponibilidad	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	disponible	baja disponibilidad	no disponible



no disponible



disponible



baja
disponibilidad

Fuente: Agroproductores, 2022.

4.1.1. Control y regulación del pH

El control y la regulación del pH en la solución del suelo disminuye la aplicación de las fertilizaciones foliares, debido a que los macro y micronutrientes se encuentran en sus formas asimilables para las plantas.

Existen dos alternativas para regular el pH: i) a través del encalado cuando se trabaja con sistemas de riego por gravedad y aspersión; ii) a través de la inyección de ácidos en el agua de riego cuando se trabaja con riego por goteo y microaspersión.

Para incrementar el pH de 2.00 a 5.50, se debe incorporar al suelo 0.95 t ha⁻¹ de cal viva en un suelo franco (Tabla 14).

Tabla 14. Necesidad de cal viva para incrementar el pH.

Cambio de pH	Texturas					
	Ao.	Fo.Ao.	Fo.	Fo.Lo.	Fo.Ac.	Ac.
	t ha ⁻¹					
6.00 – 6.50	0.70	1.20	2.00	2.60	3.30	4.00
5.50 – 6.50	1.30	2.00	3.30	4.00	5.10	6.10
5.00 – 6.50	2.00	3.20	4.90	5.70	7.10	8.50
4.50 – 6.50	2.80	4.60	7.00	7.90	9.40	11.30
4.00 – 6.50	3.90	6.30	9.10	10.10	11.70	14.00
3.50 – 6.50	5.20	8.40	11.70	13.30	15.60	18.70

Texturas: Ao., arenoso; Fo.Ao., franco arenoso; Fo., franco; Fo.Lo., franco limoso; Fo.Ac., franco arcilloso; Ac., arcilloso.

Fuente: Cadahía, 2005.

La cantidad de cal a utilizarse debe determinarse en función de la capacidad de intercambio catiónico, del porcentaje de saturación de bases y de la pureza de la cal.

Para reducir el pH del agua de riego se utilizan ácidos: fosfórico, nítrico, sulfúrico, cítrico y a través de la inyección del dióxido de carbono, entre otras fuentes de iones hidrógeno de origen orgánico e inorgánico. Para incrementar el pH de la solución se puede utilizar el hidróxido de potasio.

En los sistemas de inyección manual de los fertilizantes, cualquiera que sea el proceso para subir o bajar el pH, las titulaciones se realizan a nivel de laboratorio con el objeto de encontrar la dosificación adecuada del ácido o la base para regular el pH en un rango comprendido entre 5.50 y 6.50 (Tabla 15).

Tabla 15. Características químicas de los ácidos.

Ácido	PM (g)	eq (g)	DA (g cm ⁻³)	P (%)
Fosfórico	97.98	32.66	1.68	75.00
Nítrico	63.02	63.02	1.38	62.00
Sulfúrico	98.00	49.00	1.83	93.00

Fuente: Argus controls, 2009.



$$VA = ((\text{meq L}^{-1} - 0.50) \times \text{eq} / (10 \times P \times DA) \quad (15)$$

En la Ecuación 15, según Argus controls (2009), VA es el volumen de ácido en cm^3 por litro; P es la pureza del ácido (%) y DA es la densidad del ácido (g cm^{-3}).

Ejemplo 4.1: Cálculo del volumen de ácido sulfúrico a disolverse en un litro de agua para neutralizar 5.00 meq L^{-1} de bicarbonatos.

$$VA = \frac{(5.00 - 0.50) \times 49}{10 \times 98 \times 1.84} = 0.122 \text{ mL L}^{-1}$$

Se requiere diluir 0.122 mL o cm^3 de ácido sulfúrico en un volumen de 1.00 litro de agua o 122 mL en un metro cúbico de agua para neutralizar 5.00 meq L^{-1} de bicarbonatos.

Ejemplo 4.2: Cálculo del volumen de ácido fosfórico para reducir el pH de 8.20 a 6.50 . La adición de 1.00 meq de cualquier ácido en un litro de agua, reducirá el pH en aproximadamente 1.5 (Martínez, 1998).

$$VA = \frac{(\text{pH}_1 - \text{pH}_2) \times \text{eq}}{15 \times P \times DA} \quad (16)$$

En la Ecuación 16, pH_1 es el pH del agua de riego y pH_2 es el pH objetivo para regularse (Martínez, 1998).

$$VA = \frac{(8.20 - 6.50) \times 32.66}{15 \times 75 \times 1.84} = 0.035 \text{ mL L}^{-1}$$

Se requiere diluir 0.035 mL o cm^3 de ácido sulfúrico en un volumen de 1.00 litro de agua o 35 mL por cada metro cúbico de agua para reducir el pH de 8.20 a 6.50 .



4.1.2. Cultivos y su relación con el pH

Los valores de pH recomendados para alcanzar un rendimiento óptimo en cada cultivo, por ejemplo: el maíz rinde satisfactoriamente en un pH comprendido entre 5.50 y 6.60 (Tabla 16).

Tabla 16. pH óptimo para los cultivos.

Varios	pH	Frutales	pH	Extensivos	pH
Acelga	6.00-7.50	Albaricoque	6.00-6.80	Alfalfa	6.20-7.80
Ajo	5.50-8.00	Almendro	6.00-6.80	Algodón	5.00-6.20
Apio	6.10-7.40	Café	5.00-7.00	Alpiste	6.00-7.00
Berenjena	5.50-6.50	Limón	5.50-7.50	Arroz	5.00-6.50
Brócoli	6.00-7.00	Manzana	5.00-6.50	Avena	5.00-7.50
Calabaza	5.50-7.50	Membrillo	5.50-7.20	Papas	4.80-6.50
Cebolla	5.80-7.00	Naranja	6.00-7.50	Cacahuete	5.30-6.50
Col	6.00-7.50	Nogal	6.20-7.80	Caña azúcar	6.00-8.00
Col de Bruselas	5.70-7.20	Olivo	6.00-7.80	Cebada	6.50-7.80
Coliflor	6.0-7.20	Pera	5.60-7.20	Centeno	5.00-7.00
Espárrago	6.30-7.50	Pino	5.00-6.00	Girasol	6.00-7.50
Espinaca	6.00-8.00	Plátano	6.00-7.50	Habas	6.00-7.00
Fresa	6.00-7.50	Pomelo	6.00-7.50	Lenteja	6.00-7.00
Fréjol	5.50-7.00	Vid	5.30-6.70	Maíz	5.50-7.50
Lechugas	6.00-7.50			Mijo	5.10-6.80
Maíz dulce	5.60-6.80			Ray grass	6.00-7.00
Melón	5.50-7.50			Soya	6.10-7.20
Nabo	6.00-7.50			Sorgo	5.80-7.50
Pepino	6.00-7.50			Tabaco	5.50-7.30
Piña	5.50-7.00			Trébol blanco	5.50-7.00
Pimiento	5.00-6.00			Trigo	5.50-7.50
Rábano	6.10-7.40				
Remolacha	6.00-7.50				
Tomate riñón	5.80-7.20				
	5.70-7.00				

Fuente: Cadahía, 2005.

4.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad que tiene una sustancia para transportar corriente eléctrica, en el agua pura, la CE es de $5 \times 10^{-5} \text{ dS m}^{-1}$, cuando se adiciona sales o fertilizantes en el agua, la CE tiende a incrementarse por la mayor cantidad de iones disueltos (electrolitos). Cada sal o fertilizante produce una CE diferente, considerando una misma concentración o viceversa, por ejemplo, una concentración de 500 ppm de carbonato de calcio (CaCO_3) y otra de 400 ppm de cloruro de sodio (NaCl) producen la misma CE de 1.0 dS m^{-1} (Hanna, 2016).

La temperatura de referencia para la CE es de 25°C y todas las lecturas deben corregirse en función de este parámetro (Hanna, 2016).

La unidad de medida de la CE es el dS m^{-1} (deci siemens por metro) o mmho cm^{-1} (mili moho por centímetro) (Hanna, 2016).



En el riego, la CE se utiliza para determinar la salinidad o la cantidad de sales disueltas en el agua, en la disolución de los fertilizantes, en la mezcla del agua de riego con los fertilizantes (a la salida del gotero) y en la solución del suelo. En base a estos parámetros, se elaboran los planes de manejo y rehabilitación de suelos, se definen los métodos para el tratamiento de aguas, se planifica el manejo del agua de riego, se determinan los cultivos apropiados para el medio y se establece el régimen de fertilización.

La variación de la concentración de las sales en el agua y en la solución del suelo es de tipo temporal y espacial, está relacionada con las características geológicas y climatológicas de la zona donde se produce y transporta el agua; en el suelo, las sales provienen de la meteorización del material parental o roca madre, además de las depositadas por el agua y los fertilizantes suministrados para los cultivos. La concentración de sales es menor en invierno, debido a la dilución que producen las lluvias y mayor en verano por la concentración o precipitación que genera la evaporación. La CE se incrementa en la dirección del flujo del agua (ríos, quebradas, arroyos y canales de riego). En suelos irrigados, la concentración y la distribución de las sales en el perfil dependen del patrón de humedecimiento del método de riego utilizado, de la frecuencia de riego y de la programación de la fertilización, siendo esta variación de mayor amplitud en los sistemas de riego por gravedad y aspersión, y menor en el riego por goteo (Hoffman, 1990). Cuando la concentración de las sales en el suelo se incrementa, el potencial osmótico también se incrementa, reduciéndose de esta forma el agua disponible para las plantas por la hidratación de las sales (Pizarro, 1996).

Las unidades $\mu\text{S cm}^{-1}$, mS cm^{-1} o dS m^{-1} (Tabla 17) se utilizan cuando la concentración de las sales en el agua es baja; en la preparación de las disoluciones de los fertilizantes químicos se utiliza en m^{-1} (Hanna, 2016). Cuando la CE del agua de riego es menor a 0.25 dS m^{-1} , la salinidad del suelo es baja, entre 0.25 y 0.75 dS m^{-1} ; la salinidad es media, entre 0.75 y 2.25 dS m^{-1} , y la salinidad es alta; cuando la CE de la solución del suelo es mayor a 4 dS m^{-1} , los suelos se clasifican como salinos (Hofman et al., 1990).

Tabla 17. Unidades de medida de la conductividad eléctrica.

Unidad	Equivalencia
1.00 S m^{-1}	10.00 dS m^{-1}
1.00 S m^{-1}	$1 \times 10^3 \text{ mS m}^{-1}$
1.00 S m^{-1}	$1 \times 10^6 \mu\text{S m}^{-1}$
1.00 S m^{-1}	0.10 dS cm^{-1}
1.00 S m^{-1}	10.00 mS cm^{-1}
1.00 S m^{-1}	$1 \times 10^4 \mu\text{S cm}^{-1}$
1.00 dS m^{-1}	1.00 mS cm^{-1}
1.00 dS m^{-1}	$1 \times 10^3 \mu\text{S cm}^{-1}$
1.00 mS cm^{-1}	$1 \times 10^3 \mu\text{S cm}^{-1}$
1.00 dS m^{-1}	$1.00 \text{ mmho cm}^{-1}$

S, Siemens; dS, deci Siemens; mS, mili Siemens; μS , micro Siemens

Fuente: Autoría propia.



4.3. Potencial osmótico

En el suelo, el potencial osmótico generado por las sales se puede calcular con la siguiente expresión matemática (Fuentes, 1996).

$$PO = 36.5 \times CE \quad (17)$$

El PO es el potencial osmótico (kPa o centibares) y CE es la conductividad eléctrica de la solución del suelo (dS m^{-1}), se presentan en la Ecuación 17.

Ejemplo 4.3: Cálculo del potencial osmótico generado por las sales para una conductividad eléctrica de la solución del suelo de 1.30 dS m^{-1} .

$$PO = 36.50 \times 1.30 = 47.45 \text{ centibares o kPa}$$

La presión osmótica generada por las sales es de 47.45 centibares o kPa (kilo Pascales).

La conductividad eléctrica y su efecto en el rendimiento de los cultivos

Mass – Hoffman y Ayers y Westcot, desarrollaron un modelo numérico basado en experimentos de campo para determinar el efecto de la conductividad eléctrica de la solución del suelo (CEs) en el rendimiento de los cultivos (Pizarro, 1996).

Tabla 18. Valores de CEs y su efecto sobre el rendimiento de los cultivos.

Cultivos	a	b	100	90	75	50	0
Alfalfa	2.00	7.30	2.00	3.40	5.40	8.80	15.50
Algodón	7.70	5.38	7.70	9.60	13.00	17.00	27.00
Aguacate	1.30	20.80	1.30	1.80	2.50	3.70	6.00
Brócoli	2.80	9.20	2.80	3.90	5.50	8.20	13.50
Caña de azúcar	1.70	6.00	1.70	3.40	5.90	10.00	19.00
Cebada	8.00	5.00	8.00	10.00	13.00	18.00	28.00
Cebolla	1.20	16.10	1.20	1.80	2.80	4.30	7.50
Fréjol	1.00	19.20	1.00	1.50	2.30	3.60	6.50
Fresa	1.00	33.30	1.00	1.30	1.80	2.50	4.00
Limón	1.70	16.10	1.70	2.30	3.30	4.80	8.00
Maíz	1.70	11.90	1.70	2.50	3.80	5.90	10.00
Maní	3.20	29.40	3.20	3.50	4.10	4.90	6.50
Melón	2.20	7.20	2.20	3.60	5.70	9.10	16.00
Pastos	6.90	6.40	6.90	8.50	10.80	14.70	22.50
Pepino	2.50	13.20	2.50	3.30	4.40	6.30	10.00
Pimiento, ají	1.50	13.90	1.50	2.20	3.30	5.10	8.50
Remolacha	4.00	8.90	4.00	5.10	6.80	9.60	15.00
Remolacha azucarera	7.00	6.25	7.00	8.70	11.00	15.00	24.00
Trigo	6.00	7.10	6.00	7.40	9.50	13.00	20.00
Tomate riñón	2.50	9.80	2.50	3.50	5.00	7.60	12.50

Fuente: Pizarro, 1996.

$$P = 100 - b \times (CEs - a)$$

(18)

El porcentaje de reducción de la producción (%); a y b son los coeficientes del cultivo; CEs es la conductividad eléctrica del extracto de saturación de la solución del suelo (mmhos cm^{-1} - dS m^{-1}), como se presenta en la Ecuación 18.

Ejemplo 4.4: Cálculo del porcentaje de producción que tendría el cultivo de maíz para una conductividad eléctrica del extracto de saturación de la solución del suelo de 2.00 dS m^{-1} .

$$P = 100 - 11.90 \times (2.00 - 1.70) = 96.43\%$$

El rendimiento potencial del cultivo de maíz es de 6.80 t ha^{-1} , la producción esperada sería de 6.50 t ha^{-1} , siendo la disminución de la producción de 0.30 t ha^{-1} por efecto de la salinidad del suelo. En suelos salinos, sin problemas, se pueden cultivar: palmeras, remolacha, espárragos, espinaca, cebada, algodón, sorgo, alfalfa y avena (Tabla 19).

Tabla 19. Tolerancia relativa de los cultivos a la salinidad.

Especie	CE (dS m^{-1})	Cultivos
Frutales	10.00-18.00	Palmera.
	5.00-10.00	Melón, higuera, olivo, melón.
	3.00-5.00	Pera, manzana, cítricos, ciruelo, almendro, fresa y aguacate
Intensivos	10.00-12.00	Remolacha, espárrago y espinaca.
	4.00-10.00	Tomate, brócoli, col, pimiento, coliflor, lechuga y patata,
	3.00-4.00	Zanahoria, cebolla, calabaza y pepino. Rábano, apio y fréjol.
Extensivos	10.00-16.00	Cebada, remolacha azucarera y algodón.
	6.00-10.00	Centeno, trigo, avena, arroz, sorgo, maíz, girasol y higuera.
	0.00-4.00	Fréjol.
Forrajes	4.00-12.00	Sorgo, alfalfa y avena.

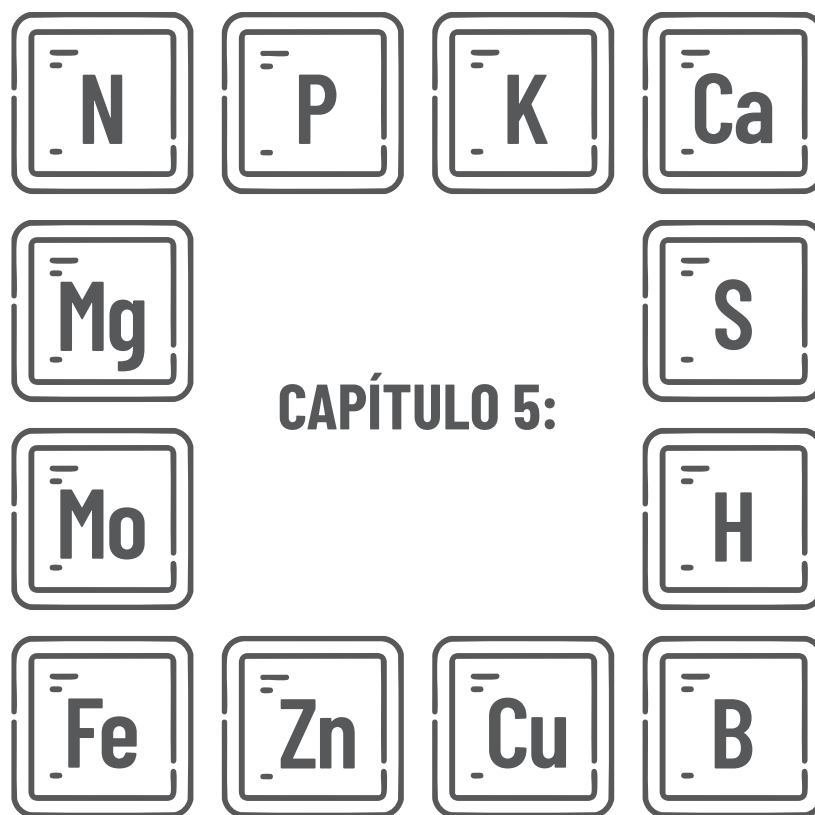
Fuente: Fernández, 1996.

Los suelos con un porcentaje de sodio intercambiable mayor al 40% pueden ser utilizados para cultivar alfalfa, cebada, remolacha y algodón (Tabla 20).

Tabla 20. Tolerancia relativa de los cultivos al sodio intercambiable.

PSI (%)	Cultivos
< 15.00	Aguacate, nueces, fréjol, algodón, maíz, pomelo, cítricos, lenteja y garbanzo.
15.00 - 40.00	Zanahoria, trébol, lechuga, mijo, caña de azúcar, mostaza, avena, rábano, arroz, centeno, sorgo, espinaca, tomate y trigo.
> 40.00	Alfalfa, cebada, remolacha y algodón,

Fuente: Fernández, 1996.



NUTRIENTES UTILIZADOS POR LOS CULTIVOS

5.1 Los nutrientes y formas asimilables

Los nutrientes indispensables para el crecimiento, desarrollo y fructificación de los cultivos están clasificados y agrupados como primarios, secundarios y menores. Los elementos primarios y secundarios también son conocidos como macronutrientes y los elementos menores como micronutrientes (Tabla 21) (Iñiguez, 1993).

Tabla 21. Forma asimilable y peso molecular de los nutrientes.

Nutrientes	Forma asimilable	PM (g)
Nitrógeno	NO_3^-	62.01
	NH_4^+	18.04
Fósforo	$\text{HPO}_4^{=}$	95.98
	H_2PO_4^-	96.99
Potasio	K^+	39.10
Calcio	Ca^{2+}	40.08
Magnesio	Mg^{2+}	24.31
Azufre	SO_4^{2-}	96.06
	SO_3^{2-}	80.06
Manganeso	Mn^{2+}	54.94
Hierro	Fe^{2+}	55.85
Cinc	Zn^{2+}	65.37
Cobre	Cu^{2+}	63.54
Boro	BO_3^{3-}	58.81
	HBO_3^{3-}	59.82
Molibdeno	MoO_4^{2-}	159.94
Cloro	Cl^-	35.45
Sodio	Na^{2+}	32.06

Fuente: Autoria propia.

Los nutrientes primarios son: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K); los nutrientes secundarios: calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) y los menores: manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (Bo), molibdeno (Mo) y cloro (Cl) (Marschner, 1995; Navarro & Navarro, 2003).

5.2 Función de los nutrientes en los cultivos

En forma general, la función y actividad de cada nutriente en los cultivos se presenta en la Tabla 22 (Marschner, 1995; Mengel & Kirkby, 2000).

Tabla 22. Los nutrientes y su función en la planta.

Nutrientes	Funciones
Grupo 1	Nutrientes que forman compuestos orgánicos
N	Constituyente de los aminoácidos, amidas, proteínas, ácidos nucleicos, nucleótidos, coenzimas, hexoaminas, proteínas, etc. Estimula el crecimiento de la planta.
S	Componente de la cisteína, cistina y metionina y de las proteínas. Constituyente del ácido lipoico, coenzima A, tiamina pirofosfato, glutatión, biotina, adenosina-5 - fosfosulfato y 3-fosfoadenosina. Ayuda a la transferencia de energía de la planta.
Grupo 2	Nutrientes que son importantes en el almacenamiento de energía o en la integridad estructural
P	Componente del azúcar fosfato, ácidos nucleicos, nucleótidos, coenzimas, fosfolípidos, ácido fítico y otros. Presenta un papel clave en las reacciones que interviene el ATP. Ayuda en el crecimiento de la raíz y formación de las semillas.
B	Forma complejos con manitol, mananos, ácido polimanurónico y otros constituyentes de la pared celular. Involucrado en la elongación celular y en el metabolismo de los ácidos nucleicos, floración, división celular y formación de frutos.
Si	Se deposita como sílica-gel amorfa en la pared celular. Contribuye a las propiedades mecánicas de la pared celular, como la elasticidad y la rigidez.
Grupo 3	Nutrientes que permanecen en forma iónica
K	Requerido como cofactor por más de 40 enzimas. Principal catión en el establecimiento de la turgencia celular y en el mantenimiento de la electro neutralidad. Ayuda en la fotosíntesis, transporte de nutrientes, reserva de almidón, provee de fuerza al tallo y calidad a la semilla.
Na	Involucrado en la regeneración del fosfoenolpiruvato en las plantas C4 y CAM. Sustituye al potasio en algunas funciones.
Mg	Requerido por muchas enzimas involucradas en la transferencia de grupos fosfato. Constituyente de la molécula de clorofila. Ayuda en la formación de azúcares.
Ca	Constituyente de la lámina media de la pared celular. Requerido como cofactor por algunas enzimas involucradas en la hidrólisis del ATP y fosfolípidos. Actúa como segundo mensajero en la regulación metabólica. También interviene en la integridad de las membranas. Ayuda en la formación y desarrollo del fruto.
Mn	Requerido para la actividad de algunas deshidrogenasas, descarboxilasas, quinasas, oxidasas, peroxidasas. Involucrado con otros cationes en la activación de enzimas y en la producción de O ₂ en la fotosíntesis. Transporte electrónico y activador enzimático.
Cl	Requerido en las reacciones fotosintéticas involucradas en la producción de oxígeno.
Grupo 4	Nutrientes involucrados en la transferencia de electrones
Fe	Constituyente de los citocromos y de las proteínas no hemínicas involucradas en la fotosíntesis, fijación del N ₂ y la respiración. Ayuda en el crecimiento de la raíz.
Cu	Componente del ácido ascórbico oxidasa, tirosinasa, monoamina oxidasa, uricasa, citocromo oxidasa, fenolasa, lacasa y plastocianina. Transporte electrónico y activador enzimático.
Zn	Constituyente del alcohol deshidrogenasa, glutámica deshidrogenasa, anhidrasa carbónica, etc. Ayuda en la formación de frutos y transporte de iones.
Mo	Constituyente de la nitrogenasa, nitrato reductasa y xantina deshidrogenasa. Transporte electrónico y activador enzimático.
Ni	Constituyente de la ureasa. En las bacterias fijadoras de N ₂ constituyente de las hidrogenasas. Transporte electrónico y activador enzimático.

Fuente: Mengel & Kirkby, 2000.

5.3. Concentración de nutrientes en el tejido vegetal

La concentración de nutrientes en el tejido vegetal en varios tipos de cultivos se resume en la Tabla 23.

Tabla 23. Concentración de nutrientes en el tejido vegetal.

Cultivo	N	P	k	Ca	Mg	S
Arróz	2.50-3.00	0.25-0.40	2.50-3.50	0.75-1.00	0.50-0.70	0.15-0.20
Maíz	2.80-3.30	0.25-0.35	1.80-2.30	0.25-0.40	2.50-4.00	0.15-0.20
Trigo	3.00-3.30	0.20-0.30	2.30-2.50	0.10-0.14	3.00-4.00	0.20-0.40
Cacao	1.90-2.30	0.15-0.18	1.70-3.00	0.90-1.20	4.00-7.00	0.17-0.20
Algodón	3.50-4.00	0.20-0.25	1.40-1.60	0.30-0.40	4.00-5.00	0.20-0.30
Piña	2.00-2.20	0.21-0.23	2.50-2.70	0.30-0.40	4.00-5.00	0.20-0.30
Fréjol	3.00-5.00	0.20-0.30	2.00-2.50	0.15-0.20	4.00-7.00	0.50-1.00
Soya	4.00-5.00	0.25-0.50	1.70-2.50	0.40-2.00	3.00-10.00	0.25-0.50
Papa	3.00-4.50	0.35-0.50	3.50-5.00	1.00-2.00	5.00-7.50	0.25-0.50
Caña de azúcar	1.90-2.20	0.18-0.24	1.10-1.50	0.50-1.00	2.00-3.00	0.20-0.30
Yuca	5.10-5.80	0.30-0.50	1.30-2.00	0.70-0.90	2.90-3.50	0.26-0.30
Banano	2.70-3.60	0.16-0.27	3.20-5.40	0.60-1.20	2.70-6.00	0.16-0.30
Palma aceite	2.50-3.00	0.15-0.21	1.00-1.50	0.50-0.70	2.40-3.00	0.20-0.23
Tomate riñón	1.60-4.00	0.25-0.50	15.00-30.00	0.30-0.80	0.30-0.80	0.15-0.50
Col - Lechuga	3.50-4.00	0.60-0.60	4.50-7.50	0.20-0.30	0.30-0.70	0.50-1.00
Café	2.50-2.80	0.20-0.40	3.00-3.50	1.00-2.00	0.40-0.12	0.30-0.80
Papaya	2.60-4.00	0.20-0.40	3.00-5.00	0.40-0.80	0.25-0.80	0.20-0.80
Pepino	3.00-4.50	0.25-0.70	3.00-5.00	0.20-0.30	0.40-0.60	4.00-12.00
Pasto kikuyo	2.50-4.00	0.40-0.60	4.00-5.00	0.15-0.23	0.30-0.50	0.25-0.50
Pasto bermuda	2.50-3.00	0.20-0.30	2.00-3.00	0.25-0.40	0.25-0.40	0.20-0.30
Rosas	2.80-4.40	0.20-0.30	1.80-2.60	0.80-1.50	0.20-0.35	0.16-0.21
Clavel	3.30-4.80	0.20-0.40	2.50-3.50	1.00-2.00	0.22-0.40	-
Crisantemo	4.50-5.50	0.30-0.60	4.00-6.50	1.00-2.00	0.30-0.60	0.30-0.70
Astromelia	3.50-5.60	0.30-0.70	3.50-5.00	1.00-2.00	0.30-0.60	-
Cultivo	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Arroz	40.00-70.00	10.00-20.00	200.00-300.00	100.00-150.00	-	25.00-35.00
Maíz	15.00-20.00	6.00-20.00	50.0.-250.00	50.00-150.00	0.10-0.20	15.00-50.00
Trigo	20.00-50.00	9.00-18.00	-	16.00-28.00	0.10-0.50	20.00-40.00
Cacao	30.00-40.00	10.00-15.00	150.00-200.00	150.00-200.00	0.50-1.00	50.00-70.00
Algodón	20.00-30.00	30.00-40.00	60.00-80.00	20.00-40.00	1.00-2.00	10.00-15.00
Piña	30.00-40.00	9.00-12.00	100.00-200.00	50.00-200.00	-	10.00-15.00
Fréjol	30.00-60.00	10.00-20.00	100.00-450.00	30.00-300.00	0.50-1.00	20.00-100.00
Soya	21.00-55.00	10.00-30.00	50.00-350.00	20.00-100.00	1.00-5.00	20.00-50.00
Papa	20.00-50.00	-	70.00-150.00	40.00-300.00	0.10-1.50	15.00-30.00
Caña de azúcar	15.00-50.00	8.00-10.00	80.00-500.00	50.00-250.00	0.10-0.30	25.00-50.00
Yuca	30.00-60.00	6.00-10.00	120.00-140.00	50.00-120.00	1.00-3.00	30.00-60.00
Banano	10.00-25.00	6.00-30.00	80.00-360.00	200.00-1800.00	1.50-3.00	20.00-50.00
Palma aceite	25.00-30.00	10.00-35.00	-	150.00-200.00	0.50-1.00	15.00-20.00
Tomate riñón	10.00-25.00	6.00-20.00	20.00-250.00	35.00-200.00	0.30-0.50	35.00-100.00
Col - Lechuga	60.00-100.00	5.00-25.00	50.00-200.00	25.00-200.00	0.08-0.14	20.00-200.00
Café	20.00-50.00	4.00-10.00	25.00-100.00	20.00-150.00	0.10-0.15	15.00-40.00
Papaya	10.00-50.00	6.00-25.00	80.00-200.00	200.00-1000.00	-	2.00-200.00
Pepino	25.00-100.00	5.00-20.00	50.00-200.00	40.00-250.00	-	20.00-50.00
Pasto kikuyo	23.00-50.00	7.00-25.00	50.00-200.00	25.00-150.00	0.10-1.00	25.00-150.00
Pasto bermuda	10.00-25.00	10.00-25.00	75.00-300.00	50.00-300.00	0.10-1.00	25.00-150.00
Rosas	30.00-60.00	5.00-15.00	75.00-150.00	30.00-250.00	-	15.00-50.00
Clavel	30.00-100.00	4.00-20.00	50.00-150.00	40.00-300.00	1.00-5.00	25.00-75.00
Crisantemo	35.00-80.00	8.00-20.00	100.00-500.00	80.00-300.00	2.00-2.50	20.00-80.00
Astromelia	13.00-75.00	5.00-20.00	100.00-300.00	50.00-90.00	-	35.00-85.00

Fuente: Osorio, 2012.

5.4. Aplicación de los fertilizantes de acuerdo con el ciclo del cultivo

La estrategia para aplicar los fertilizantes depende del tipo de cultivo y de las fases de desarrollo; en cultivos como la cebolla, lechuga y tomate, el total de N, P y K debe aplicarse desde la fase I hasta la fase III (Tabla 24); en los cultivos como fréjol, maíz y maní, el total de N, P y K debe aplicarse en las dos primeras fases; en cultivos anuales, la dosificación puede ser semanal o debe concentrarse en ciertos períodos importantes (floración y formación de frutos). La aplicación ideal de los fertilizantes debe ajustarse a las curvas de absorción de nutrientes, las cuales están relacionadas con la variedad del cultivo y piso altitudinal.

Tabla 24. Duración de las etapas de crecimiento de los cultivos.

Cultivo	I	II	III	IV	Total	Región
	(días)					
Brócoli	35.00	45.00	40	15.00	135.00	California
Lechuga	20.00	30.00	15	10.00	75.00	Mediterráneo
Cebolla	15.00	25.00	70	40.00	150.00	Mediterráneo
Berenjena	30.00	40.00	40	70.00	130.00	Árido
Pimiento	30.00	35.00	40	20.00	125.00	Mediterráneo
Melón	30.00	45.00	35	10.00	120.00	California
Pepino	20.00	30.00	40	15.00	105.00	Árida
Sandía	20.00	30.00	30	30.00	110.00	Italia
Papa	25.00	30.00	45	30.00	130.00	Continental
Fréjol	20.00	30.00	30	10.00	90.00	California, Mediterráneo
Maní	35.00	45.00	35	25.00	140.00	Mediterráneo
Maíz dulce	30.00	30.00	30	10.00	110.00	Idaho, EU
Maíz grano	30.00	40.00	50	50.00	170.00	Idaho, EU
Banano (1 año)	120.00	90.00	120	30.00	390.00	Mediterráneo
Banano (2 año)	120.00	60.00	180	5.00	365.00	Mediterráneo
Uvas	20.00	40.00	120	60.00	240.00	Latitudes bajas
Cítricos	60.00	90.00	120	95.00	365.00	Mediterráneo

I, fase inicial.

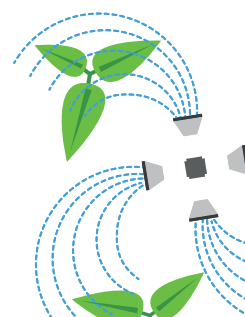
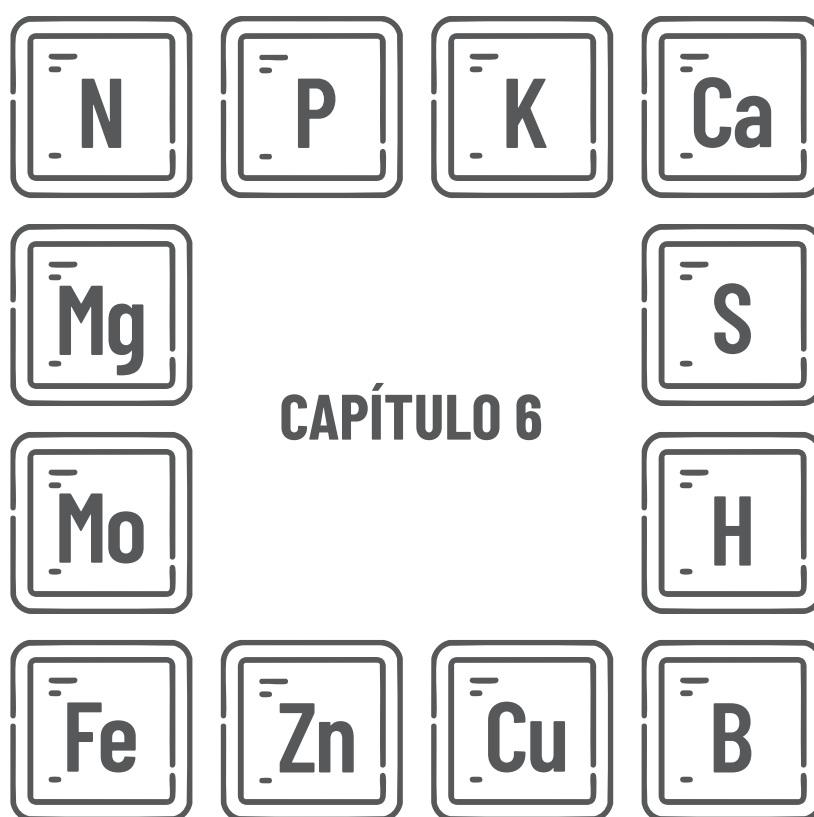
II, fase de desarrollo.

III, fase de formación y desarrollo de frutos.

IV, fase de maduración y de cosecha.

Fuente: Dorembos. & Pruitt, 1990; Allen et al., 2006.





RECOMENDACIONES DE FERTILIZACIÓN

La aplicación de los fertilizantes de origen mineral u orgánico para los cultivos es necesaria para evitar la pérdida de la fertilidad de los suelos, cuando no se realiza la fertilización, los suelos paulatinamente disminuyen su fertilidad y la producción decrece en cada cosecha, por este motivo, al suelo es necesario aportarle los nutrientes absorbidos, con un manejo optimizado para promover una agricultura sustentable (Iníñez, 1999).

Ingham (2017), sostiene que un manejo adecuado de la materia orgánica y de la oxigenación en el suelo mejora la actividad microbiana, ayudando a la descomposición de las partículas minerales y orgánicas, incrementando la disponibilidad de los nutrientes para los cultivos.

A nivel local, nacional e internacional existen varias formulaciones recomendadas para la fertilización de los diferentes cultivos, las cuales se han obtenido en investigaciones de campo e invernadero (experimentos), tanto en suelos como en sustratos.

Las recomendaciones de fertilización mineral y orgánica se realizan en base a análisis químicos de suelos, aguas y plantas (Israelí, 2002). Cualquiera que sea la recomendación de fertilización, la dosis real está en función del suelo, cultivo, clima, labores culturales, control de plagas y enfermedades, manejo del agua en el suelo, operación, regulación del equipo de inyección de los fertilizantes disueltos y de un monitoreo de tipo permanente de algunos nutrientes en la solución del suelo como: pH, CE, temperatura, contenido de nitratos y otros nutrientes importantes.

Las formulaciones que se compilan en este capítulo son orientativas y deben aplicarse en base a recomendaciones provenientes de especialistas, previo a análisis químicos de suelos, aguas y plantas y de la meta del rendimiento.

6.1. Interpretación de los análisis químicos de suelos

Las interpretaciones edafológicas para los diferentes iones de los análisis químicos se presentan en la Tabla 25 para el potencial hidrógeno en el suelo y en la Tabla 26, las recomendaciones de fertilización (kg ha^{-1}) para varios cultivos en función de la concentración de $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ existente en la solución del suelo. Para el cultivo de fréjol, si el análisis de suelos proporciona valores bajos de $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$, la dosis recomendada sería: 80 kg ha^{-1} de N, 40 kg ha^{-1} de P_2O_5 (equivalente a 17.46 kg ha^{-1} de P) y 60 kg ha^{-1} de K_2O (equivalente a 49.8 kg ha^{-1} de K).

Tabla 25. Interpretación del potencial hidrógeno.

pH	Interpretación
0.00 – 5.00	Muy ácido
5.10 – 5.50	Ácido
5.60 – 6.00	Medianamente ácido
6.10 – 6.50	Ligeramente ácido
6.60 – 7.50	Neutro
7.60 – 8.00	Ligeramente alcalino
8.10 – 8.50	Medianamente alcalino
8.50 – 14.00	Alcalino

Fuente: Padilla, 1979; Iníñez, 1993.

Tabla 26. Interpretación de iones presentes en suelos.

Nutriente	Unidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
N-NH ₄	ppm	< 25.00	25.10-50.00	50.10-75.00	75.10-100.0	> 100.00
P ₂ O ₅	ppm	< 15.00	15.10-30.00	30.10-45.00	45.10-60.0	> 60.00
K ₂ O	ppm	< 60.00	60.10-120.00	120.10-180.00	180.10-240.0	> 240.00
Ca	meq 100g ⁻¹	< 1.50	1.51-3.50	3.51-5.50	5.51-7.50	> 7.51
Mg	meq 100g ⁻¹	< 0.60	0.61-1.20	1.21-1.80	1.81-2.40	> 2.41
S*	ppm	-	< 12.00	12.00-20.00	20.00-50	> 50.00
Fe*	ppm	-	< 5.00	5.00-10.00	10.00-50	> 50.00
Cu*	ppm	-	< 0.50	0.50-1.00	1.00-20	> 20.00
Zn*	ppm	-	< 2.00	2.00-3.00	3.00-10	> 10.00
B*	ppm	-	< 12.00	12.00-20.00	20.00-50	> 50.00
MO	%	< 1.90	1.91-3.90	3.91-4.90	4.91-7.9	> 7.91
CIC	meq 100g ⁻¹	< 6.00	6.10-12.00	12.10-25.00	25.10-40.00	> 40.10

Fuente: Iñiguez, 1993; Molina & Meléndez, 2002 (*).

Se resume la interpretación de algunas variables componentes de los análisis químicos de los suelos de la Unión Europea (Salvatierra, 2022). Una gran ventaja que presenta está relacionada con las variables para las clases texturales arenoso, franco y arcilloso (Tabla 27).

Tabla 27. Interpretación de los análisis químicos de suelos.

Determinación analítica	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
pH (1:2.5)	< 5.50	5.50 - 6.50	6.60 - 7.50	7.60 - 8.50	> 8.50
CO ₃ Ca total (%)	< 2.00	2.00 - 10.00	11.00 - 20.00	21.00 - 40.00	> 40.00
CO ₃ Ca activo (%)	< 1.00	1.00 - 4.00	5.00 - 9.00	10.00 - 15.00	> 15.00
CE (dS m ⁻¹ , 1:5)	< 0.20	0.20 - 0.40	0.41- 0.70	0.71 - 1.20	> 1.20
Relación C/N	< 6.00	6.00 - 8.00	8.10 - 10.00	10.10 - 12.00	> 12.10
Sodio (%)	< 1.00	1.00 - 2.00	3.00 - 9.00	10.00 - 15.00	> 15.00
Relación Ca/Mg (meq L ⁻¹)	< 1.00	1.00 - 3.00	4.00 - 6.00	7.00 - 10.00	> 10.00
Relación K/Mg (meq L ⁻¹)	< 0.10	0.10 - 0.15	0.16 - 0.35	0.36 - 0.60	> 0.60
Fósforo* (ppm)	< 6.00 < 8.00 < 1.00	7.00-12.00 6.00-16.00 11.00.0-20.00	13.00-18.00 17.00-24.00 21.00-30.00	19.00-30.00 25.00-40.00 31.00-50.00	31.00-48.00 41.00-64.00 51.00- 80.0
Potasio** (ppm)	< 75.00 < 100.00 < 120.00	76.00-150.00 101.00-200.00 121.00-235.00	151.00-235.00 201.00-300.00 236.00-350.00	236.00-390.00 301.00-480.00 351.00-580.00	391.00 - 625.00 481.00 - 780.00 581.00 - 940.00
Magnesio** (meq 100 g ⁻¹)	< 0.50 < 0.90 < 1.20	0.51-1.00 0.91-1.80 1.21-2.30	1.01-1.75 1.81-2.90 2.31-3.75	1.76-2.50 2.91-4.20 3.76-5.40	> 2.50 > 4.20 > 5.40
Calcio** (meq 100 g ⁻¹)	< 3.00 < 5.00 < 7.00	3.10-6.00 5.10-10.00 7.10-13.00	6.10-7.00 10.10-12.00 13.10-16.00	7.10-8.00 12.10-15.00 16.10-20.00	> 8.00 > 15.00 > 20.00

*: Método de Olsen; **: Método del acetato de amonio 1N.

Fuente: Salvatierra, 2022.

6.2. Fertilización a partir del análisis químico de suelos

Para realizar las recomendaciones de fertilización en kg ha^{-1} , utilizando la información de los análisis químicos de suelos se requieren tablas guías (Tabla 28).

Tabla 28. Recomendaciones de fertilización para cultivos.

Cultivo	Análisis de suelo Nutriente	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Abaca	N	245.00	205.00	165.00	125.00	85.00
	P ₂ O ₅	205.00	165.00	125.00	85.00	45.00
	K ₂ O	405.00	315.00	225.00	135.00	45.00
Ajo	N	130.00	105.00	80.00	55.00	30.00
	P ₂ O ₅	150.00	120.00	90.00	60.00	30.00
	K ₂ O	150.00	120.00	90.00	60.00	30.00
Ajonjolí	N	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
	P ₂ O ₅	80.00	65.00	50.00	35.00	20.00
	K ₂ O	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
Alfalfa	N	75.00	60.00	45.00	30.00	15.00
	P ₂ O ₅	95.00	75.00	55.00	35.00	15.00
	K ₂ O	95.00	75.00	55.00	35.00	15.00
Algodón	N	125.00	95.00	65.00	35.00	5.00
	P ₂ O ₅	45.00	35.00	25.00	15.00	5.00
	K ₂ O	65.00	50.00	35.00	20.00	5.00
Araucaria Ciprés, Pino Casuarina	N	300.00	250.00	150.00	150.00	100.00
	P ₂ O ₅	240.00	200.00	120.00	120.00	80.00
	K ₂ O	170.00	140.00	110.00}	80.00	50.00
Arveja	N	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
	P ₂ O ₅	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
	K ₂ O	140.00	110.00	80.00	50.00	20.00
Arroz inundación	N	160.00	130.00	100.00	70.00	40.00
	P ₂ O ₅	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
	K ₂ O	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
Arroz seco	N	135.00	115.00	95.00	75.00	55.00
	P ₂ O ₅	85.00	65.00	45.00	25.00	5.00
	K ₂ O	85.00	65.00	45.00	25.00	5.00
Avena	N	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
	P ₂ O ₅	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
	K ₂ O	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
Babaco	N	180.00	150.00	120.00	90.00	60.00
	P ₂ O ₅	210.00	170.00	130.00	90.00	50.00
	K ₂ O	200.00	160.00	120.00	80.00	40.00
Cacao Mayor a 5 años	N	300.00	240.00	180.00	120.00	60.00
	P ₂ O ₅	180.00	140.00	100.00	60.00	20.00
	K ₂ O	360.00	280.00	200.00	120.00	40.00
Café* Mayor a 5 años	N	300.00	240.00	180.00	120.00	60.00
	P ₂ O ₅	180.00	140.00	100.00	60.00	20.00
	K ₂ O	360.00	280.00	200.00	120.00	40.00
Camote	N	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
	P ₂ O ₅	140.00	110.00	80.00	50.00	20.00
	K ₂ O	140.00	110.00	80.00	50.00	20.00
Caña de Azúcar	N	200.00	170.00	140.00	110.00	80.00
	P ₂ O ₅	160.00	130.00	100.00	70.00	40.00
	K ₂ O	200.00	160.00	120.00	80.00	40.00

Tabla 28. Recomendaciones de fertilización para cultivos.

Cultivo	Análisis de suelo Nutriente	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Cebada	N	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
	P ₂ O ₅	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
	K ₂ O	70.00	55.00	40.00	25.00	10.00
Cebolla	N	140.00	110.00	80.00	50.00	20.00
	P ₂ O ₅	150.00	120.00	90.00	60.00	30.00
	K ₂ O	150.00	120.00	90.00	60.00	30.00
Cítricos* Mayor 5 años	N	250.00	200.00	150.00	100.00	50.00
	P ₂ O ₅	250.00	200.00	150.00	100.00	50.00
	K ₂ O	250.00	200.00	150.00	100.00	50.00
Cocotero* Mayor a 4 años	N	300.00	250.00	200.00	150.00	100.00
	P ₂ O ₅	300.00	160.00	120.00	80.00	40.00
	K ₂ O	400.00	320.00	240.00	160.00	80.00
	Mg	150.00	120.00	90.00	60.00	30.00
Chirimoya*	N	375.00	300.00	225.00	150.00	75.00
	P ₂ O ₅	250.00	200.00	150.00	100.00	50.00
	K ₂ O	400.00	325.00	250.00	175.00	100.00
Flores	N	125.00	100.00	75.00	50.00	25.00
	P ₂ O ₅	250.00	200.00	150.00	100.00	50.00
	K ₂ O	125.00	100.00	75.00	50.00	25.00
Fréjol	N	95.00	75.00	55.00	35.00	15.00
	P ₂ O ₅	85.00	65.00	45.00	25.00	5.00
	K ₂ O	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
Garbanzo	N	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
	P ₂ O ₅	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
	K ₂ O	140.00	110.00	80.00	50.00	20.00
Girasol	N	120.00	10.00	80.00	60.00	40.00
	P ₂ O ₅	100.00	85.00	70.00	55.00	40.00
	K ₂ O	140.00	115.00	90.00	60.00	40.00
Haba	N	110.00	90.00	70.00	50.00	40.00
	P ₂ O ₅	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
	K ₂ O	130.00	105.00	80.00	55.00	30.00
Lenteja	N	95.00	75.00	55.00	35.00	15.00
	P ₂ O ₅	115.00	90.00	65.00	40.00	15.00
	K ₂ O	130.00	100.00	70.00	40.00	10.00
Maíz	N	160.00	130.00	100.00	70.00	40.00
	P ₂ O ₅	110.00	90.00	70.00	50.00	30.00
	K ₂ O	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
Maní	N	50.00	40.00	30.00	20.00	10.00
	P ₂ O ₅	80.00	60.00	40.00	20.00	10.00
	K ₂ O	80.00	60.00	40.00	20.00	10.00
Manzana* Pera Durazno	N	200.00	160.00	120.00	80.00	40.00
	P ₂ O ₅	200.00	160.00	120.00	80.00	40.00
	K ₂ O	250.00	200.00	150.00	100.00	50.00
Maracuya	N	250.00	200.00	150.00	100.00	50.00
	P ₂ O ₅	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
	K ₂ O	250.00	210.00	170.00	130.00	70.00

Tabla 28. Recomendaciones de fertilización para cultivos.

Cultivo	Análisis de suelo Nutriente	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Naranja	N	190.00	160.00	130.00	100.00	70.00
	P ₂ O ₅	160.00	130.00	100.00	70.00	40.00
	K ₂ O	160.00	130.00	100.00	70.00	40.00
Papaya	N	160.00	130.00	100.00	70.00	40.00
	P ₂ O ₅	300.00	240.00	180.00	120.00	60.00
	K ₂ O	150.00	120.00	90.00	60.00	30.00
Pasto sierra	N	200.00	160.00	120.00	80.00	40.00
	P ₂ O ₅	180.00	140.00	100.00	60.00	20.00
	K ₂ O	180.00	140.00	100.00	60.00	20.00
Pasto litoral	N	230.00	185.00	140.00	95.00	50.00
	P ₂ O ₅	140.00	110.00	80.00	50.00	20.00
	K ₂ O	160.00	125.00	90.00	55.00	20.00
Pepino	N	95.00	75.00	55.00	35.00	15.00
	P ₂ O ₅	140.00	110.00	80.00	50.00	20.00
	K ₂ O	130.00	100.00	70.00	40.00	10.00
Pimiento	N	200.00	160.00	120.00	80.00	40.00
	P ₂ O ₅	160.00	130.00	100.00	70.00	40.00
	K ₂ O	160.00	130.00	100.00	70.00	40.00
Piña	N	250.00	210.00	170.00	130.00	50.00
	P ₂ O ₅	70.00	60.00	50.00	40.00	30.00
	K ₂ O	600.00	460.00	320.00	180.00	40.00
Sambo	N	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
	P ₂ O ₅	120.00	100.00	80.00	60.00	40.00
	K ₂ O	90.00	70.00	50.00	30.00	10.00
Sandía	N	130.00	105.00	80.00	55.00	30.00
	P ₂ O ₅	180.00	140.00	100.00	60.00	20.00
	K ₂ O	100.00	80.00	60.00	40.00	20.00
Sorgo	N	120.00	100.00	80.00	60.00	40.00
	P ₂ O ₅	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
	K ₂ O	140.00	110.00	80.00	50.00	20.00
Trigo	N	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
	P ₂ O ₅	120.00	95.00	70.00	45.00	20.00
	K ₂ O	80.00	65.00	50.00	35.00	20.00
Tomate de árbol	N	180.00	150.00	120.00	90.00	60.00
	P ₂ O ₅	150.00	120.00	90.00	60.00	30.00
	K ₂ O	200.00	160.00	120.00	80.00	40.00
Tomate riñón	N	250.00	200.00	150.00	100.00	50.00
	P ₂ O ₅	200.00	160.00	120.00	80.00	40.00
	K ₂ O	200.00	160.00	120.00	80.00	40

*gramos por planta

Fuente: Iñiguez, 1993.

Por ejemplo, la dosificación de los nutrientes N-P-K para el cultivo de maíz, en cuyo análisis químico de suelos se informa un contenido: nitrógeno, 16.00 ppm; fósforo, 8 ppm; y potasio, 20 ppm.

El contenido de nitrógeno, como de fósforo y potasio, son muy bajos, según la Tabla 26. La recomendación de fertilización para el cultivo de maíz sería: nitrógeno, 160 kg ha⁻¹; fósforo, 110 kg ha⁻¹; y potasio, 120 kg ha⁻¹ (Tabla 28).

6.3. Fertilización en base a la producción esperada

En la generación de la recomendación de fertilización para los cultivos se requiere información sobre la absorción nutrimental por tonelada de producto producido. Para esto, se detalla un ejemplo en el cultivo de fréjol, considerando un rendimiento de 5.00 t ha⁻¹, la dosis de los nutrientes sería: 86.00 kg ha⁻¹ de N, 22.00 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 94.50 kg ha⁻¹ de K₂O, 20.00 kg ha⁻¹ de Ca y 10.00 kg ha⁻¹ de Mg (Tabla 29).

Tabla 29. Recomendaciones de fertilización para cultivos.

Cultivo	Cosecha (t ha ⁻¹)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O (kg t ⁻¹)	Ca	Mg	s
Ajo	6.00-15.00	8.00-13.00	4.00-6.00	8.00-15.00	-	-	-
Aguacate Hass**	10.00-15.00	6.20	2.90	18.20	4.80	2.50	-
Alcachofa	12.00-30.00	8.00-10.00	1.50-4.00	12.00-20.00	-	1.30-1.60	-
Alfalfa	15.00	27.00	2.50	21.00	12.00	3.00	3.50
Algodón	1.50	160.00	48.00	140.00	102.00	21.30	24.00
Arándano**	10.00-20.00	4.70	0.80	5.20	2.00	1.21	-
Arroz**	6.00-9.00	16.40	7.10	27.00	6.60	4.00	1.70
Arveja**	6.00-10.00	8.00	4.20	8.00	7.50	3.75	-
Avena	3.50	36.50	12.70	45.90	-	6.20	6.00
Brócoli	12.00-18.00	4.00-5.00	1.00-1.80	4.00-7.00	-	0.40-0.7	-
Cacao	2.50	36.00	5.00	39.00	-	0	-
Camote	24.00	4.80	1.90	9.80	-	-	-
Caña de azúcar	3.40	69.90	33.30	110.00	-	0.50	14.90
Cebada**	4.00-7.00	22.20	7.10	22.00	8.60	11.60	4.20
Cebolla**	25.00-50.00	3.10	1.20	4.00	1.60	5.40	2.70
Cerezo**	10.00-15.00	6.42	1.73	5.00	4.80	0.86	-
Col	88.00	3.40	0.80	3.20	-	2.50	0.82
Durazno**	15.00-40.00	5.14	1.38	5.25	2.22	0.45	-
Espárrago	6.00-10.00	10.00-20.00	3.00-5.00	15.00-30.00	4.00	1.00	-
Fréjol	2.00-5.00	17.20	4.40	18.90	2.0	2.00	2.00
Frutillas**	25.00-80.00	2.00-3.00	1.00-1.50	4.00-5.00	1.60	2.00	-
Girasol	6.40	50.30	19.90	36.60	-	0.86	4.80
Kiwi**	20-30	5.00	1.75	5.93	2.00	11.90	-
Lechuga	50.00	2.00	0.68	1.14	-	1.00	-
Limón**	40-80	2.70	0.60	4.20	1.00	-	-
Maíz	12.00	22.00	10.20	23.80	3.00	0.55	3.00
Maíz para silo	80.00	3.70	1.60	3.70	0.80	5.90	0.46
Manzana roja**	30-60	1.470	0.50	1.90	1.33	0.40	-
Maní	3.00	69.00	7.00	35.00	19.00	0.75	-
Melón**	25.00-70.00	4.50	1.60	6.50	1.30	19.00	-
Naranja**	40.00-70.00	2.72	0.60	4.24	1.10	0.70	-
Nogal**	2.00-12.00	7.00	3.00	9.00	3.00	0.55	-
Papas**	25.00-50.00	3.80	1.03	4.00	1.60	1.50	0.40
Papaya**	15.00-25.00	6.00	2.33	7.00	3.00	0.86	-
Pepino	25.00	4.00	1.20	7.80	-	1.50	-
Pimiento**	24.00-40.00	3.50	0.80	5.50	2.00	1.10	-
Pera**	50.00-60.00	2.23	0.65	1.97	1.10	1.00	-
Piña	44.00	3.90	3.20	15.20	-	0.55	0.37
Raigrás	12.00	20.00	7.90	22.40	-	1.60	0.00
Remolacha**	70.00-100.00	2.50	0.80	3.20	0.80	3.80	-
Sandía**	20.00-50.00	3.00-4.00	0.80-1.50	4.00-5.00	0.86	0.38	-
Sorgo	6.00	29.80	10.50	30.00	4.00	1.00-2.0	4.80
Soya	4.00	87.50	16.10	56.90	16.00	0	5.60
Tomate riñón**	80.00-200.00	3.25	0.75	5.00	0.40	5.00	0.60
Trigo**	5.00-9.00	24.30	7.33	24.00	7.00	6.70	4.20
Uva mesa**	25.00-30.00	4.00	1.70	5.60	2.22	0.35	-

Fuente: Proaño, 2010; Bertsch, 2009; Vidal, 2022 (**).

6.4. Fertilización para cultivos hidropónicos

Para los cultivos hidropónicos y semi hidropónicos, se presentan algunas formulaciones de soluciones nutritivas completas utilizadas, para esto, el nitrógeno varía de 168 a 210 ppm, el fósforo de 31 a 36.7 ppm, el potasio de 209 a 273 ppm, calcio de 146 a 180 ppm, magnesio de 22 a 48 ppm y azufre de 29 a 112 ppm (Tabla 30).

Tabla 30. Formulaciones de soluciones nutritivas.

Elemento	Hoagland	Canada	Steiner	Promedio
(ppm)				
NO ₃ ⁻	210.00	200.00	168.00	192.70
H ₂ PO ₄ ⁻	31.00	36.70	31.00	32.90
K ⁺	234.00	209.00	273.00	238.70
Ca ²⁺	160.00	146.00	180.00	162.00
Mg ²⁺	48.00	22.00	48.00	39.30
SO ₄ ²⁻	64.00	29.50	112.00	68.50
Fe	2.00	1.70	3.00	2.23
Mn	0.50	0.80	1.40	0.90
Zn	0.05	0.094	0.30	0.15
B	0.50	0.46	0.20	0.39
Mo	0.01	0.027	0.10	0.14
Cu	0.02	0.035	0.10	0.05

Fuente: Chávez, Preciado, & Benavides, 2006; Resh, 1997.

La solución nutritiva balanceada (aniones = cationes) universal de Steiner, cuya concentración de aniones y cationes es de 20 meq L⁻¹; presión osmótica de 0.72 atmósferas (7.44 metros) y conductividad eléctrica de la disolución de 2.00 dS m⁻¹; siendo la suma total de los aniones y cationes de 1 678.00 ppm, se presenta en la Tabla 31.

Tabla 31. Formulación balanceada Steiner para cultivos hidropónicos.

Nutriente	(meq L ⁻¹)	Relación	Aniones/cationes	(ppm)	(ppm)
S					
NO ₃ ⁻	12.00	1.000	20 meq L ⁻¹	744.00 (NO ₃ ⁻)	168.14 (N)
H ₂ PO ₄ ⁻	1.00	0.083		97.00 (H ₂ PO ₄ ⁻)	31.00 (P)
SO ₄ ²⁻	7.00	0.583		336.00 (SO ₄ ²⁻)	112.00 (S)
K ⁺	7.00	0.583	20 meq L ⁻¹	273.00 (K ⁺)	273.00 (K)
Ca ²⁺	9.00	0.750		180.00 (Ca ²⁺)	180.00 (Ca)
Mg ²⁺	4.00	0.333		48.00 (Mg ²⁺)	48.00 (Mg)

Presión Osmótica = 0.72 atmósferas (7.44 m). CE = 2.0 dS m⁻¹

Fuente: Chávez, Preciado, & Benavides, 2006.

6.5. Nutrientes en los estiércoles

El contenido de nitrógeno total en el estiércol de vacuno es de $4 \text{ g kg}^{-1} = 4\,000.0 \text{ mg kg}^{-1} = 4\,000.0 \text{ ppm}$ (Tabla 32).

Tabla 32. Contenido de nutrientes en los estiércoles.

Especie	N	P	K	Ca	Mg	S
	(g kg ⁻¹)					
Vacuno	4.00	0.87	0.83	0.71	0.47	0.50
Caballo	5.00	1.31	2.49	1.07	0.79	0.50
Cerdo	6.00	1.75	2.49	-	-	-
Oveja	6.00	1.75	2.49	3.57	1.58	1.50
Cabra	2.70	0.74	2.41	1.43	-	-
Conejo	2.00	0.57	1.00	-	-	-
Gallina	14.00	6.11	17.43	5.72	1.97	2.00
Humus lombriz	20.00	4.36	8.30	-	-	-

Fuente: Fuente: FAO, 2000.

6.6. Nutrientes en los bioles

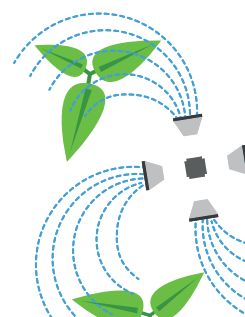
El biol es un fertilizante obtenido a partir de la descomposición del estiércol y del material vegetal fresco dentro de un biodigestor (tanque hermético) bajo condiciones anaeróbicas (sin oxígeno). La descomposición total del material orgánico puede tardar entre 30 y 45 días, en función de la variación de la temperatura del aire y humedad del ambiente (Iñiguez, 1999).

Los bioles, cualquiera que sea su origen, nunca deben aplicarse en forma directa al cultivo, debido a que la concentración de los nutrientes es muy alta, por cuanto, deben diluirse antes de ser aplicados (Tabla 33).

Tabla 33. Contenido de nutrientes en el biol del estiércol de cuy.

Nutriente	Contenido	Interpretación
pH	7.49	Neutro
CE (dS m ⁻¹)	11.00	Muy alto
MO (%)	2.26	Bajo
N (ppm)	560.00	Muy alto
P (ppm)	64.00	Muy alto
K (ppm)	2 275.00	Muy alto
Ca (ppm)	101.00	Muy bajo
Mg (ppm)	132.50	Bajo
Na (ppm)	691.25	Muy alto
Fe (ppm)	18.83	Alto
Cu (ppm)	0.19	Bajo
Zn (ppm)	0.49	Bajo
Mn (ppm)	0.38	Bajo
B (ppm)	1.27	Muy alto

Fuente: Fuente: FAO, 2000.



Ejemplo 6.1: Cálculo de la cantidad de calcio disponible en el suelo, cuya concentración es 30 ppm hasta una profundidad de 0.20 m, siendo la densidad aparente del suelo de 1 000.0 kg m⁻³.

$$PS = Da \times A \times Pr \quad (19)$$

En la Ecuación 19, PS es el peso del suelo (kg ha⁻¹); Da es la densidad aparente (kg m⁻³); A, es el área de la superficie (1 ha = 10 000.0 m²); y Pr es la profundidad efectiva del suelo (m).

$$\text{Peso} = \frac{\text{ppm} \times PS}{1 \text{ E}^6} \quad (20)$$

En la Ecuación 20, Peso es el peso del nutriente (kg ha⁻¹).

$$PS = 1\,000 \times 10\,000 \times 0.20 = 2\,000\,000 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Peso} = \frac{30}{1\,000\,000} \times 2\,000\,000 = 60.00 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Peso} = \frac{\text{ppm} \times Da \times Pr}{100} = \frac{30 \times 1000 \times 0.20}{100} = 60.0 \text{ kg ha}^{-1}$$

Entonces, una cantidad de 30 ppm de calcio en el suelo hasta una profundidad de 0.20 metros equivale a 60.00 kg ha⁻¹ y 30 ppm de calcio equivalen a 0.1497 meq 100g⁻¹ de suelo.

Ejemplo 4.2: Cálculo de la cantidad de calcio disponible en el suelo, con la concentración de 0.50 meq 100 g⁻¹ de suelo, profundidad de 0.20 m, densidad aparente de 1 000.0 kg m⁻³.

$$\text{Peso} = \frac{\text{meq } 100 \text{ g}^{-1} \times \text{eq} \times Da \times Pr}{10} = \frac{0.50 \times 20.04 \times 1\,000 \times 0.20}{10} = 200.40 \text{ kg ha}^{-1}$$

Una concentración de 0.50 meq 100 g⁻¹ de calcio hasta una profundidad de 0.20 metros equivale a una cantidad de calcio de 200.40 kg ha⁻¹.

Ejemplo 4.3: Cálculo de la cantidad de potasio existente en una hectárea de cultivo, si la concentración del potasio es de 0.30 meq 100 g⁻¹, considerando una profundidad del suelo de 0.20 m y una densidad aparente de 1 000.00 kg m⁻³.

$$\text{Peso} = \frac{\text{meq } 100 \text{ g}^{-1} \times \text{eq} \times Da \times Pr}{10} = \frac{0.30 \times 39.10 \times 1\,000 \times 0.20}{10} = 234.60 \text{ kg ha}^{-1}$$

Se tiene que 0.30 meq 100 g⁻¹ equivalen a 234.60 kg ha⁻¹ de potasio.

Ejemplo 4.4: Cálculo de la cantidad de materia orgánica presente en el suelo hasta una profundidad de 0.20 metros, cuya concentración es del 5% y la densidad aparente del suelo de 1 000.00 kg m⁻³.

$$MO = \frac{MO \%}{100} \times PS \quad (21)$$



En la Ecuación 21, según Iñiguez (1999), M_0 es la cantidad de materia orgánica presente en el suelo (kg ha^{-1}); $M_0\%$ es el contenido de materia orgánica (%).

$$M_0 = \frac{5}{100} \times 2 \times 10^6 = 100\,000.00 \text{ kg ha}^{-1}$$

Un contenido de materia orgánica del 5%, hasta una profundidad de 0.20 metros equivale a $100\,000.00 \text{ kg ha}^{-1}$ o 100 t ha^{-1} .

Ejemplo 4.5: Cálculo de la cantidad de nitrógeno total presente en el suelo, considerando la cantidad de materia orgánica determinada en el ejemplo anterior.

$$NT = 0.05 \times M_0 \quad (22)$$

En la Ecuación 22, Iñiguez (1999), NT es el contenido de nitrógeno total (kg ha^{-1}).

$$NT = 0.05 \times 100\,000 = 5\,000.00 \text{ kg ha}^{-1}$$

El 5% de materia orgánica en el suelo contiene $5\,000.00 \text{ kg ha}^{-1}$ de nitrógeno total.

Ejemplo 4.6: Cálculo de la cantidad de nitrógeno mineralizado o disponible para las plantas, considerando la cantidad de nitrógeno total del ejercicio anterior.

$$ND = 0.01 \times NT \quad (23)$$

En la Ecuación 23, según Iñiguez (1999), ND es el contenido de nitrógeno disponible expresado en kg ha^{-1} .
(23)

$$ND = 0.01 \times 5\,000 = 50.00 \text{ kg ha}^{-1}$$

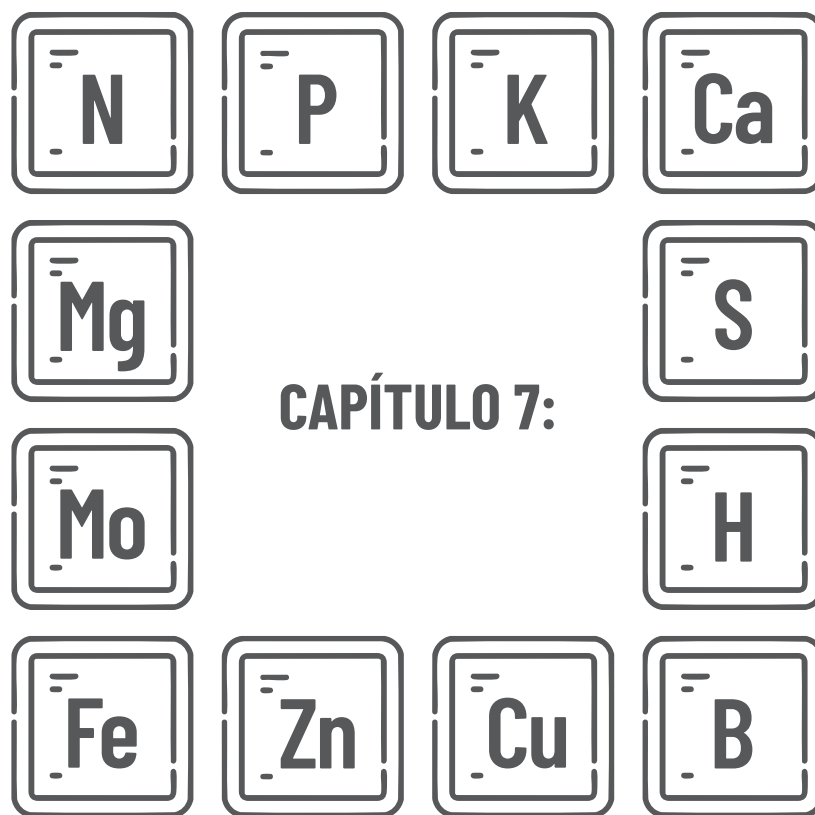
Un 5% de materia orgánica contiene aproximadamente 50.00 kg ha^{-1} de nitrógeno disponible para las plantas.

$$ND = 0.05 \times M_0 \times Da \times Pr \quad (24)$$

La Ecuación 24, está simplificada para calcular el nitrógeno disponible en función del contenido de materia orgánica presente en el suelo, considerando que el nitrógeno total es el 5% del contenido de materia orgánica y que el nitrógeno disponible es el 1.00% del nitrógeno total.

$$ND = 0.05 \times 5 \times 1\,000 \times 0.20 = 50 \text{ kg ha}^{-1}$$





FERTILIZANTES

7.1. Información técnica

En fertirrigación se utilizan fertilizantes simples y compuestos, en las formas líquida o sólida. Los fertilizantes simples están constituidos por un solo nutriente (urea, ácido fosfórico y otros) y los fertilizantes compuestos están constituidos por dos o más nutrientes (nitrato de calcio y formulaciones completas como el 10-30-10. Los fertilizantes sólidos son los más utilizados por su bajo costo con relación a los fertilizantes líquidos (Tabla 34).

Tabla 34. Fertilizantes, pureza y solubilidad.

Fertilizante	Fórmula	Solubilidad (g L ⁻¹)	Pureza (%)
Nitrato de Calcio	Ca (NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	1 200.00	90.00
Nitrato de Amonio	NH ₄ NO ₃	1 900.00	98.00
Nitrato de Potasio	KNO ₃	300.00	95.00
Fosfato mono amónico	(NH ₄)H ₂ PO ₄	220.00	95.00
Fosfato mono potásico	KH ₂ PO ₄	230.00	98.00
Sulfato de Amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	730.00	94.00
Sulfato de Potasio	K ₂ SO ₄	110.00	90.00
Sulfato de Magnesio	MgSO ₄ ·6H ₂ O	710.00	98.00
Sulfato de Hierro	FeSO ₄ ·7H ₂ O	260.00	98.00
Tetra borato de Sodio	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	50.00	98.00
Sulfato de Cobre	CuSO ₄ ·5H ₂ O	-	98.00
Sulfato de Manganeso	MnSO ₄ ·4H ₂ O	500.00	90.00
Sulfato de Zinc	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	750.00	90.00
Molibdato de Amonio	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	-	90.00
Ácido Orto fosfórico	H ₃ PO ₄	-	85.00
Ácido Nítrico	HNO ₃	-	70.00
Ácido Sulfúrico	H ₂ SO ₄	-	98.00

Fuente: Iñiguez, 1993.

El fertilizante más soluble es el nitrato de amonio con 1 900.00 g L⁻¹ y el menos soluble el tetraborato de sodio (Bórax) con 50.00 g L⁻¹ (Tabla 34).

El nitrato de calcio aporta 11.86% de nitrógeno (anión) y 16.97% de calcio (catión), para una pureza del fertilizante del 100%. El porcentaje de los nutrientes aportados como anión o catión (NA) se determinaron en función del peso atómico y molecular de cada nutriente dividido para el peso total de la fórmula química del fertilizante. En el mercado, los micronutrientes se encuentran como quelatos (Tabla 35).



Tabla 35. Proporción relativa de los nutrientes aportados por cada fertilizante.

Fertilizante	Nutrientes aportados		PM (g)	Nutrientes aportados NA (%)	
	Anión	Catión		Anión	Catión
Nitrato de Calcio, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$2(\text{NO}_3^-)$	Ca^{2+}	236.20	236.20	16.97 (Ca)
Nitrato de Amonio, NH_4NO_3	NO_3^-	NH_4^+	80.05	80.05	17.50 (N)
Nitrato de Potasio, KNO_3	NO_3^-	K^+	101.10	101.10	38.67 (K)
Fosfato mono amónico, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	H_2PO_4^-	NH_4^+	115.00	115.00	26.92 (N)
Nitrato Magnesio, $(\text{NO}_3)_2\text{Mg} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$2(\text{NO}_3^-)$	Mg^{2+}	256.40	256.40	10.93 (Mg)
Fosfato mono potásico, KH_2PO_4	H_2PO_4^-	K^+	136.10	136.10	28.74 (K)
Sulfato de Amonio, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	SO_4^{2-}	$2(\text{NH}_4^+)$	132.10	132.10	21.20 (N)
Sulfato de Potasio, K_2SO_4	SO_4^{2-}	2K^+	174.30	174.30	44.88 (K)
Sulfato de Magnesio, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	SO_4^{2-}	Mg^{2+}	246.50	246.50	9.86 (Mg)
Sulfato de Hierro, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	SO_4^{2-}	Fe^{2+}	278.00	278.00	20.09 (Fe)
Tetra borato de Sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-	4B^{3+}	381.40	381.40	11.34 (B)
Sulfato de Cobre, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	SO_4^{2-}	Cu^{2+}	249.70	249.70	25.45 (Cu)
Sulfato de Manganeso, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	SO_4^{2-}	Mn^{2+}	169.00	169.00	32.51 (Mn)
Sulfato de Zinc, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	SO_4^{2-}	Zn^{2+}	287.50	287.50	22.73 (Zn)
Molibdato de Amonio, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	$6(\text{NH}_4^+)$	7Mo^{6+}	1 164.00	1 164.00	57.70 (Mo)
Ácido Orto fosfórico, H_3PO_4	H_2PO_4^-	H^+	97.99	97.99	-
Ácido Nítrico, HNO_3	NO_3^-	H^+	63.02	63.02	-
Ácido Sulfúrico, H_2SO_4	SO_4^{2-}	2H^+	98.08	98.08	-

El peso específico del ácido fosfórico es de 1.7 g mL^{-1} y del ácido nítrico de 1.42 g mL^{-1}

Fuente: Autoría propia.

Los fertilizantes para fertirriego deben ser completamente solubles, de disolución rápida en agua, de grano fino y alta pureza. Antes de ser mezclados, es necesario realizar pruebas de compatibilidad (capacidad de dos o más fertilizantes para ser mezclados sin que se produzcan reacciones adversas) para evitar la formación de precipitados que afecten al sistema de filtrado y produzcan el taponamiento de los goteros (Israelí, 2002).

La concentración del nutriente en porcentaje (%) también se considera como kg de nutriente por cada 100 kg de producto, por ejemplo, 100 kg de nitrato de calcio contienen 15.50 kg de nitrógeno y 26.50 kg de óxido de calcio (Tabla 36).

Tabla 36. Concentración en porcentaje de los fertilizantes.

Fertilizante	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Otros
	(%)			
Nitrato de Calcio, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	15.50	-	-	26.50 (CaO)
Nitrato de Amonio, NH_4NO_3	33.50	-	-	-
Sulfato de Amonio, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21.00	-	-	24.00 (S)
Nitrato de Potasio, KNO_3	13.00-4.00	-	44.00-46.00	-
Sulfato de Potasio, K_2SO_4	-	-	50.00-53.00	18.00 (S)
Fosfato Mono potásico, KH_2PO_4	-	51.00-52.00	33.00-35.00	-
Muriato de Potasio, KCl	-	-	60.00	-
Fosfato Mono amónico, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	12.00-1.00	48.00-52.00	-	-
Fosfato Di amónico, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	16.00-18.00	46.00-48.00	-	-
Sulfato Ferroso, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	36.00 (Fe)
Sulfato de Manganeso, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	32.00 (Mn)
Sulfato de Magnesio, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	16.00 (Mg)-3.00 (S)
Sulfato de Zinc, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	23.00 (Zn)
Ácido Orthofosfórico, H_3PO_4	-	52.00-54.00	-	-
Ácido Superfosfórico, $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7/\text{H}_6\text{P}_4\text{O}_{13}$	-	76.00-83.00	-	-
Fertilizante compuesto 10-30-10	10.00	30.00	10.00	-
Fertilizante compuesto 15-15-15	15.00	15.00	15.00	-
Urea, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$	46.00	-	-	-

Fuente: Iñiguez, 1993.

La solubilidad de los fertilizantes se incrementa en función de la temperatura del agua; en algunos casos, el agua debe calentarse hasta 35 o 40 °C, se disuelve el fertilizante y luego se diluye en el tanque de preparación de la disolución (Tabla 37).

Tabla 37. Solubilidad (g L⁻¹) de los fertilizantes en función de la temperatura.

Fertilizante	Temperatura (°C)					
	0	5	10	20	25	30
Urea	680.00	780.00	850.00	1060.00	1200.00	1330.00
Sulfato de amonio	700.00	715.00	730.00	750.00	770.00	780.00
Sulfato de potasio	70.00	80.00	90.00	110.00	120.00	130.00
Cloruro de potasio	280.00	290.00	310.00	340.00	350.00	370.00
Nitrato de potasio	130.00	180.00	210.00	320.00	370.00	460.00

Fuente: Resh, 1997.

La disolución de algunos fertilizantes en agua cambia el pH y la CE de la solución; por ejemplo, la urea produce un pH ácido y una baja conductividad eléctrica; el ácido nítrico, reduce el pH hasta 1.80 y genera una CE de 2.10 dS m⁻¹ (Tabla 38).

Tabla 38. Fertilizantes (concentración 1% a 25 °C), pH y CE.

Fertilizante	pH	CE (dS m ⁻¹)
Urea	5.80	0.01
Nitrato de amonio	5.20	11.58
Nitrato de calcio	7.10	1.21
Nitrato de magnesio	5.40	0.88
Nitrato de potasio	7.00	1.39
Nitrato de magnesio	7.00	0.90
Fosfato mono amónico	4.90	0.89
Fosfato di amónico	5.50	1.20
Nitrato de potasio	7.00	1.36
Cloruro de potasio	7.00	2.30
Ácido nítrico	1.80	2.10
Ácido fosfórico	2.60	1.67
Sulfato de amonio	5.50	2.06
Sulfato de potasio	7.10	1.76
Sulfato de magnesio	7.00	0.82

Fuente: Proaño, 2010.

La disolución de ciertos fertilizantes en agua también produce el incremento de la conductividad eléctrica (dS m⁻¹) en función de la concentración de los fertilizantes; todos los fertilizantes producen diferentes salinidades (Tabla 39).

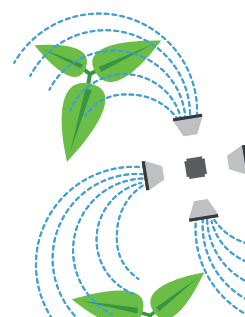


Tabla 39. Concentración del nutriente en relación a la CE.

Fertilizante	Concentración (mg L ⁻¹)		
	500	1000	2000
Nitrato de amonio	0.78	0.94	2.78
Nitrato de potasio	0.64	1.27	2.44
Nitrato de calcio	0.78	1.11	2.78
Nitrato de magnesio	0.46	0.86	1.61
Sulfato de potasio	0.76	1.41	2.58
Sulfato de amonio	1.04	2.14	3.45
Fosfato mono amónico	0.42	0.80	1.57
Sulfato de magnesio	0.76	1.41	2.58
Ácido fosfórico	0.96	1.67	2.59

Fuente: Proaño, 2010.

La dilución de ciertos fertilizantes en agua también produce variación en el pH en función de la concentración (mg L⁻¹), de los fertilizantes en la disolución; esta información permite identificar el tipo de fertilizante a utilizarse en función del tipo de suelo (alcalino o ácido), se presenta en la Tabla 40.

Tabla 40. Concentración del nutriente en relación al pH.

Fertilizante	Concentración (mg L ⁻¹)		
	500	1000	2000
Nitrato de amonio	5.59	5.56	5.38
Nitrato de potasio	6.56	7.02	7.53
Nitrato de calcio	5.91	5.87	5.80
Nitrato de magnesio	5.52	5.53	5.37
Sulfato de potasio	6.60	7.10	7.47
Sulfato de amonio	5.50	5.50	5.50
Fosfato mono amónico	5.00	4.90	4.70
Sulfato de magnesio	6.60	7.10	7.47
Ácido fosfórico	2.81	2.62	2.09

Fuente: Proaño, 2010.

7.2. Composición química

El porcentaje de nutriente aportado (NA) como anión o catión se obtiene a partir de la Ecuación 25.

$$NA = \frac{PN}{PM} \times 100 \quad (25)$$

Donde NA es el porcentaje de nutriente aportado (%), PN es el peso del nutriente en una fórmula del fertilizante (g) y PM es el peso molecular de la sal o fertilizante (mg).

Ejemplo 7.1: Cálculo del porcentaje de nutriente aportado como calcio y nitrógeno por el fertilizante nitrato de calcio. El primer paso consiste en calcular el peso molecular (PM) del nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) en base a los pesos moleculares de cada uno de los elementos químicos que lo componen.

El peso molecular del nitrato de calcio es de 236.164 g; el porcentaje de calcio aportado por el nitrato de calcio es de 16.97% y el porcentaje de nitrógeno de 11.86%, en otros términos, en 100 gramos de nitrato de calcio existen 16.97 gramos de calcio y 11.86 gramos de nitrógeno, considerando una pureza del 100% (Tabla 41).

Tabla 41. Cálculo del porcentaje de nutrientes aportados por el nitrato de calcio.

Elemento	Símbolo	Cantidad	Peso atómico (g)	Peso total (g)
Calcio	Ca	1.00	40.08	40.08
Nitrógeno	N	2.00	14.01	28.02
Oxígeno	O	10.00	16.00	160.00
Hidrógeno	H	8.00	1.008	8.064
Peso molecular (g)				236.164

Fuente: Autoría propia.

Porcentaje de nutriente aportado como calcio:

$$NA = \frac{40.08}{236.164} \times 100 = 16.97\%$$

Porcentaje de nutriente aportado como nitrógeno:

$$NA = \frac{28.02}{236.164} \times 100 = 11.86\%$$

Los factores de conversión se determinaron dividiendo el porcentaje del nutriente aportado como anión para el porcentaje del nutriente aportado como catión; para el nitrato de calcio, el factor de concentración es de 0.699 ($11.86/16.97=0.699$), esto significa que por cada ppm de calcio aportado por el nitrato de calcio existen 0.699 ppm de nitrógeno aportado por ese fertilizante (Tabla 42).

$$p = \frac{\text{ppm}}{NA} \times 100 \quad (26)$$

En la ecuación 26, p es el peso del fertilizante por litro de agua (mg).



Tabla 42. Factor de conversión de nutrientes aportados.

Fertilizante	Fórmula	Factor conversión (ppm)
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.699 ppm N 1.00 ppm Ca
Nitrato de amonio	NH_4NO_3	1.00 ppm N 1.00 ppm N
Nitrato de potasio	KNO_3	0.358 ppm N 1.00 ppm K
Nitrato de magnesio	$(\text{NO}_3)_2\text{Mg} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.153 ppm N 1.00 ppm Mg
Fosfato mono amónico	$(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$	2.209 ppm P 1.00 ppm N
Fosfato mono potásico	KH_2PO_4	0.792 ppm P 1.00 ppm K
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	1.144 ppm S 1.00 ppm N
Sulfato de potasio	K_2SO_4	0.410 ppm S 1.00 ppm K
Sulfato de magnesio	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.319 ppm S 1.00 ppm Mg
Sulfato de hierro	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.574 ppm S 1.00 ppm Fe
Sulfato de cobre	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.505 ppm S 1.00 ppm Cu
Sulfato de manganeso	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.584 ppm S 1.00 ppm Mn
Sulfato de zinc	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.490 ppm S 1.00 ppm Zn
Molibdato de amonio	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	0.125 ppm N 1.00 ppm Mo
Ácido fosfórico	H_3PO_4	0.316 ppm N 1.00 ppm H
Ácido nítrico	HNO_3	0.222 ppm P 1.00 ppm H
Ácido Sulfúrico	H_2SO_4	0.3262 ppm S 1.00 ppm H
10-30-10		1 ppm N – 1.309 ppm P – 0.83 ppm K
Urea	NH_2CONH_2	0.46 ppm N

Fuente: Autoría propia.

Ejemplo 7.2: Cálculo de la cantidad de nitrato de calcio necesario para suministrar 200 ppm de calcio en un litro de agua, considerando que el porcentaje de nutriente aportado (Ca) es del 16.97%.

$$p = \frac{\text{ppm}}{\text{NA}} \times 100 = \frac{200}{16.97} \times 100 = 1\,178.55 \text{ mg}$$

Se requiere disolver 1 178.55 mg de nitrato de calcio en un litro de agua para obtener una concentración de 200 ppm de calcio.

$$\text{ppm} = \frac{p \times \text{NA}}{100} = \frac{1\,178.55 \times 11.86}{100} = 139.77 \text{ ppm}$$

El peso de 1 178.55 mg de nitrato de calcio para disolver en un litro de agua, aportará 139.77 ppm de nitrógeno; este mismo resultado se obtiene a partir de la Tabla 42, al multiplicar la cantidad de ppm de calcio por el factor de concentración del anión (nitrógeno) aportado por el nitrato de calcio, $200 \times 0.699 = 139.80$ ppm de nitrógeno.

Ejemplo 7.3: Cálculo de la cantidad de fertilizante compuesto 10-30-10 que se requiere para suministrar una concentración de 200 ppm de nitrógeno y determinar la concentración de fósforo y de potasio presentes en dicha relación.

$$p = \frac{\text{ppm}}{\text{NA}} \times 100 = \frac{200}{10} \times 100 = 2\,000.00 \text{ mg}$$

Se requiere disolver 2 000 mg de fertilizante 10-30-10 por cada litro de agua para alcanzar una concentración de 200 ppm de nitrógeno.

$$\text{Fósforo} = \text{ppm (N)} \times \text{factor (P)} = 200 \times 1.309 = 261.80 \text{ ppm}$$

$$\text{Potasio} = \text{ppm (N)} \times \text{factor (K)} = 200 \times 0.83 = 166.00 \text{ ppm}$$

Utilizando los factores presentados en la Tabla 42, por cada 200 ppm de nitrógeno presentes en el fertilizante 10-30-10, existen 261.8 ppm de fósforo y 166 ppm de potasio. Este mismo resultado se obtiene utilizando la Ecuación 7.2.

$$\text{ppm} = \frac{p \times \text{NA}}{100} = \frac{2\,000 \times 13.09}{100} = 261.80 \text{ ppm}$$

$$\text{ppm} = \frac{p \times \text{NA}}{100} = \frac{2\,000 \times 8.30}{100} = 166.00 \text{ ppm}$$

Ejemplo 7.4: Cálculo de la cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio, que se aporta al suelo, se suministra 20 kg ha⁻¹ del fertilizante 10-30-10 y 15 kg ha⁻¹ del fertilizante 15-15-15.

$$N = \frac{\text{Peso} \times \text{IA}\%}{100} = \frac{20 \times 10}{100} + \frac{15 \times 15}{100} = 4.25 \text{ kg}$$

$$F = \frac{\text{Peso} \times \text{IA}\%}{100} = \frac{20 \times 30}{100} + \frac{15 \times 15}{100} = 8.25 \text{ kg}$$

$$P = \frac{\text{Peso} \times \text{IA}\%}{100} = \frac{20 \times 10}{100} + \frac{15 \times 15}{100} = 4.25 \text{ kg}$$

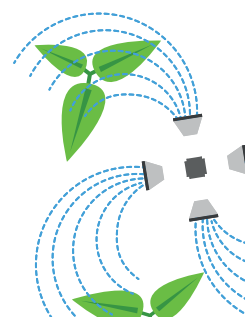
En las ecuaciones anteriores, nitrógeno, fósforo o potasio corresponde al peso del nutriente aportado por el fertilizante compuesto (kg); Peso es el peso del fertilizante que se suministra (kg); IA% es el ingrediente activo del fertilizante (%); 100 es el factor de transformación. Los 20 kg ha⁻¹ del fertilizante 10-30-10 y los 15 kg del fertilizante 15-15-15 proporcionan 4.25 kg de N, 8.25 kg de P₂O₅ y 4.25 kg de K₂O.

Ejemplo 7.5: Cálculo de la concentración de los fertilizantes a disolverse en un volumen de agua de 100 litros: 5 kg de fosfato mono potásico y 20 kg de nitrato de amonio.

$$\text{CTN} = \frac{\text{Peso} \times \text{IA}\% \times 10\,000}{V} = \frac{20 \times 33 \times 10\,000}{100} = 66\,000.00 \text{ ppm}$$

$$\text{CTN} = \frac{\text{Peso} \times \text{IA}\% \times 10\,000}{V} = \frac{5 \times 52 \times 10\,000}{100} = 26\,000.00 \text{ ppm}$$

$$\text{CTN} = \frac{\text{Peso} \times \text{IA}\% \times 10\,000}{V} = \frac{5 \times 34 \times 10\,000}{100} = 17\,000.00 \text{ ppm}$$



En las ecuaciones anteriores, CTN (nitrógeno), CTP (fósforo) o CTK (potasio) son las concentraciones de dichos nutrientes en el tanque de mezclado (ppm); 10 000.00 es la constante de transformación; V es el volumen del agua en el cual se disuelven los fertilizantes. Este ejercicio permite visualizar que la concentración de los fertilizantes en el tanque de disolución o solución madre es muy alta: 66 000.00 ppm de nitrógeno, 26 000.00 ppm de fósforo y 17 000.00 ppm de potasio. La conductividad eléctrica en el tanque sería de aproximadamente 218.00 dS m⁻¹.

Ejemplo 7.6: Cálculo de la concentración de los fertilizantes disueltos a la salida del gotero, si la relación de dilución es de 3 litros de disolución por cada metro cúbico de agua, considerando los resultados del ejemplo anterior.

$$CGN = \frac{CTN \times VD}{VA} = \frac{66\,000 \times 3}{1000} = 198.00 \text{ ppm}$$

$$CGP = \frac{CTP \times VD}{VA} = \frac{26\,000 \times 3}{1000} = 78.00 \text{ ppm}$$

$$CGP = \frac{CTP \times VD}{VA} = \frac{17\,000 \times 3}{1000} = 51.00 \text{ ppm}$$

En las ecuaciones anteriores, CGN (nitrógeno), CGP (fósforo) o CGP (potasio) son las concentraciones de dichos nutrientes en la salida del gotero (ppm); Vd es el volumen de la disolución a inyectarse en el agua de riego (litros); VA es el volumen del agua de riego, en el cual se va a diluir la solución (litros); en el ejemplo, la concentración del nitrógeno a la salida del gotero será de 198.00 ppm, fósforo de 78.00 ppm y potasio de 51.00 ppm.

Los ejemplos 7.5 y 7.6 permiten visualizar la diferencia de concentración de los nutrientes disueltos en el tanque de disolución de los fertilizantes (CT) y en la salida del gotero (CG); por ejemplo, la concentración del nitrógeno en el tanque es de 66 000 ppm y a la salida del gotero de 198 ppm, produciéndose una relación de dilución de 333.3 y una conductividad eléctrica a la salida del gotero de 0.65 dS m⁻¹.

7.1.1. Análisis de los fertilizantes principales

Gavi (2010) menciona las características más importantes de los fertilizantes utilizados en fertirrigación:

UREA

Nutrientes:	Nitrógeno.
Porcentaje:	46%.
Tipos de Urea:	Urea granulada para ser aplicada al suelo; urea cristalina para ser aplicada en forma foliar y por medio de la fertirrigación.
Tipo de aplicación:	Suelo y foliar.
pH solución 10%:	Alcalino.
Transformación:	Después de hidratarse pasa a la forma de amoníaco y posteriormente a la forma nítrica por la acción de las bacterias, dejando en libertad iones hidrógeno H ⁺ .
Efecto pH suelo:	Acidificante.
Efecto CE agua:	No saliniza el agua.
Temperatura:	Baja la temperatura del agua.
Tipo de suelos:	Aplicarse en todos los tipos de suelos (ácidos, neutros o alcalinos).



NITRATO DE AMONIO

Nutrientes:	Nitrógeno.
Porcentaje:	35%; (17.50% como nitrato y 17.50% como amonio).
Tipo de aplicación:	Suelo.
pH solución 10%:	Ácido.
Transformación:	Se encuentra disponible inmediatamente después de ser aplicado; el amonio es de acción prolongada y posteriormente pasa la forma nítrica por la acción de las bacterias, dejando en libertad iones hidrógeno H^+ .
Efecto pH suelo:	Ligeramente ácido.
Reacción:	Para 1 000 ppm (mg L ⁻¹) la conductividad que genera es de 1 dS m ⁻¹ .
Tipo de suelos:	Aplicarse en suelos con pH neutros o alcalinos.

NITRATO DE CALCIO

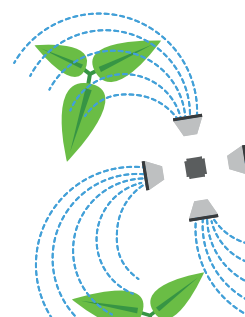
Nutrientes:	Nitrógeno y calcio.
Porcentaje:	15.50% de nitrógeno como nitrato y 28% como óxido de calcio.
Tipo de aplicación:	Suelo.
pH solución 10%:	Ácido.
Transformación:	Se encuentran disponibles inmediatamente después de ser aplicados.
Efecto pH suelo:	Ligeramente ácido.
Tipo de suelos:	Aplicarse en suelos con pH ácidos y neutros.

NITRATO DE POTASIO

Nutrientes:	Nitrógeno y potasio.
Porcentaje:	13% como nitrógeno (62% de nitratos) y 46% de óxido de potasio (38% de potasio).
Tipo de aplicación:	Suelo.
pH solución 10%:	Los dos nutrientes se encuentran disponibles para las plantas inmediatamente después de ser aplicados al suelo.
Transformación:	Reacción neutra.
Efecto pH suelo:	Reacción neutra.
Tipo de suelos:	Aplicarse en suelos con pH ácidos.

SULFATO DE AMONIO

Nutrientes:	Nitrógeno y azufre.
Porcentaje:	21% de nitrógeno (amonio) y 24% de azufre
Tipo de aplicación:	Suelo.
Transformación:	El amonio por la acción de las bacterias se transforma en nítrico, dejando en libertad iones hidrógeno H^+ .
Efecto pH suelo:	Acidificante (pH 5.00).
Tipo de suelos:	Aplicarse en suelos alcalinos.



SULFATO DE POTASIO

Nutrientes:	Potasio y azufre.
Porcentaje:	44.88% de potasio y 18.40% de azufre.
Tipo de aplicación:	Suelo.
Efecto pH suelo:	Acidificante.
Tipo de suelos:	Aplicarse en suelos alcalinos.

ÁCIDO NÍTRICO

Nutrientes:	Ninguno, se utiliza como corrector de pH
Tipo de aplicación:	Suelo y agua alcalina.
Transformación:	Deja en libertad iones hidrógeno H^+ .
Efecto pH suelo:	Acidificante.
Dosis:	Varía entre 75 y 300 mL m^{-3} ; se debe realizar una prueba de titulación en un laboratorio para determinar la cantidad adecuada.

ÁCIDO FOSFÓRICO

Nutrientes:	Fósforo.
Tipo de aplicación:	Suelo y agua alcalina.
Transformación:	deja en libertad iones hidrógeno H^+ .
Efecto pH suelo:	Acidificante
Dosis:	Varía entre 75 y 300 mL m^{-3} ; se debe realizar una prueba de laboratorio para determinar la cantidad exacta.

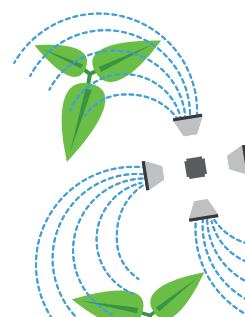
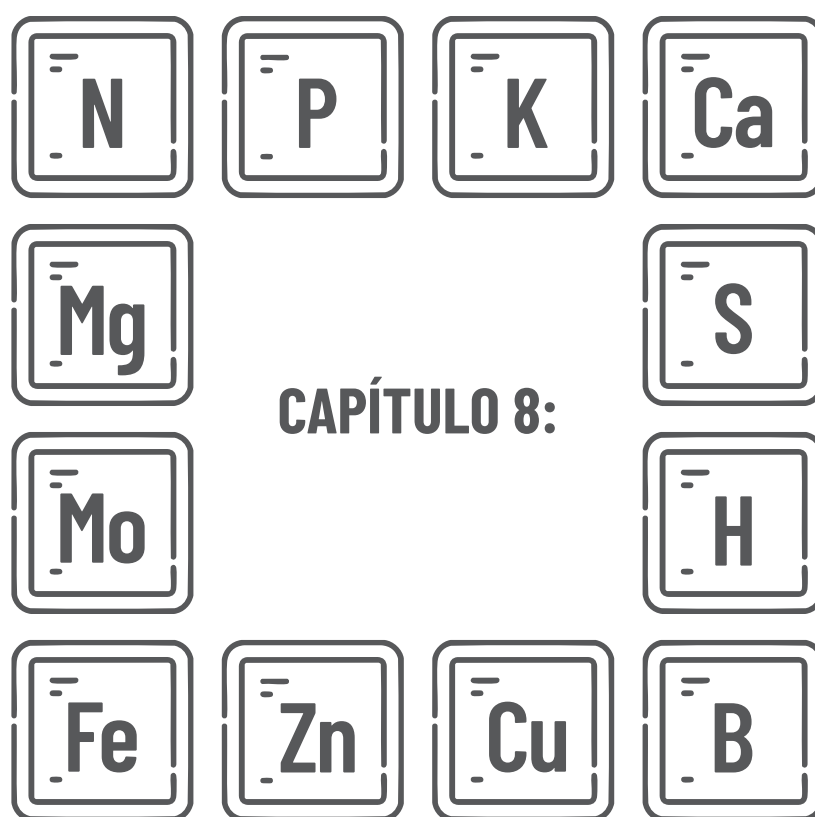
FOSFATO MONOAMÓNICO

Nutrientes:	Fósforo y nitrógeno.
Porcentaje:	12% de nitrógeno (amonio) y 61% de fósforo.
Tipo de aplicación:	Suelo.
Transformación:	Transformación: el amonio por la acción de las bacterias se transforma en nítrico,
Efecto pH suelo:	dejando en libertad iones hidrógeno H^+
Tipo de suelo:	Acidificante.

FOSFATO DIAMÓNICO

Nutrientes:	Fósforo y nitrógeno.
Porcentaje:	21.21% de nitrógeno (amonio) y 24.26% de fósforo.
Tipo de aplicación:	Suelo.
Transformación:	El amonio por la acción de las bacterias se transforma en nítrito, dejando en libertad iones hidrógeno H^+ .
Efecto pH suelo:	Neutro.
Tipo de suelo:	Aplicarse en suelos alcalinos.





CÁLCULO DE LA FERTILIZACIÓN

El cálculo del peso de los fertilizantes se basa en la formulación química de la sal, solubilidad, pureza, relación de inyección (caudal del inyector y de riego) y del volumen de agua en el cual se disolverán (Keller & Bliesner 1990).

El tipo de fertilizante a ser utilizado sirve para conocer el porcentaje de los nutrientes aportados en forma de anión o catión y para conocer la máxima cantidad de fertilizantes que se pueden disolver en un determinado volumen de agua de acuerdo a su solubilidad.

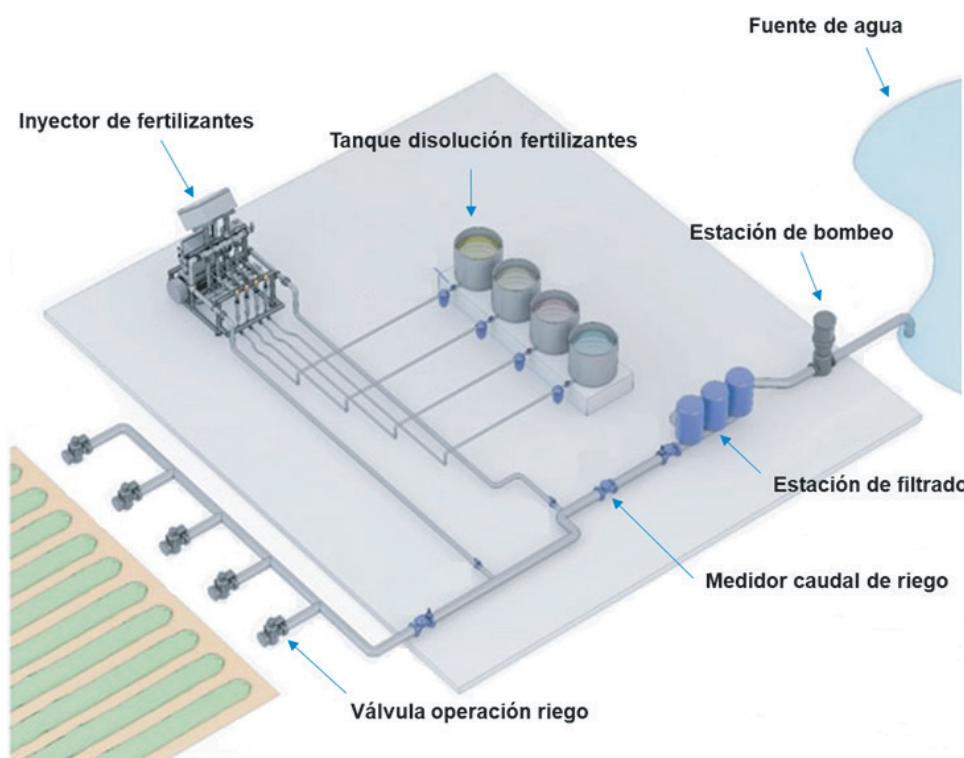
La solubilidad de los fertilizantes está en función de la temperatura del agua en la cual se disuelven, del mecanismo de agitación para su disolución y de la cantidad de fertilizantes a mezclar en un mismo volumen de agua.

El caudal del inyector se ajusta en base a la relación de dilución a utilizar durante el proceso de fertirrigación; es decir, cuantos litros de disolución se van a disolver en un determinado volumen de agua; disolución se denomina a los fertilizantes disueltos en un tanque de un volumen de agua determinado también conocido como solución madre, los cuales son inyectados en la línea de riego. El peso de los fertilizantes a disolverse en un tanque se determina para alcanzar una concentración deseada de nutrientes (ppm) a la salida del gotero. Para una mejor comprensión del funcionamiento de un cabezal de riego se presenta el diagrama de la Figura 5.

En el cálculo del peso de los fertilizantes, se deben considerar los siguientes componentes:

- **Tanque para disolución de los fertilizantes:** Se disuelven los fertilizantes para cubrir las necesidades nutricionales del cultivo y para el control del pH.
- **Inyector de los fertilizantes:** Son de tipo venturi y es el dispositivo que permite succionar los fertilizantes disueltos desde el tanque e inyectarlo en la línea principal de riego.
- **Válvula de operación del riego:** Controla el riego en una superficie de cultivo.

Figura 5. Diagrama de un cabezal típico de riego.



Fuente: Netafim, 2015.

Para facilitar el cálculo del peso de los fertilizantes a disolverse en el tanque, es necesario determinar la relación de inyección que existe entre el caudal de riego y del inyector. Al igual que en la fertilización del suelo (banda, voleo y otros), en la cual la distribución de los fertilizantes se determina por planta o metro cuadrado, en fertirrigación, los fertilizantes se calculan para ser distribuidos en forma uniforme sobre el área irrigada a través de los goteros, siendo entonces la cantidad de fertilizantes aplicados al voleo similar a la cantidad de fertilizantes que se aplican por los goteros, con la diferencia de que al suelo, los fertilizantes se suministran como máximo en dos o tres aplicaciones, mientras que en fertirrigación, éstos se suministran a lo largo del ciclo vegetativo del cultivo, en forma semanal, diaria o en base al monitoreo del contenido de nitratos en la solución del suelo.

8.1. Relación de la dilución

La relación de dilución se utiliza de acuerdo a las necesidades nutricionales del cultivo y varía entre 1/1 000 y 10/1 000 (1 litro de fertilizante por cada 1 000 litros de agua y/o 1 litro de fertilizante disuelto por cada 100 litros de agua). La relación de dilución también se debe ajustar al pulso o señal emitida por los dispositivos electrónicos utilizados en la automatización de la inyección de los fertilizantes (medidor de caudal y de fertilizantes).

En forma general, la relación de dilución para la mayoría de los cultivos varía entre 3 y 5 litros de la disolución por cada metro cúbico de agua que fluye por el sistema de riego.

Una relación de dilución 1/1 000 también se la identifica como una dosificación del 0.1%; una relación 10/1 000 como una dosificación del 1.0%; una dosificación del 0.5% equivale a una relación de 5 litros de disolución por cada metro cúbico de agua.

Para las máquinas de fertirrigación, la relación de dilución es de 10 litros de disolución por cada metro cúbico de agua.

8.2. Caudal del inyector de los fertilizantes

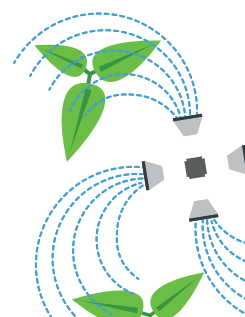
El cálculo del caudal de inyección permite seleccionar el tipo y el tamaño de un inyector, un inyector no se dimensiona en función del diámetro de la tubería; el caudal del inyector se determina en función de la relación de dilución del fertilizante disuelto en un volumen de agua de un metro cúbico de agua.

$$Q_i = \frac{V_f}{V_a} \times Q_r \times D_r \quad (27)$$

En la Ecuación 27, Q_i es el caudal del inyector de los fertilizantes disueltos (L h^{-1}); V_f es el volumen del fertilizante a diluirse (litros); V_a es el volumen de agua en el cual se disolverá el fertilizante (m^3); Q_r es el caudal de riego ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) y D_r es la densidad relativa entre la densidad de la disolución y la densidad del agua (aproximadamente 1.2).

Ejemplo 8.1: Cálculo del caudal del inyector para un caudal de riego de $60 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, siendo la relación del fertilizante disuelto de 3 litros por cada metro cúbico de agua y una densidad relativa de 1.20.

$$Q_i = \frac{3}{1} \times 60 \times 1.20 = 216.00 \text{ L h}^{-1}$$



El caudal del inyector debe ser de 216.00 L h⁻¹ para que el sistema permita inyectar 3 litros de fertilizantes disueltos por cada metro cúbico de agua fluye por la línea principal.

Ejemplo 8.2: Cálculo del caudal del inyector para una relación de dilución 1% (10 litros por cada metro cúbico de agua, 10/1 000) para un caudal de riego de 60 m³ h⁻¹.

$$Q_i = \frac{10}{1} \times 60 \times 1.20 = 720.00 \text{ L h}^{-1}$$

El caudal del inyector deberá ser de 720.00 L h⁻¹ para proporcionar una relación de dilución 10/1 000, 10 litros de disolución por cada 1 000 litros de agua de riego o 10 litros de disolución por cada metro cúbico de agua, equivalente a una disolución con una concentración del 1.00%.

En el cálculo del caudal de inyección debe considerarse dos niveles muy importantes a la hora de escoger el tipo de inyector: caudal mínimo, si se requiere medir la disolución a inyectarse, el caudal mínimo debe ser de 50 L h⁻¹ porque es el caudal mínimo de inyección de los equipos existentes y, el caudal máximo al menos para duplicar la concentración de los nutrientes, para conseguirlo, el inyector debe permitir duplicar el caudal de inyección, en el ejemplo 8.1, el caudal del inyector debe permitir inyectar de 216.00 L h⁻¹ a 432 L h⁻¹. En este proceso de selección, debe considerarse que no siempre se encuentran inyectores de fertilizantes con el caudal requerido, por lo tanto, se deben escoger inyectores con capacidades de inyección mayores.

8.3. Relación de inyección o dilución

La relación de inyección o dilución es el cociente entre el caudal de riego y el caudal del inyector de los fertilizantes disueltos.

$$RI = \frac{1\,000 \times Q_r}{Q_i} \quad (28)$$

En la Ecuación 28, RI es la relación de inyección (adimensional).

Ejemplo 8.3: Cálculo de la relación de inyección (RI) para un caudal de riego de 60 m³ h⁻¹ y para un caudal del inyector de 216 L h⁻¹.

$$RI = \frac{1\,000 \times 60}{216} = 277.77$$

La relación de inyección es de 277.77, lo cual significa que, por cada litro de disolución inyectada, por la tubería fluyen 277.77 litros de agua. Si la concentración de los nitratos en el tanque de dilución es de 66 000 ppm, la concentración de los nitratos a la salida del gotero sería de 237.60 ppm (66 000 dividido para 277.77).

El cálculo del peso de los fertilizantes se realiza para la relación de inyección determinada para el caudal máximo de riego registrado durante la operación del sistema, puesto que es posible variar y/o ajustar el caudal del inyector a través de sistemas de inyección automatizados (a través de la automatización es posible programar la relación de inyección por cada válvula de riego).



Se debe preparar la disolución para el caudal máximo de riego; la distribución y concentración de los nutrientes en el campo cultivado no es uniforme debido a que se necesitan caudales de inyección mayores a la capacidad del inyector cuando operen caudales mayores al considerado en el cálculo, por este motivo, el diseño del sistema de riego debe contemplar la división uniforme de los lotes o unidades de riego. Es posible trabajar con el caudal promedio de todas las válvulas, siempre y cuando la variación entre el mínimo y el máximo no sea mayor al 10%.

En sistemas de riego manuales y con caudales variables, el riego se organiza de tal forma que los caudales de operación sean similares (una o más válvulas de riego abiertas simultáneamente). En la organización de la apertura de las válvulas, se debe considerar las pérdidas de carga que este proceso ocasionaría para evitar una mala distribución del agua en las unidades de riego, en el ejemplo anterior, es posible abrir simultáneamente las válvulas de 40 y 20 m³ h⁻¹ y luego la de 60 m³ h⁻¹ para mantener una relación de inyección constante y una distribución uniforme de los fertilizantes en todo el campo cultivado.

8.4 Volumen de agua y tanque

El volumen de agua en el cual se disuelven los fertilizantes está relacionado con el tamaño del campo cultivado y del volumen de los tanques existentes para el efecto, existen tanques plásticos con volúmenes que varían desde 100 hasta 10 000 litros, siendo los de 500 y 1 000 litros los más utilizados en la preparación de las disoluciones (Figuras 6 y 7).

$$V_{\min} = \frac{PF}{S} \times 1000 \quad (29)$$

En la Ecuación 29, $V_{\min}$ es el volumen mínimo del tanque (litros); PF es el peso del fertilizante (kg); S es la solubilidad del fertilizante (g L⁻¹) y 1 000 es la constante de transformación.

Ejemplo 8.4: Cálculo del volumen de agua en el cual se debe disolver 100 kg de nitrato de calcio, siendo su solubilidad de 1 200 g L⁻¹.

$$V_{\min} = \frac{100}{1200} \times 1000 = 83.33 \text{ L}$$

El volumen de agua es de 83.33 litros, por otro lado, se debe considerar que siempre se disuelven más fertilizantes en un mismo tanque, además, las disoluciones se preparan para una duración mínima de una semana.

$$V_{\max} = V_a \times V_i \times A \times T$$

En la Ecuación 30, $V_{\max}$ es el volumen máximo del tanque (litros); V_a es el volumen de agua de riego a aplicarse por hectárea (m³); V_i es la relación de dilución (L m⁻³); A es el área a regar (ha); y T es el tiempo que durará la disolución en el tanque (días).

Ejemplo 8.5: Cálculo del volumen del tanque, considerando un volumen de agua de riego de 40 m³, una relación de dilución de 3.00 L m⁻³, una superficie de cultivo de 10 ha y un tiempo de duración de la disolución de 3 días.

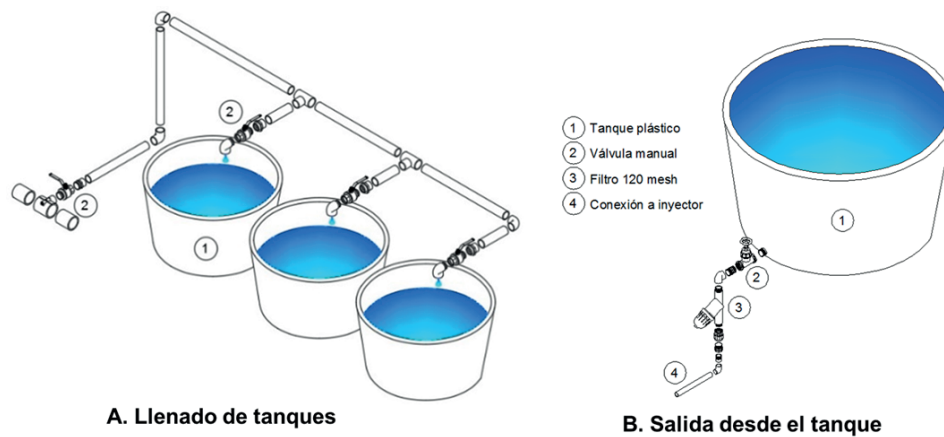
El volumen máximo que debe tener el tanque es de 3 600.00 L; si en el mercado existen tanques con volúmenes de 3 000 L y 5 000 L, para el ejemplo, se escogería el tanque de 5 000 L.

Figura 6. Tanques para disolver los fertilizantes.



Fotografía: Autoría propia.

Figura 7. Esquema de una instalación de tanques para disolver los fertilizantes.



Fotografía: Autoría propia.



8.5. Peso y volumen de los fertilizantes

La cantidad de fertilizantes a disolverse en un determinado volumen de agua se calcula a partir de la siguiente expresión matemática.

$$PF = \frac{CFG \times RI \times V}{NA \times P \times 100} \quad (31)$$

En la Ecuación 31, PF es el peso del fertilizante en kg; CFG, la concentración deseada del nutriente (anión o catión) a la salida del gotero en ppm (mg L^{-1}); RI, la relación de inyección (adimensional); V, el volumen de agua en el cual se va a disolver los fertilizantes en litros; NA, el porcentaje del nutriente aportado por el fertilizante (anión o catión, Tabla 35) en porcentaje (%) y P, la pureza del fertilizante a disolverse en porcentaje (%). Si se utiliza la concentración del nutriente (ppm) como catión, se debe utilizar el porcentaje del nutriente aportado (NA) por el fertilizante como catión y viceversa.

Ejemplo 8.6: Cálculo del peso de nitrato de calcio que se requiere para suministrar 200 ppm de calcio, a disolverse en un volumen de agua de 1 000 litros, para una relación de inyección de 100 (caudal máximo de riego de $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y caudal del inyector de 250 L h^{-1}); en la Tabla 35, el porcentaje de nutriente aportado (Ca) es del 16.97% y la pureza del fertilizante del 90%.

$$PF = \frac{200 \times 100 \times 1\,000}{16.97 \times 90 \times 100} = 130.95 \text{ kg}$$

Se requiere de 130.95 kg de nitrato de calcio para proporcionar una concentración de calcio en el agua de riego (a la salida del gotero) de 200 ppm.

Este mismo cálculo se realiza a partir de la concentración de nitrógeno (anión) de acuerdo con el factor de concentración de los nutrientes aportados por el nitrato de calcio, ppm de nitrógeno.

$$PF = \frac{139.80 \times 100 \times 1\,000}{11.86 \times 90 \times 100} = 130.95 \text{ kg}$$

Al igual que el primer cálculo, se requieren 130.97 kg de nitrato de calcio para que la concentración de nitrógeno en el agua de riego sea de 139.80 ppm; los 130.97 kg de nitrato de calcio proporcionarán 200 ppm de calcio y 139.80 ppm de nitrógeno.

Cuando la descripción técnica del fertilizante proporcione un solo valor relacionado con el porcentaje del nutriente aportado (Tabla 36), la ecuación adoptará la siguiente expresión matemática:

$$PF = \frac{CFG \times RI \times V}{1 \times 10^4 \times IA} \quad (32)$$

En la Ecuación 32, el ingrediente activo (IA) corresponde al porcentaje del nutriente aportado (%).

Para los ácidos y los fertilizantes líquidos, la ecuación adoptaría la siguiente forma.

$$VF = \frac{CFG \times RI \times V}{NA \times P \times DA \times 100} \quad (33)$$

En la Ecuación 33, VF es el volumen del fertilizante (litros) y DA es la densidad del ácido o del fertilizante líquido (g cm^{-3}).

Para el cálculo del volumen de ácido a inyectarse en el agua de riego para reducir el pH, el método más aproximado es el propuesto por Fuentes (2003), en función del pH y del contenido de bicarbonatos.

$$\text{Carbonatos} = \frac{\text{OH} \times 10^{-6.30} \times \left(\frac{10^{-\text{pHi}}}{10^{-6.30}} + 1 \right)}{10^{-6.30} + 10^{-\text{pHf}}} \quad (34)$$

En la Ecuación 34, Carbonatos es la concentración de los bicarbonatos a neutralizar (meq L^{-1}); OH, la concentración de bicarbonatos (meq L^{-1}); pHi, el pH inicial del agua de riego; pHf, el pH deseado a la salida del gotero.

La concentración de los iones H^+ en meq L^{-1} aportados por el ácido sulfúrico, nítrico y fosfórico, son los siguientes.

$$\text{H}^+ = \frac{\text{ppm}(\text{H}_2\text{SO}_4)}{49.038} + \frac{\text{ppm}(\text{HNO}_3)}{63.018} + \frac{\text{ppm}(\text{H}_3\text{PO}_4)}{32.665} \quad (35)$$

En la Ecuación 35, H es la concentración del ion hidrógeno (meq L^{-1}); ppm (H_2SO_4) es la concentración del ácido sulfúrico (mg L^{-1}); ppm (HNO_3) es la concentración del ácido nítrico (mg L^{-1}); y ppm (H_3PO_4) es la concentración del ácido fosfórico (mg L^{-1}).

$$\text{VA} = \frac{0.70 \times (\text{Carbonatos} - \text{H}) \times \text{eq} \times \text{RI} \times \text{V}}{15 \times \text{P} \times \text{DA}} \quad (36)$$

En la Ecuación 36, VA es el volumen del ácido (mL); eq es el equivalente químico del ácido (g); RI es la relación de inyección (adimensional); V es el volumen del agua en el cual se disolverá el ácido (litros); P es la pureza del ácido (%); y DA es la densidad del ácido (g cm^{-3}).

Ejemplo 8.7: Cálculo de la cantidad de nitrato de calcio necesario para suministrar 200 ppm de calcio, para una relación de inyección de 100, un volumen de agua de 1 000 litros y para un porcentaje del óxido de calcio del 26.5% (Tabla 43).

Tabla 43. Cálculo del porcentaje de calcio aportado por el óxido de calcio.

Elemento	Cantidad	Peso atómico (g)	Peso total (g)
Ca	1	40.08	40.08
O	1	16.00	16.00
Peso molecular (g)			56.08

Fuente: Autoría propia.

Procentaje de calcio aportado:

$$NA = \frac{40.08}{56.08} \times 100 = 71.47\%$$

Porcentaje de ingrediente activo del calcio:

$$NA = \frac{26.50 \times 71.47}{100} = 18.94\%$$

$$PF = \frac{200 \times 100 \times 1\,000}{1 \times 10^4 \times 18.94} = 105.60 \text{ kg}$$

El porcentaje de calcio aportado es de 71.47%, el porcentaje de ingrediente activo de 18.94% y el peso del nitrato de calcio de 105.60 kg para proporcionar una concentración de 200 ppm de calcio en el agua de riego (a la salida del gotero).

Al comparar este resultado (105.60 kg) con el resultado del ejemplo 8.6 (130.95 kg), se observa una diferencia de 25.35 kg de fertilizante, esto se debe a que los porcentajes de ingrediente activo de los nutrientes de la Tabla 36 son valores aproximados por los fabricantes de fertilizantes, por tanto, es más preciso trabajar con los pesos moleculares de los elementos químicos; en fertirrigación se utiliza el nitrato de calcio soluble $(\text{NO}_3)_2\text{Ca} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Ejemplo 8.8: Cálculo de la cantidad de urea que se requiere disolver en un tanque de volumen de agua de 1 000 litros para alcanzar una concentración de 100 ppm de nitrógeno a la salida del gotero, para una relación de inyección de 100, y para un porcentaje de nutriente aportado o ingrediente activo del 46%.

$$PF = \frac{100 \times 100 \times 1\,000}{1 \times 10^4 \times 46} = 21.74 \text{ kg}$$

Se requiere disolver 21.74 kg de urea en un volumen de 1 000 litros para alcanzar una concentración de nitrógeno de 100 ppm a la salida del emisor.

Ejemplo 8.9: Cálculo de cantidad de ácido sulfúrico necesario para neutralizar 3.55 meq L⁻¹ de bicarbonatos, reducir el pH de 7.30 a 6.00, considerando una relación de inyección de 100, un volumen de agua de 1 000 litros.

$$\text{Carbonatos} = \frac{3.55 \times 10^{-6.30} \times \left(\frac{10^{-7.30}}{10^{-6.30}} + 1 \right)}{10^{-6.30} + 10^{-6.00}} = 1.30 \text{ meq L}^{-1}$$

$$VA = \frac{0.70 \times (1.30 - 0.00) \times 49.038 \times 100 \times 1\,000}{15 \times 98 \times 1.84} = 1649.83 \text{ mL}$$

Para neutralizar 3.55 meq L⁻¹ de bicarbonatos se requiere diluir 1.65 litros de ácido sulfúrico en un volumen de agua de 1 000 litros.

Ejemplo 8.10: Cálculo de la cantidad de calcio aportado al suelo considerando un caudal del gotero de 1.20 L h⁻¹, tiempo de riego de 2.509 horas y la concentración del calcio a la salida del gotero de 50 ppm.

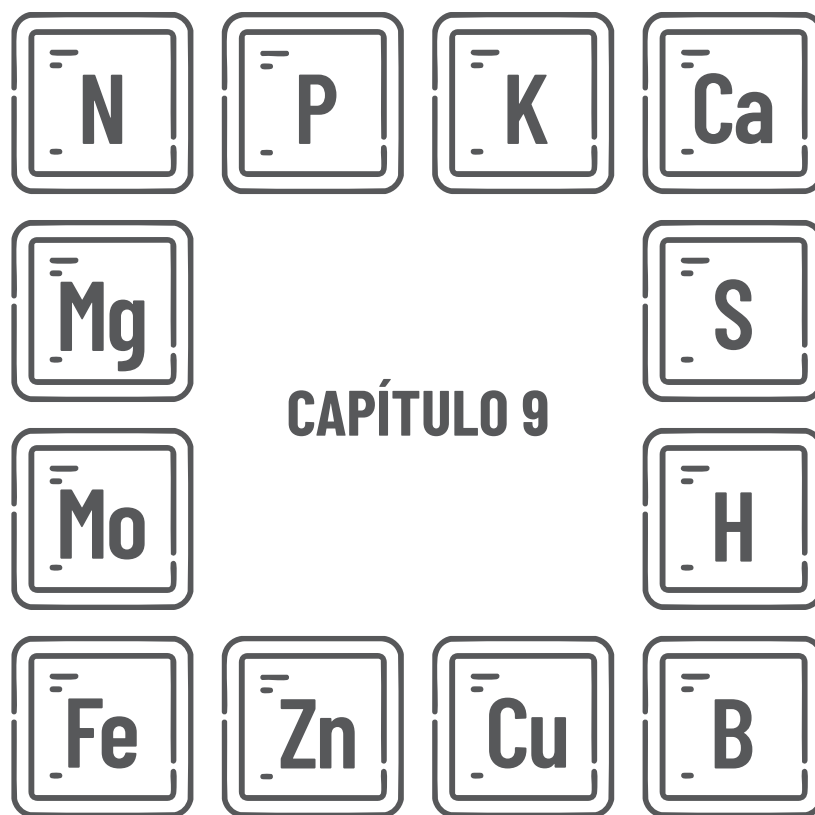
$$PFg = CFG \times Qe \times Tr \quad (37)$$

En la Ecuación 37, PFg es el peso del fertilizante que se aplicaría a través del gotero (mg); Qe, el caudal del emisor (L h⁻¹); Tr, el tiempo de riego (horas).

$$PFg = 50 \times 1.20 \times 2.50 = 30.00 \text{ mg}$$

La cantidad de fertilizantes que se aplicaría a través del gotero en un tiempo de riego de 2.50 horas es de 30.00 mg





DISOLUCIÓN DE LOS FERTILIZANTES

9.1. Tanques para las disoluciones

El número de tanques para la preparación de las disoluciones está en función del tamaño de los campos irrigados y del nivel de automatización del sistema de riego.

En cultivos altamente rentables como las rosas bajo invernadero, las disoluciones se preparan en tres tanques (A, B y C), en los tanques A y B se disuelven los fertilizantes y en el tanque C el ácido o la base para controlar el pH del agua de riego (Figura 8); cuando se necesite de una instalación mucho más completa, se pueden utilizar cinco tanques (A, B, C, D y E), para corregir el pH, nitrógeno, fósforo, potasio y los micronutrientes.

En zonas con precipitaciones inferiores a 1 000 mm, se requiere del control del pH del agua de riego debido a que éste fluctúa entre 7.50 y 8.60, y se recomienda utilizar fertilizantes acidificantes en zonas áridas y fertilizantes que produzcan alcalinidad en zonas lluviosas.

Para pequeños y medianos agricultores se debe considerar al menos dos tanques (A y B) para la disolución de los fertilizantes, en el tanque A se disuelven los fertilizantes y en el tanque B el corrector de pH o el calcio.

9.2. Compatibilidad de los fertilizantes

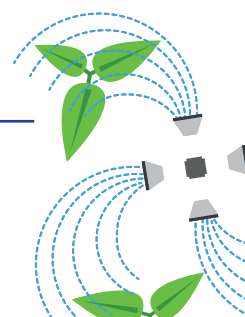
La preparación de una disolución se realiza previo el análisis y revisión de la compatibilidad de los fertilizantes a mezclarse.

En el tanque A se pueden disolver los nitratos y los micronutrientes y en el tanque B los fosfatos y sulfatos, otra posibilidad puede ser el nitrato de calcio y el hierro en el tanque A y los demás fertilizantes en el tanque B, o en su defecto, realizar un balance entre cada tanque en el cual se disuelva el nitrato de calcio y el hierro, un porcentaje del nitrato de amonio y potasio en el tanque A y el resto de fertilizantes en el tanque B; en la tabla, los fertilizantes compatibles se identifican con la letra C y los incompatibles con la letra X (Tabla 44).

Tabla 44. Compatibilidad entre fertilizantes utilizados en fertirrigación.

Fertilizantes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1. Nitrato de amonio	-														
2. Nitrato de calcio	X	-													
3. Nitrato de potasio	C	C													
4. Fosfato mono amónico	C	X	C	-											
5. Fosfato mono potásico	C	X	C	C	-										
6. Sulfato de amonio	C	X	C	C	C	-									
7. Sulfato de potasio	C	X	C	C	C	C	-								
8. Sulfato de magnesio	C	X	C	X	C	C	C	-							
9. Sulfato de hierro	C	X	C	X	C	C	C	C	-						
10. Sulfato de cobre	C	X	C	X	C	C	C	C	C	-					
11. Sulfato de manganeso	C	X	C	X	C	C	C	C	C	C	-				
12. Sulfato de zinc	C	X	C	X	C	C	C	C	C	C	C	-			
13. Ácido fosfórico	C	X	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-		
14. Ácido nítrico	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	
15. Ácido sulfúrico	C	X	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-

Fuente: Mariscal, 2002.



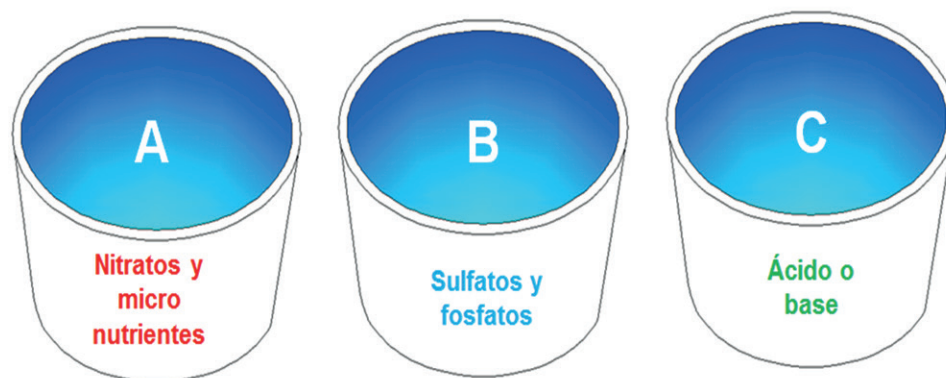
El fosfato mono amónico (fila 5) no es compatible con el nitrato de amonio y con el nitrato de calcio y es compatible con el nitrato de potasio y el nitrato de magnesio (Tabla 44).

Como norma general, no se debe mezclar fertilizantes que contienen calcio y hierro con fertilizantes que contengan sulfatos y fosfatos.

Considerando que la tasa de inyección de la disolución depende del peso específico de las disoluciones, se debe balancear el peso de los fertilizantes en los tanques, considerando su compatibilidad.

Para grandes extensiones agrícolas, se puede preparar los fertilizantes en más de cuatro tanques; tanque A, (N-P-K); tanque B, (Ca-Mg); tanque C, (micro elementos); tanque D, (ácido o la base para corregir el pH) (Figura 8).

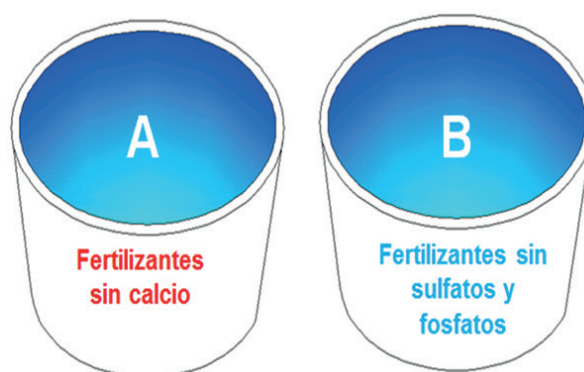
Figura 8. Disolución de fertilizantes.



Fuente: Autoría propia.

- Tanque A, fertilizantes sin calcio: nitrato de potasio, fosfato mono amónico, fosfato di amónico, cloruro de potasio, urea, nitrato de amonio, sulfato de potasio, ácido fosfórico y sulfato de magnesio.
- Tanque B, fertilizantes sin sulfatos y sin fosfatos: nitrato de potasio, nitrato de magnesio, urea, nitrato de calcio, nitrato de amonio y ácido nítrico.

Figura 9. Disolución de fertilizantes para pequeñas explotaciones.



Fuente: Autoría propia.



9.3. Preparación de una disolución

La preparación de una solución comprende la preparación de los fertilizantes en el agua, el proceso de agitación y trasvase de las disoluciones de un tanque a otro para ser inyectadas a la línea principal de riego.

Las normas de tipo general para la disolución de los fertilizantes líquidos o sólidos son:

- Llenar el tanque con agua hasta un 50% de su volumen.
- Agregar lentamente los fertilizantes líquidos y ácidos.
- Agregar los fertilizantes sólidos.
- Agitar hasta que se disuelvan los fertilizantes.
- Adicionar el agua hasta completar el volumen total requerido.

Tanto los fertilizantes líquidos como los sólidos deben ser diluidos y disueltos lentamente, bajo una agitación constante; para el llenado final del tanque se puede aprovechar la presión existente en la red, para obtener una mejor mezcla a través del agua. Se debe tener la precaución de no adicionar agua en el ácido, no mezclar ácidos con ácidos o ácidos con fertilizantes; la disolución de los fertilizantes debe y seguir estrictamente las normas anteriores.

La disolución de la urea y los nitratos de amonio, calcio y potasio enfrían la mezcla (reacción endotérmica).

El hierro bajo la forma de quelato EDDHA (ácido etilendiaminodihidroxiácido) se puede disolver en un pequeño volumen de agua caliente para luego ser diluido en el tanque.

Cualquiera que sea el fertilizante o químico a utilizar, se recomienda que el personal encargado de realizar este trabajo utilice las protecciones necesarias como: guantes, mandiles, botas de caucho; en el caso de ácidos cáusticos como el ácido sulfúrico, se debe utilizar máscaras de protección facial; el ácido se debe adicionar al agua lentamente o en volúmenes pequeños, para evitar reacciones fuertes que puedan causar algún tipo de daño al personal que realiza este trabajo.

La agitación durante la preparación de la disolución de los fertilizantes tiene un papel muy importante en la preparación de una disolución, ya que con este proceso se disuelve totalmente los fertilizantes y se evita que éstos afecten al sistema de filtrado y causen el taponamiento de los goteros. Los mecanismos que producen una agitación centrífuga brindan excelentes resultados en la disolución de los fertilizantes; adicionalmente, se puede utilizar agua caliente para obtener una disolución completa y homogénea de los fertilizantes (Figura 10).

Figura 10. Agitadores mecánicos para la disolución de los fertilizantes.



Fuente: Amiad, 2015.

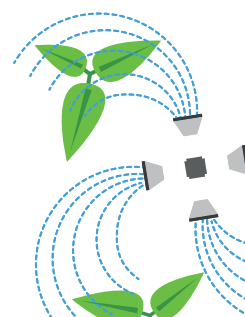
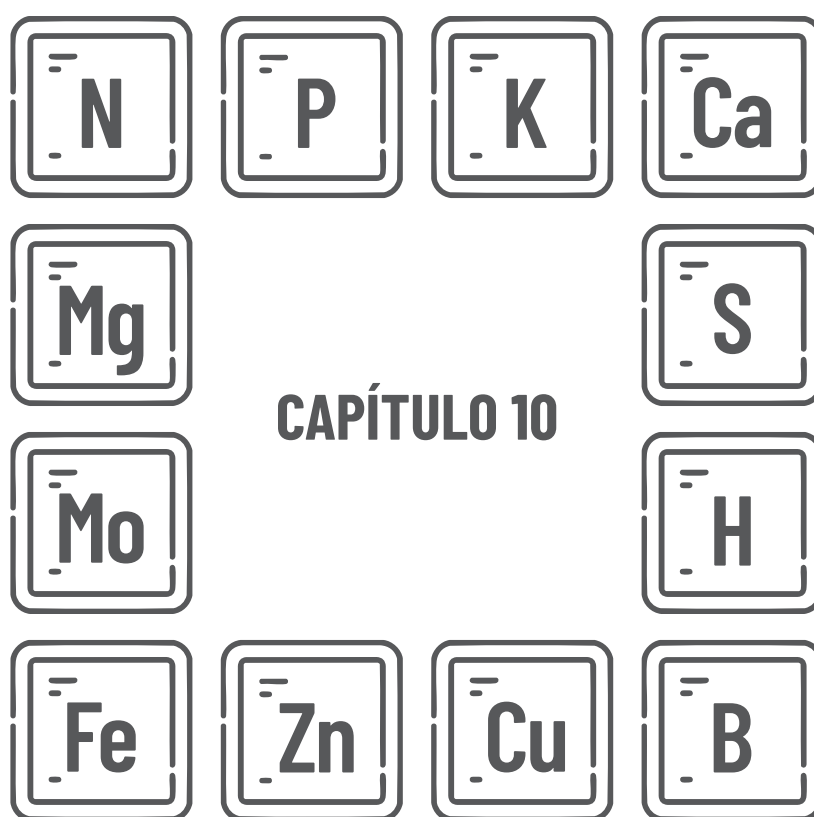
La disolución de los fertilizantes se realiza en los tanques superiores, en cada tanque existe un agitador mecánico y cuenta con las conexiones necesarias para el abastecimiento de agua, drenaje y salida de los fertilizantes. Una vez concluido el proceso de agitación se deja en reposo la disolución por un tiempo mínimo de 30 minutos para que se decanten los fertilizantes que no se han disuelto; finalmente, esta disolución se trasvasa a los tanques inferiores, a partir de los cuales las disoluciones son inyectadas a la línea de riego a través de los inyectores (Figura 11).

Figura 11. Equipos mecánicos para la disolución de los fertilizantes.



Fuente: Autoría propia.





MÉTODOS DE APLICACIÓN DE LOS FERTILIZANTES

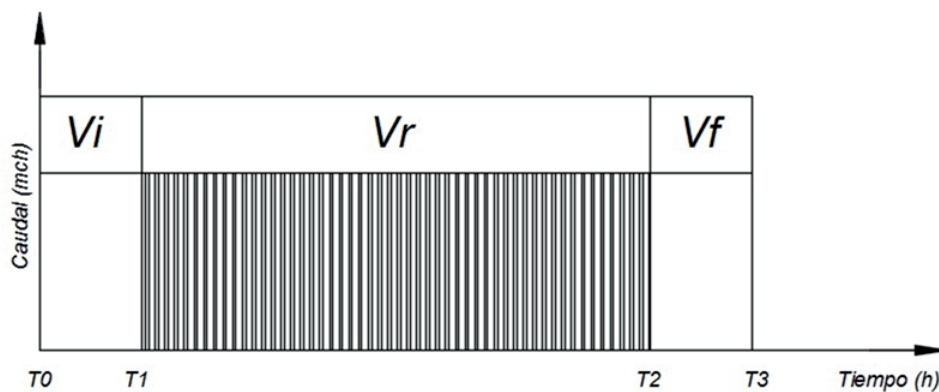
Los métodos de aplicación de los fertilizantes más conocidos son:

- Volumen.
- Proporcional.
- Control de la conductividad eléctrica.

En cualquier método de aplicación, se considera un tiempo inicial para el llenado de la tubería porta laterales y los laterales de riego, y un tiempo final para el lavado de las sales para evitar el taponamiento de los emisores. La inyección de la disolución se inicia cuando el sistema de riego se encuentra funcionando bajo un régimen uniforme a menos que el agua de riego se mezcle con los fertilizantes antes de que se inicie su aplicación; el tiempo de llenado depende del tamaño del lote de cultivo y puede variar entre 30 segundos y 3 minutos y el tiempo de lavado y vaciado de 5 minutos.

La aplicación del agua de riego y los fertilizantes disueltos se podría distribuir de acuerdo con el siguiente esquema (Figura 12).

Figura 12. Esquema del proceso de riego y fertirrigación



Fuente: Autoría propia

Para la aplicación del agua de riego, se inicia en el tiempo T_0 y termina en el tiempo T_3 ; entre los tiempos T_0 y T_1 existe un tiempo inicial (llenado), entre los tiempos T_1 y T_2 el tiempo de riego, y entre los tiempos T_2 y T_3 un tiempo final (lavado), debido a que el volumen de riego es directamente proporcional al tiempo de riego, el tiempo inicial, de riego y final, equivalen a un volumen inicial (V_i), de riego (V_r) y final (V_f), respectivamente. En este esquema, el volumen inicial V_i representa el volumen de agua necesario para el llenado de la tubería porta laterales y los laterales de riego, el volumen V_r representa el volumen del agua de riego más el volumen de disolución a inyectar y el volumen final V_f es el volumen de agua necesario para el lavado de las sales desde los laterales de riego (Figura 12).

El tiempo inicial se determina en el campo y consiste en medir el tiempo en el cual una partícula de agua tarda en desplazarse desde la válvula de control de la parcela hasta el gotero final del lateral de riego más alejado de la parcela o unidad de riego y el tiempo final, consiste en determinar el tiempo necesario para que la conductividad eléctrica del agua de riego en ese mismo lateral sea igual a la conductividad eléctrica del agua de riego, medida en el reservorio o en la fuente de alimentación (Natan, 2002).

10.1. Aplicación por volumen

La aplicación por volumen consiste en inyectar la disolución en forma continua y constante durante cierto intervalo de tiempo.

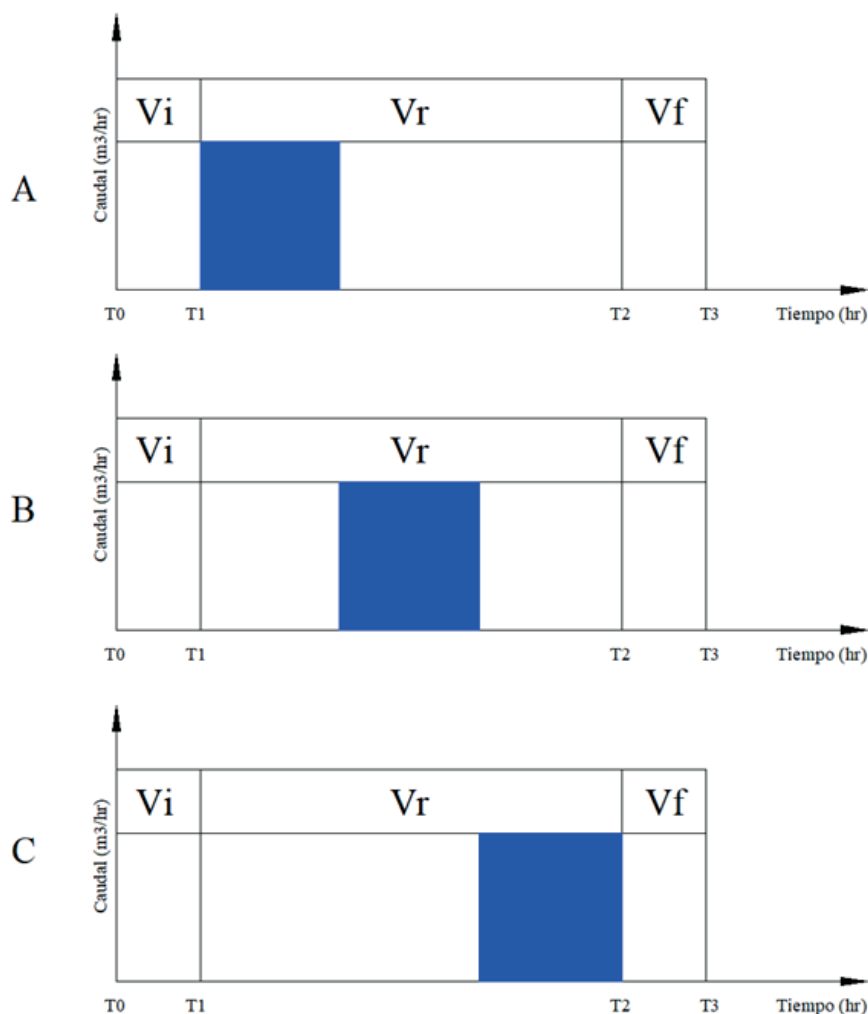
La inyección por volumen se realiza en la cresta del sifón, venturi y electrobombas (grupos pequeños de bombeo), cuya inyección es por volumen (de forma continua).

Cuando el tiempo de riego es mayor a la suma de los tiempos inicial, final y el tiempo requerido para la inyección de la disolución, la inyección se puede realizar de acuerdo con el esquema de la Figura 13.

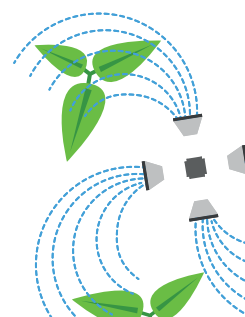
Si la suma del tiempo necesario para la inyección de la disolución, tiempo inicial y final, es menor al tiempo de riego, no es necesario adicionar el tiempo inicial y final, y cuando esta suma es mayor al tiempo de riego, se debe considerar esos tiempos en el proceso de riego y de aplicación de los fertilizantes.

Si la inyección de la disolución se realiza de acuerdo con el esquema A (Figura 13), los nitratos se distribuyen fuera del sistema radical del cultivo y se pierden por lixiviación debido a su alta movilidad y cuando ésta se realiza de acuerdo con el esquema C, no existirá una buena distribución del fósforo en el sistema radical del cultivo debido a su baja movilidad, por tanto, la opción más eficiente es inyectar la disolución de acuerdo al esquema B de la Figura 13 (Natan, 2002).

Figura 13. Distribución del agua de riego y los fertilizantes.



Fuente: Natan, 2002.



Las ecuaciones que se utilizan para determinar el tiempo de riego y de inyección de los fertilizantes disueltos en el proceso de fertirrigación son las siguientes.

$$Tr = \frac{0.06 \times Vr}{Q_r}$$

En la Ecuación 38, Tr es el tiempo de aplicación del riego (minutos), Vr es el volumen de agua a aplicarse (litros) y Q_r es el caudal de riego de la válvula ($m^3 h^{-1}$); 0.06 es el factor de transformación de unidades.

$$Tf = \frac{60 \times Vf}{Q_i}$$

En la Ecuación 39, Tf es el tiempo de aplicación de los fertilizantes disueltos (minutos); Vf es el volumen de los fertilizantes a inyectar (litros) y Q_i es el caudal del inyector de fertilizantes ($l h^{-1}$); 60 es el factor de transformación de unidades.

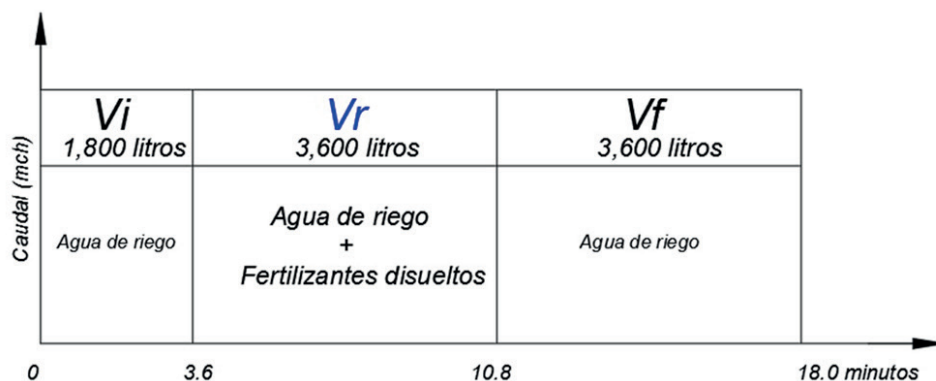
Ejemplo 10.1: Cálculo del tiempo de aplicación, la distribución del riego para proporcionar un volumen de agua (Vr) de 9 000 litros y un volumen de disolución (Vf) de 30 litros, considerando que el caudal de riego (Q_r) es de $30 m^3 h^{-1}$ y el caudal del inyector (Q_i) es de $250 l h^{-1}$. Los tiempos inicial y final se midieron en 0.7 y 5 minutos, respectivamente.

$$Tr = \frac{0.06 \times 9\,000}{30} = 18 \text{ minutos}$$

$$Tf = \frac{60 \times 30}{250} = 7.20 \text{ minutos}$$

El tiempo de riego necesario para proporcionar un volumen de agua de 9 000 litros ($9 m^3$) es de 18 minutos y el tiempo necesario para inyectar los fertilizantes disueltos de 30 litros es de 7.20 minutos; la suma de los tiempos inicial y final es de 5.7 minutos, siendo este valor menor al tiempo de riego, por tanto, no es necesario adicionar los tiempos inicial y final al tiempo de riego de 18 minutos; el proceso de riego y de aplicación de los fertilizantes disueltos se puede realizar de acuerdo a la Figura 14.

Figura 14. Distribución del riego y la inyección de los fertilizantes disueltos.



Fuente: Autoría propia

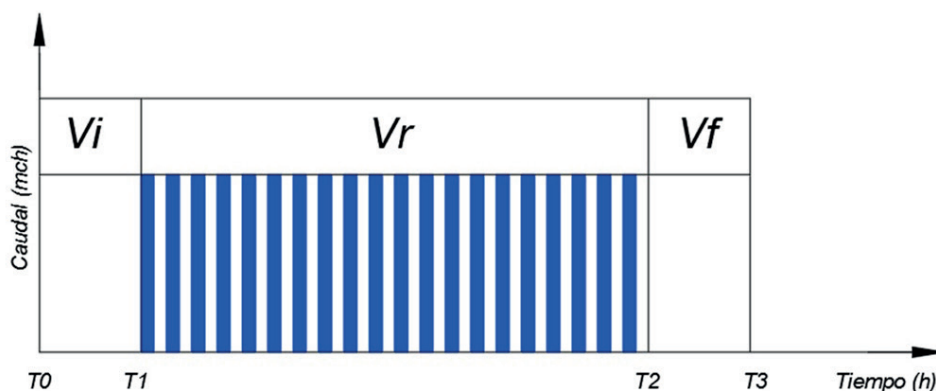
En la Figura 14, tanto el tiempo inicial como el final son mayores a los tiempos medidos en el campo, desde que se realiza la apertura de la válvula hasta el minuto 3.60 se aplicará un volumen inicial de 1 800 litros (V_i , llenado de laterales + riego), desde el minuto 3.60 hasta el minuto 10.80 se aplicará el volumen de 3 600 litros de agua de riego más los 30 litros de la disolución (V_r , riego + fertilizantes disueltos), y desde el minuto 10.80 hasta el minuto 18 se aplicará el volumen final de 3 600 litros de agua (V_f , lavado de laterales + riego).

10.2. Aplicación proporcional

La fertirrigación proporcional consiste en inyectar la disolución en forma intermitente (pulsos) durante el proceso de irrigación, los valores de pH y CE en el agua de riego presentan pequeñas variaciones a lo largo de este proceso.

Se presenta el esquema de la distribución de los fertilizantes disueltos a través del método proporcional; (Figura 15) en este método, también se integra el volumen inicial y final descrito anteriormente. La fertirrigación se produce durante todo el tiempo o volumen de riego (V_r).

Figura 15. Fertirrigación proporcional.



Fuente: Autoría propia.

Las bombas hidráulicas (TMB, ITC, Dosatron, inyector Amiad y otros) inyectan la disolución en forma proporcional, debido a que su ritmo de trabajo consiste en inyectar la disolución en forma de pulsos de acuerdo al desplazamiento o movimiento de pistones o platos de fibra.

Este método es más ventajoso que el anterior debido a que la distribución de los nutrientes es más uniforme en el perfil del suelo humedecido.

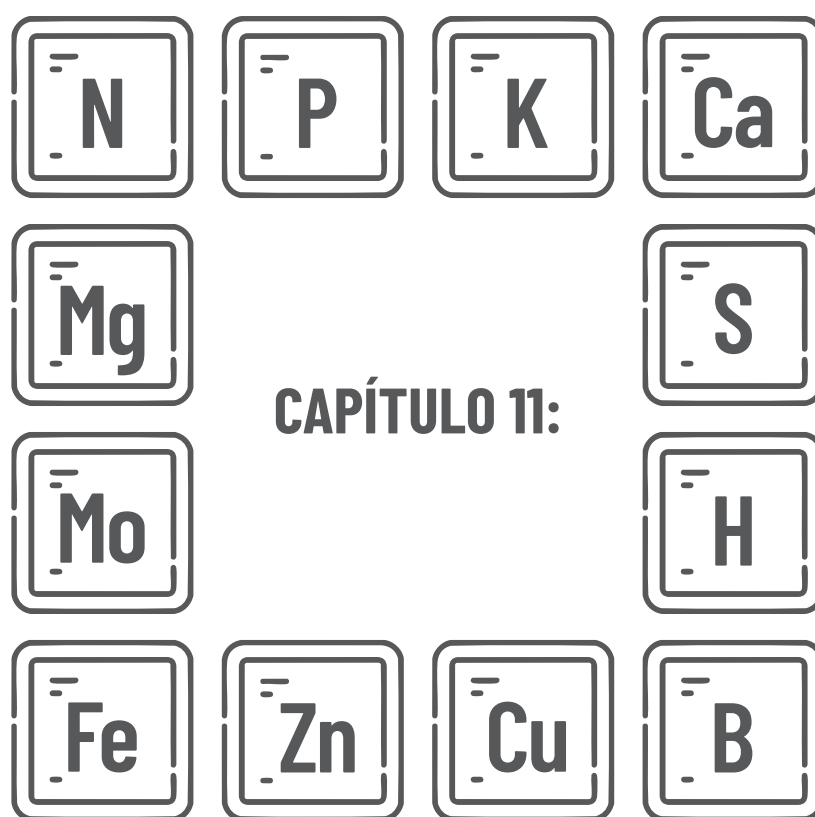
10.3. Aplicación por control de la conductividad eléctrica

La inyección basada en el control de la CE del agua de riego permite optimizar al máximo la utilización de los fertilizantes. Este método requiere de una automatización completa de la unidad de inyección, en la cual además de los computadores de riego se requiere de sensores para medir la CE.

Este método consiste en fijar un objetivo de la CE de acuerdo al requerimiento del cultivo y el equipo inyectará la disolución hasta alcanzar dicho objetivo, por ejemplo, si la CE objetivo del agua a la salida del gotero es de 0.70 dS m^{-1} y la CE del agua de riego es de 0.30 dS m^{-1} , la unidad de fertirrigación inyectará la disolución necesaria para incrementar la CE del agua desde 0.30 hasta 0.70 dS m^{-1} .

A través de este método se ha logrado ahorrar hasta un 40% de los fertilizantes, permite uniformizar la CE en la solución del suelo en los campos cultivados y es indispensable en los cultivos hidropónicos y semi hidropónicos, así como también, en los sistemas de riego por pulsos (riego de bajo volumen).

Toda máquina de fertilización en línea alcanza el objetivo de la CE en un tiempo de 2 a 3 minutos (Granda, 2003).



EQUIPOS DE INYECCIÓN DE LOS FERTILIZANTES

La inyección de los fertilizantes disueltos se realiza a través de bombas hidráulicas, dispositivos venturi, grupos de bombeo, sistemas booster (grupo de bombeo más inyector venturi), por medio de máquinas de fertirrigación, fertiducto y aprovechando el vacío que se produce en la cresta de los sifones (instalaciones para pequeños agricultores). Toda unidad de fertirrigación, cualquiera que sea su tipo, se debe instalar aguas abajo o después del sistema de medición de caudales (válvula volumétrica o hidrómetro) (Melendres, 1998).

Los equipos de inyección de fertilizantes se clasifican en función de:

Forma de inyección:

- Inyección constante o variable: Venturi, fertiducto y en la cresta de un sifón.
- Inyección proporcional: Bombas hidráulicas.

Principio de funcionamiento:

- Carga hidráulica natural: Fertiducto.
- Diferencial de presión: Venturi y en la cresta del sifón.
- Bombeo: Sistemas Booster.

Fuente de energía:

- Carga hidráulica natural: Fertiducto, venturi, bombas hidráulicas.
- Energía eléctrica: Bombas, booster e inyectores eléctricos.

Pérdidas de energía o carga en la línea de riego:

- Sin pérdidas de carga: Bombas hidráulicas, booster, fertiducto y cresta del sifón.
- Pérdidas de carga: Venturi.

11.1. Inyectores hidráulicos

Los inyectores hidráulicos son equipos que permiten inyectar las disoluciones de los fertilizantes utilizando la energía hidráulica existente en la línea de riego, dentro de este grupo de inyectores existen las bombas Fertic, TMB, Amiad y Dosatron; para la mayoría de los inyectores hidráulicos, el caudal de inyección varía ligeramente en función de la presión existente en la línea de riego, excepto el inyector dosatron, cuya tasa de inyección es fija.

• Bomba hidráulica Fertic

Según ITC (2015), la bomba hidráulica Fertic funciona con la carga hidráulica existente en la línea de riego, inyecta los fertilizantes disueltos en forma proporcional o pulsos (0.2 litros cada 2 o 3 segundos).

El funcionamiento de las bombas hidráulicas Amiad, Fertic y Dosatron es similar a la bomba hidráulica TMB, con la diferencia de que la inyección de los fertilizantes se realiza a través del movimiento de un pistón alojado dentro de una cámara plástica; cuando el pistón realiza el movimiento de aspiración, la disolución es succionada y almacenada en la cámara del inyector, cuando el pistón realiza el movimiento contrario al anterior, la disolución es inyectada en la línea de riego al doble de la presión de entrada; toda bomba hidráulica presenta un drenaje permanente del agua.

En el inyector hidráulico Fertic; el caudal de inyección varía entre 25 y 500 L h⁻¹; la presión de funcionamiento varía entre 2 y 10 atmósferas; para una presión de 4.00 atmósferas, el caudal de inyección es de 250 L h⁻¹; la presión con la cual se inyecta la disolución es el doble de la existente en la línea de riego; la presión mínima para su funcionamiento es de 20 m (Figura 16).

Figura 16. Inyector Fertic.



Fuente: ITC, 2015

$$Q_i = 30.767 \times H^{0.532}$$

En la Ecuación 40, Q_i es el caudal de inyección de los fertilizantes disueltos (L h⁻¹); H, la carga hidráulica existente en la línea de riego (m).

Ejemplo 11.1: Cálculo del caudal de inyección de una bomba Fertic para una presión de funcionamiento en la red de 35 m.

$$Q_i = 30.767 \times 35^{0.532} = 203.95 \text{ L h}^{-1}$$

El caudal de inyección de esta bomba no es regulable, por tanto, el peso de los fertilizantes se debe calcular para el caudal de inyección calculado en base a la presión existente en la línea de riego.

Este inyector demanda la instalación de filtros de anillas de $\frac{3}{4}$ " de 120 mesh de grado de filtración (anillas de color rojo) tanto en el ingreso del agua al inyector como en el ingreso de los fertilizantes disueltos a la cámara.

Para su funcionamiento, este inyector necesita el doble de caudal a inyectar; es decir, cuando el caudal a inyectar es de 250 L h^{-1} , el caudal de consumo debe ser de 500 L h^{-1} , por cuanto, la descarga de la bomba debe conectarse al reservorio.

• Bomba hidráulica TMB

La bomba hidráulica TMB funciona con la carga hidráulica existente en la línea de riego (mínimo 20 metros), inyecta los fertilizantes disueltos en forma proporcional o pulsos (0.2 litros cada 2 o 3 segundos) muy parecido a la bomba Fertic (Tabla 45 y Figura 17).

Tabla 45. Parámetros técnicos de una bomba TMB.

Modelo	Presión de la línea	Caudal de Inyección (L h^{-1})
50 1	20 - 82	8 - 50
250 1	20 - 82	15 - 250
600 1	20 - 82	50 - 600

Fuente: Amiad, 2015.

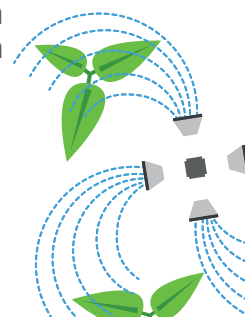
Figura 17. Inyector TMB.



Fuente: Amiad, 2015.

La bomba hidráulica TMB inyecta los fertilizantes en la línea de riego en base al movimiento de dos diafragmas (superior e inferior) conectados a través de un eje central, cuando el movimiento del eje se realiza hacia abajo, los fertilizantes son succionados y almacenados en la cámara generada entre el cuerpo de la bomba y el diafragma superior, cuando el eje se desplaza hacia arriba, la disolución es inyectada en la línea de riego a una presión aproximada de dos veces la presión existente en la línea de riego (Amiad, 2015).

El caudal de inyección está en función de la regulación de la velocidad del desplazamiento del pistón (instalado en el eje central) y de la presión existente en la línea de riego; casi la totalidad de la bomba está construida en materiales de acero inoxidable.



Para este inyector se debe instalar filtros de anillas de $\frac{3}{4}$ " de 120 mesh de grado de filtración (anillas de color rojo) tanto en el ingreso del agua al inyector y de los fertilizantes disueltos a la cámara superior.

La bomba TMB para su funcionamiento necesita el doble de caudal a inyectar, cuando el caudal a inyectar es de 250 L h^{-1} , el caudal de consumo o de drenaje es de 500 L h^{-1} , de tal forma que, es necesario conectar la descarga de la bomba al reservorio a través de una manguera de 20 o 25 mm.

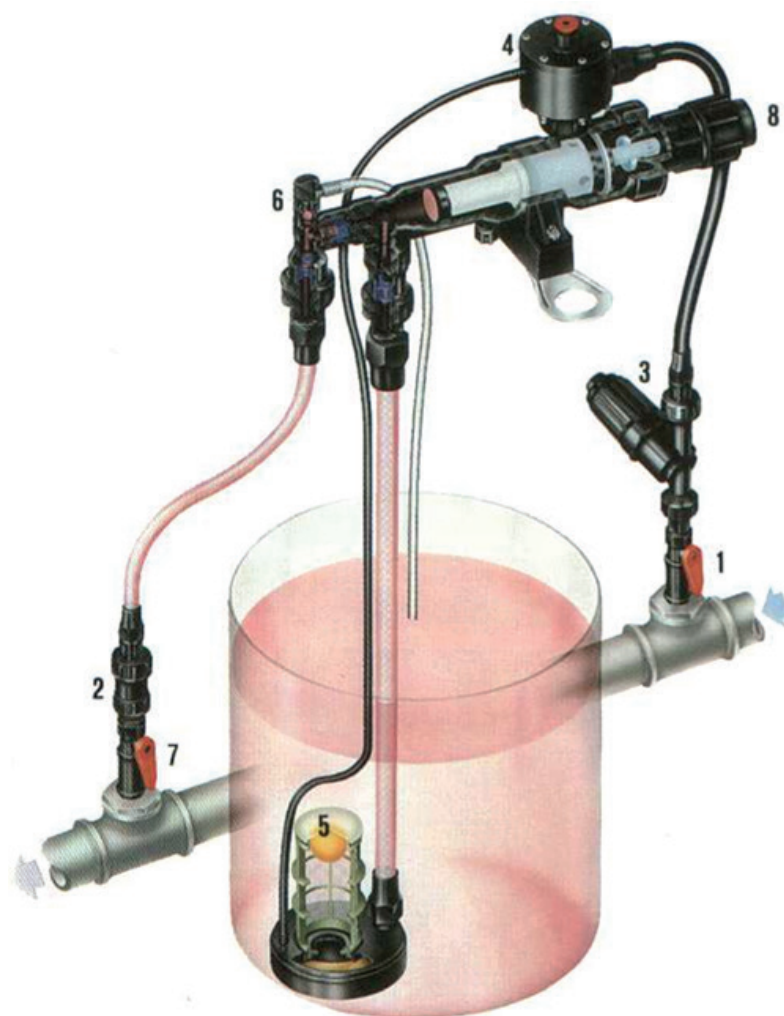
• Bomba inyectora hidráulica AMIAD

La bomba inyectora hidráulica AMIAD funciona con la carga hidráulica existente en la línea de riego (mínimo 5 metros), inyecta los fertilizantes disueltos en forma proporcional o pulsos (0.33 litros en cada pulso), puede inyectar hasta 320 L h^{-1} (Figura 18).

El agua ingresa al motor hidráulico de la bomba a través del puerto de propulsión del agua corriente arriba y sale por el motor a la línea de drenaje a través del puerto de escape de agua (Amiad, 2015).

El fertilizante diluido ingresa al inyector a través del puerto de succión y se inyecta a la línea de riego aguas abajo a través de la línea de inyección (Amiad, 2015).

Figura 18. Inyector hidráulico.



1. Válvula manual, 2. Inyección de la bomba, 3. Filtro $\frac{3}{4}$ " 120 mesh de grado de filtración, 4. Cierre automático, 5. Válvula de succión del fertilizante, 6. Válvula de salida de aire, 7. Válvula manual en la línea de inyección, 8. Drenaje del agua. **Fuente:** Amiad, 2015.

$$Q_i = 22.469 \times H^{0.609} \quad (41)$$

En la Ecuación 41, Q_i es el caudal de inyección de los fertilizantes disueltos ($L h^{-1}$); H es la carga hidráulica existente en la línea de riego (m).

Ejemplo 11.2: Cálculo del caudal de inyección para una presión de funcionamiento en la red de 35 m.

$$Q_i = 22.469 \times 35^{0.609} = 195.84 L h^{-1}$$

El caudal de inyección es de $195.84 L h^{-1}$ y el flujo motriz es de $587.4 L h^{-1}$ (el triple del caudal de inyección).

En este inyector se debe instalar filtros de anillas de $\frac{3}{4}$ " de 120 mesh de grado de filtración (anillas de color rojo) al ingreso del agua al inyector como en el ingreso de los fertilizantes disueltos a la cámara superior.

La bomba para su funcionamiento necesita el triple de caudal a inyectar, si el caudal a inyectar es de $200 L h^{-1}$, el caudal de consumo o de drenaje es de $600 L h^{-1}$.

• Bomba hidráulica Dosatron

El Dosatron es una bomba hidráulica que funciona de igual forma que las bombas anteriores, son muy utilizadas en sistemas de riego hidropónicos por su alta precisión en la tasa de inyección (Tabla 46), una de las ventajas que presenta esta bomba es que opera a una presión de 3 metros (Dosatron, 2015).

Tabla 46. Parámetros técnicos de un Dosatron.

Modelo	Caudal o flujo motriz ($m^3 h^{-1}$)	Presión en la línea (m)	Caudal de Inyección ($L h^{-1}$)
D3RE2	0.01 – 3.00	3.00 – 60.00	0.02 – 60.00
D3RE5	0.01 – 3.00	3.00 – 60.00	0.05 – 150.00
D8R	0.50 – 8.00	2.00 – 80.00	1.00 – 160.00

Fuente: Autoría propia.

A la salida de cada tanque de los fertilizantes disueltos se debe instalar un filtro de anillas para retener los precipitados o fertilizantes no disueltos, generalmente este tipo de filtro es de $\frac{3}{4}$ " de diámetro y de 120 mesh de grado de filtración. La descarga de este tipo de inyectores se debe conectar a un punto de drenaje para evacuar el agua utilizada por la bomba durante su funcionamiento.

La bomba hidráulica Dosatron inyecta un caudal fijo, cualquiera que sea la variación de la presión en la línea de riego (Figura 19).

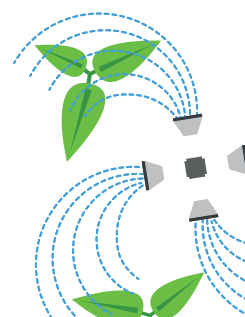
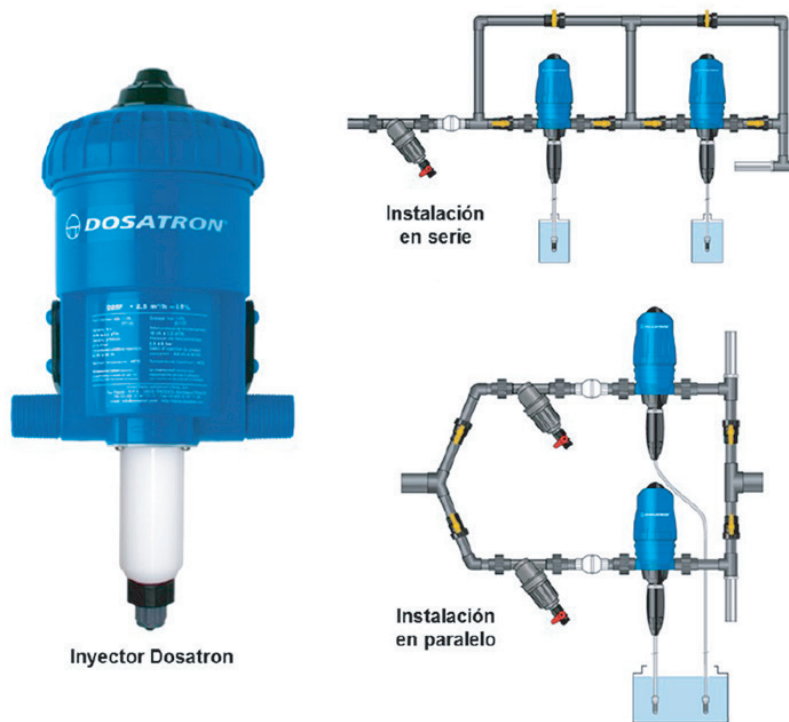


Figura 19. Inyector Dosatron.

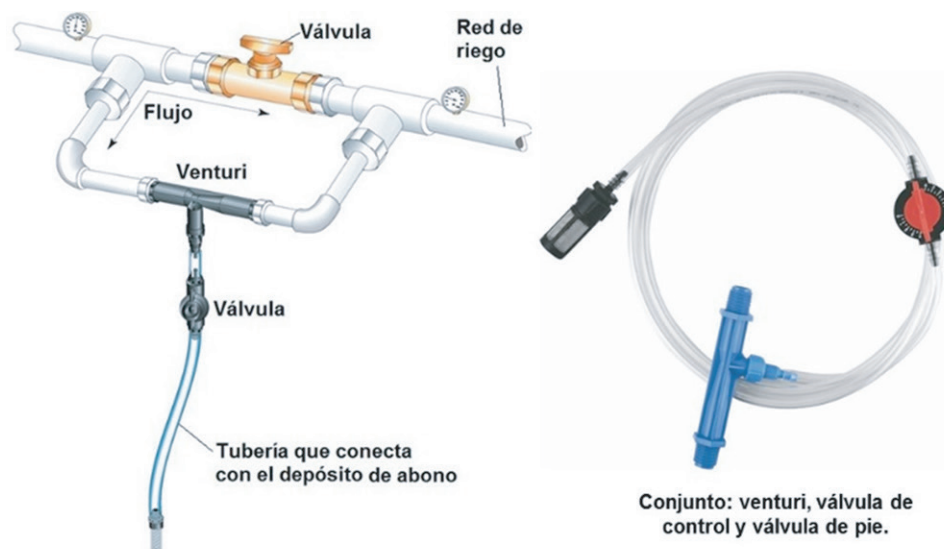


Fuente: Dosatron, 2015.

11.2. Inyector venturi

En un venturi, (Figura 20), la inyección de la disolución de los fertilizantes se realiza a través del vacío creado por la variación de la presión antes y después del inyector, un venturi produce una pérdida de carga en la línea de riego que varía entre 7 y 15 m (Oxman, 1997).

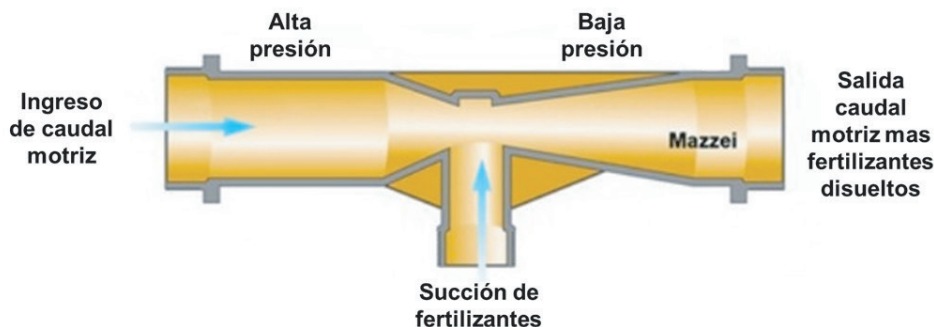
Figura 20. Inyector venturi.



Fuente: Mazzei, 2015.

En el corte longitudinal del venturi, se observa una variación del diámetro interno (reducción y ensanchamiento). Aguas debajo de la entrada del venturi, el diámetro se reduce produciendo un incremento de la velocidad del agua en la garganta del venturi, generando un vacío (presión negativa de hasta -5 m), permitiendo que la disolución sea succionada e inyectada a la red de riego; el diferencial de presión mínimo entre la entrada y la salida del venturi es de 7 m y este diferencial de presión es la pérdida de carga que produce un venturi, como se observa en la Figura 21 (Mazzei, 2015).

Figura 21. Esquema de inyector venturi.



Fuente: Mazzei, 2015

La instalación de un venturi en la línea de riego genera pérdidas de carga de hasta 30% de la presión existente en la línea, por ejemplo, cuando la presión normal de trabajo en un sistema de riego es de 35 m, la pérdida de carga mínima que ocasionaría la instalación de un venturi en la línea principal es de aproximadamente 7 m, pérdida de carga que se debe considerar en el funcionamiento del sistema de riego, especialmente en los puntos críticos o topográficamente ubicados sobre la cota del cabezal de riego.

El caudal o flujo motriz se considera para el dimensionamiento de los grupos de bombeo cuando los inyectores se instalan en el sistema de succión - descarga de la bomba, los caudales de inyección que se presentan en los catálogos son para agua pura, por tanto, para fertirrigación se considera un 80% de ese caudal debido al incremento del peso específico de la disolución (agua más fertilizante). El caudal de inyección varía desde 60.00 L h⁻¹ (venturi ½") hasta los de 1 200.00 L h⁻¹ (venturi 2"); cuando se requiere de caudales mayores, se instala una batería de venturis en paralelo (Tabla 47 y Figura 26).

Tabla 47. Caudal motriz y de inyección de los inyectores venturi.

Modelo	Caudal o flujo motriz (m ³ h ⁻¹)	Caudal de inyección agua pura (L h ⁻¹)	Caudal de inyección ajustado (L h ⁻¹)
Venturi ½"	0.50	60.00	48.00
Venturi ¾"	1.50	95.00	76.00
Venturi 1"	3.70	280.00	224.00
Venturi 1.5"	10.00	600.00	480.00
Venturi 2"	22.00	1 200.00	960.00

Fuente: Autoría propia.

La pérdida de carga producida por la válvula instalada en la línea principal de riego genera las condiciones hidráulicas ideales para el funcionamiento del venturi. El caudal de inyección de un venturi se incrementa ligeramente a medida que la pérdida de carga producida por la válvula reductora se incrementa.

Las válvulas manuales instaladas antes y después del venturi se utilizan para activar el funcionamiento del venturi, la válvula manual instalada en la succión del venturi se utiliza para regular el caudal de inyección. La regulación y medición del caudal de inyección puede complementarse con un medidor de flujo instalado en la succión del venturi (Figura 20).

Para pequeños agricultores, el venturi debe instalarse en la succión descarga de la bomba, la diferencia de presión entre estos dos puntos produce la succión de los fertilizantes disueltos a la línea de riego, considerando que el caudal motriz del venturi debe sumarse al caudal de operación de la bomba.

El modelo del venturi 584 es de $\frac{1}{2}$ ", el 684 de $\frac{3}{4}$ ", el 878 de 1" y el 1583 de 1.5", para conocer el caudal motriz y de succión se debe conocer la presión que existe en la línea de riego y la máxima pérdida de carga que se podría producir en el venturi, si la pérdida de carga generada por el venturi es mayor a la permitida, se instala un sistema Booster para compensar la caída de presión (Tabla 48).

Tabla 48. Rendimiento de un venturi.

Presión operación (atm)		Modelo							
		584		684		878		1583	
PE	PS	QM	Qi	QM	Qi	QM	Qi	QM	Qi
	0.00		1.60		1.50		4.50		14.40
	0.35		1.60		1.50		4.50		14.40
	0.50		1.60		1.50		4.50		14.40
	1.05		1.60		1.50		4.50		14.40
	1.41		1.60		1.50		4.50		14.30
4.22	2.11	27.40	1.60	45.90	1.50	47.90	4.40	141.00	14.30
	2.46		1.60		1.50		3.90		13.00
	2.81		1.60		0.85		2.60		9.30
	3.16		1.60		0.44		1.00		5.10

PE, presión de entrada (atm.); PS, presión de salida (atm.); QM, caudal motriz (L min^{-1}); Qi, caudal de inyección (l min^{-1}) Fuente: Mazzei, 2015.

Ejemplo 11.3: Cálculo del caudal motriz y de inyección para un venturi de $\frac{3}{4}$ " (modelo 584), para una presión a la entrada del venturi de 4.22 atmósferas (kg cm^{-2}) y una presión a la salida del venturi de 2.46 atmósferas. En la Tabla 48, para la presión de entrada de 4.22 atm. (Columna PE) y para la presión de salida de 2.46 atm. (Columna PS), el flujo de la línea principal o motriz (QM) es de 27.40 L min^{-1} ($1.64 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) y el caudal de la succión del agua pura (Qi) es de 1.60 L min^{-1} (96 L h^{-1}). La presión mínima de operación del inyector (diferencia entre la presión de entrada y de salida) es de 1.0 atm. (10 metros).

En proyectos de riego pequeños, si se requiere utilizar un venturi de $\frac{1}{2}$ " para la inyección de los fertilizantes, el caudal de la unidad de riego debe ser mayor a $1.64 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.



11.3. Grupos de bombeo (bomba)

Un grupo de bombeo está compuesto por una bomba y un motor eléctrico, conjunto conocido como “bomba”; este sistema consiste en inyectar la disolución desde un tanque hasta la línea principal de riego a través de una bomba pequeña (0.50 – 3.00 HP); la bomba se dimensiona para inyectar la disolución a una presión mayor a la máxima presión existente en la línea de riego, generalmente este tipo de bombas tiene instalado en su carcasa varios impulsores de acero inoxidable instalados en serie (Figura 22).

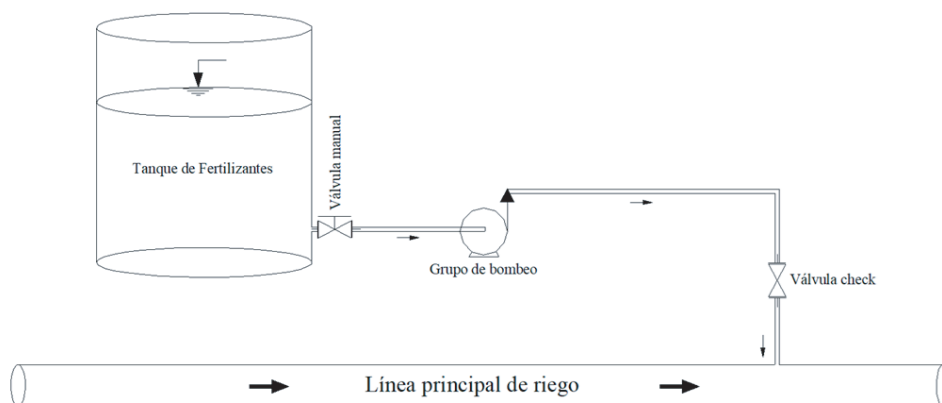
Figura 22. Bomba vertical.



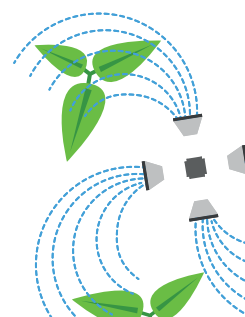
Fuente: Groundfos, 2015.

Se presenta el esquema de la instalación de un grupo de bombeo utilizado en el proceso de fertirrigación, en el cual la inyección de la disolución se realiza desde el tanque de fertilizantes hasta la línea principal de riego. Estos sistemas deben protegerse con flotadores eléctricos (instalados dentro del tanque de fertilizantes) para evitar su operación en vacío (Figura 23).

Figura 23. Esquema de instalación de un grupo de bombeo para fertirrigación.



Fuente: Autoría propia.



Los grupos de bombeo más utilizados tienen una capacidad de inyección de $1\,500.00\text{ L h}^{-1}$ y su presión o carga dinámica total varía de 50 – 60 m; la carcasa y los impulsores deben ser de acero inoxidable considerando que el pH es muy ácido y la extrema acidez que presenta una disolución (hasta 200 dS m^{-1}).

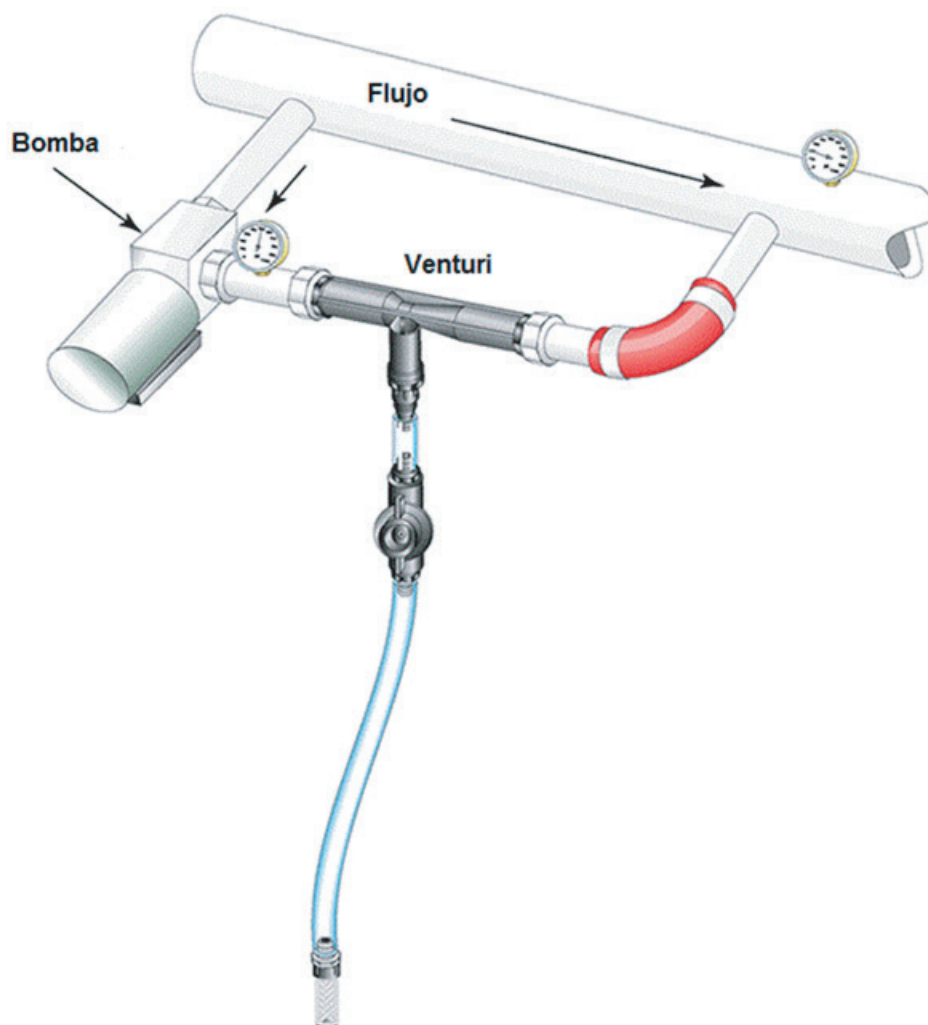
Se utilizan en grandes explotaciones agrícolas, en donde los inyectoros de fertilizantes existentes son muy pequeños para cubrir la relación de dilución deseada.

11.4. Sistema Booster

El sistema Booster es utilizado para proporcionar la carga hidráulica necesaria para el funcionamiento de un venturi, sin producir pérdidas de carga en la línea principal de riego (Figura 24).

El grupo de bombeo que alimenta a un sistema Booster debe proporcionar el caudal motriz para el número de venturis a utilizar y una carga hidráulica igual o mayor a 20 m (presión mínima requerida para el funcionamiento de un venturi).

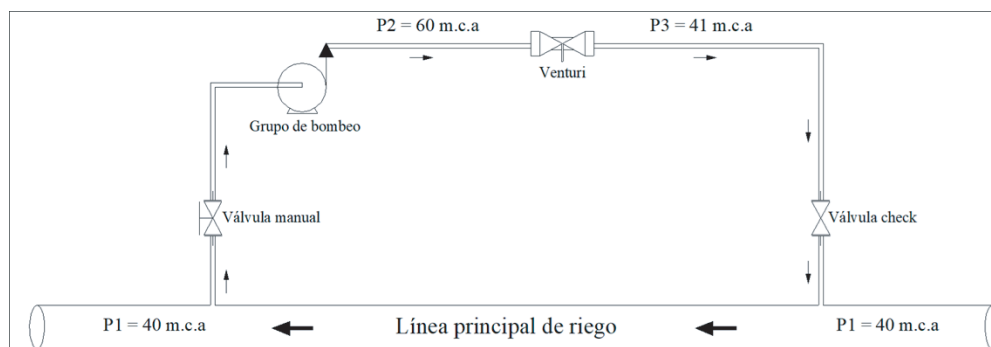
Figura 24. Esquema de un sistema Booster.



Fuente: Mazzei, 2015.

El esquema típico de la instalación de un sistema Booster, en la cual existe una derivación desde la línea principal para alimentar la bomba que proporciona el caudal y la carga hidráulica necesaria para el funcionamiento del venturi (Figura 25).

Figura 25. Distribución de las presiones en un sistema Booster.



Fuente: Autoría propia.

La distribución de presiones en un sistema de fertirrigación Booster, en el cual la presión P1 (línea principal de riego) es de 40 m, la presión P2 (aguas abajo del grupo de bombeo) de 60 m y la presión P3 (aguas abajo del venturi) de 41 m.

La presión mínima necesaria para que se produzca la inyección de los fertilizantes disueltos debe ser mayor o igual a 3% a la presión existente en la línea principal de riego; la presión que proporcione el grupo de bombeo debe cubrir la pérdida de carga requerida para el funcionamiento del venturi más la presión necesaria para que se produzca la inyección de la disolución; en general, una presión de 25 a 30 m es suficiente para el funcionamiento de un sistema Booster (en el cual se incluyen las pérdidas de carga localizadas). Estos sistemas de fertirrigación se diseñan de acuerdo al requerimiento del sistema de riego (Figura 25).

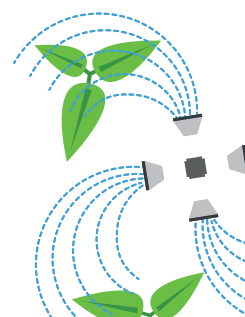
Ejemplo 11.3: Cálculo del caudal mínimo que debe impulsar una bomba para operar cuatro venturis de 1.50" (Figura 26).

En la Tabla 48, el flujo motriz de un venturi de 1.50" es de $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, al necesitarse 4 unidades, el caudal sería de $40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ más un factor de seguridad del 20%, el caudal total sería de $48 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a una carga dinámica total de 30 metros.

Figura 26. Venturis en paralelo.

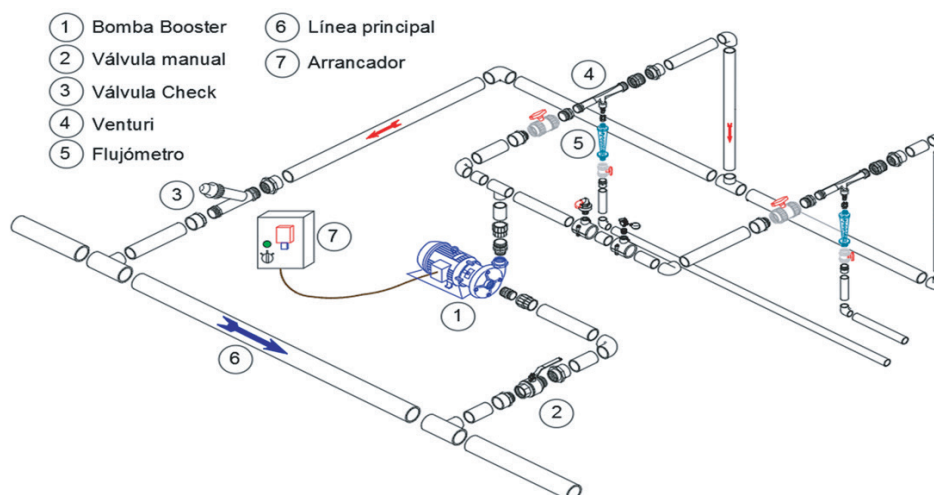


Fuente: Mazzei, 2015.



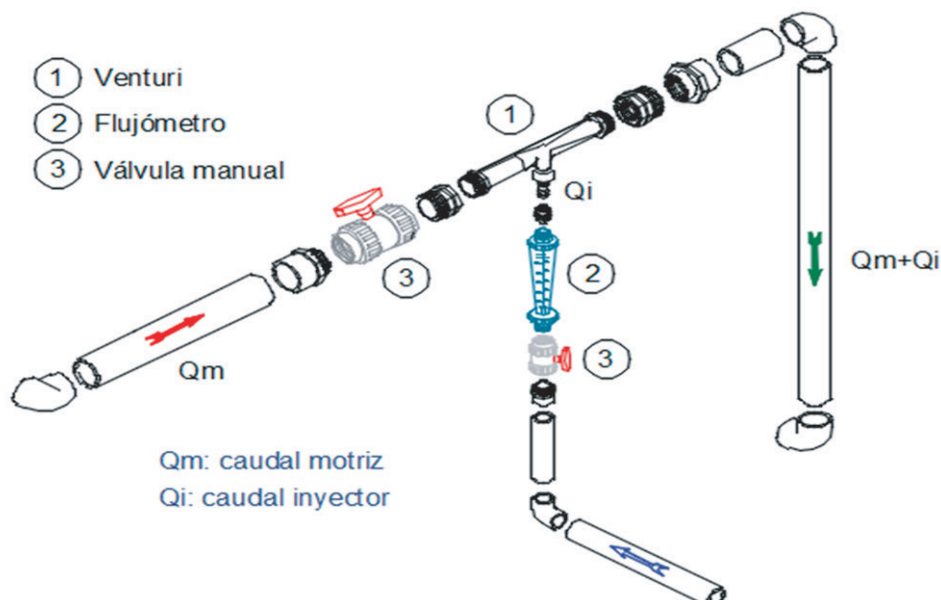
En el esquema de instalación de un Booster con 2 venturis se recomienda que la descarga del Booster se instale aguas arriba de la toma del Booster para mejorar el mezclado del agua de riego con los fertilizantes disueltos, en la descarga del Booster se debe instalar una válvula check para evitar que el agua de la línea de riego ingrese al sistema, en la succión de la bomba se instala una válvula manual con propósitos de operación y mantenimiento, aguas arriba o antes del venturi se instala una válvula manual para operación del inyector, en la succión del venturi se debe instalar un flujómetro para la medición del caudal y una válvula manual para la regulación del caudal de inyección. El sistema Booster se instala aguas abajo de la válvula volumétrica o de medición del caudal de riego (Figuras 27 y 28).

Figura 27. Esquema de la instalación de un booster con dos venturis en paralelo



Fuente: Autoría propia.

Figura 28. Esquema de instalación de un venturi.

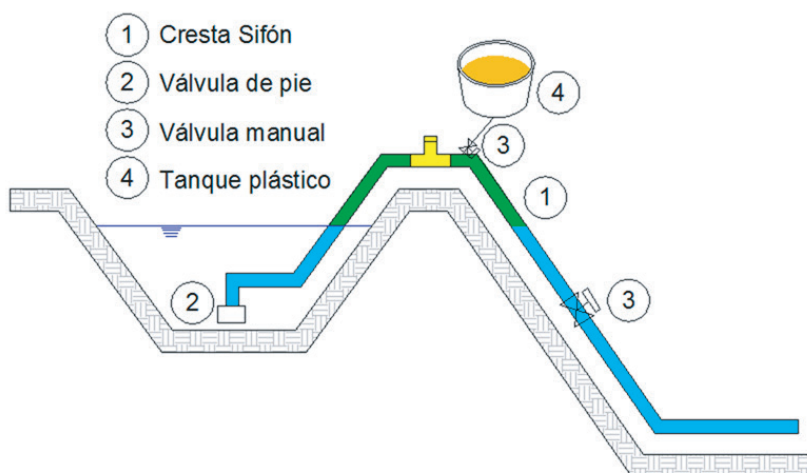


Fuente: Autoría propia.

11.5. Inyección en la cresta de un sifón

Para pequeños sistemas de riego y cuando el sistema se abastece desde un micro reservorio, la salida del agua debe realizarse a través de un sifón; durante el flujo del agua en la cresta de todo sifón se produce un vacío, el cual debe aprovecharse para inyectar los fertilizantes; el único cuidado a tener en cuenta es la instalación de válvulas herméticas para evitar el ingreso de aire en la tubería (Figura 29).

Figura 29. Inyección en la cresta de un sifón.



Fuente: Autoría propia.

Este sistema de inyección es de tipo continuo, se regula a través de un flujómetro y de una válvula manual.

11.6. Inyección en la succión de una bomba

Para pequeñas instalaciones, los fertilizantes disueltos se inyectan en la tubería de la succión de una bomba a través de monturas (collarines) y válvulas manuales plásticas, la inyección es de tipo continua y el caudal se regula a través de flujómetros (Figura 30).

Figura 30. Inyección en la succión de una bomba.



Fuente: Autoría propia.

11.7. Fertiducto

El fertiducto es un sistema de inyección de fertilizantes, para aplicar en sitios donde no existe energía eléctrica, en este sistema, los tanques para la disolución de los fertilizantes se instalan en un punto topográfico ubicado sobre la carga hidráulica de la línea de riego, por ejemplo, si la carga hidráulica en la línea de riego es de 40 metros, los tanques se instalan en la cota 60, desde los tanques, los fertilizantes se transportan hasta la caseta de riego a través de mangueras de polietileno; tiene el mismo principio de funcionamiento de un tanque elevado.

El sitio en donde se instalarán los tanques debe ser amplio para permitir el ingreso de los vehículos con los fertilizantes y el agua.

11.8. Máquinas de fertirrigación

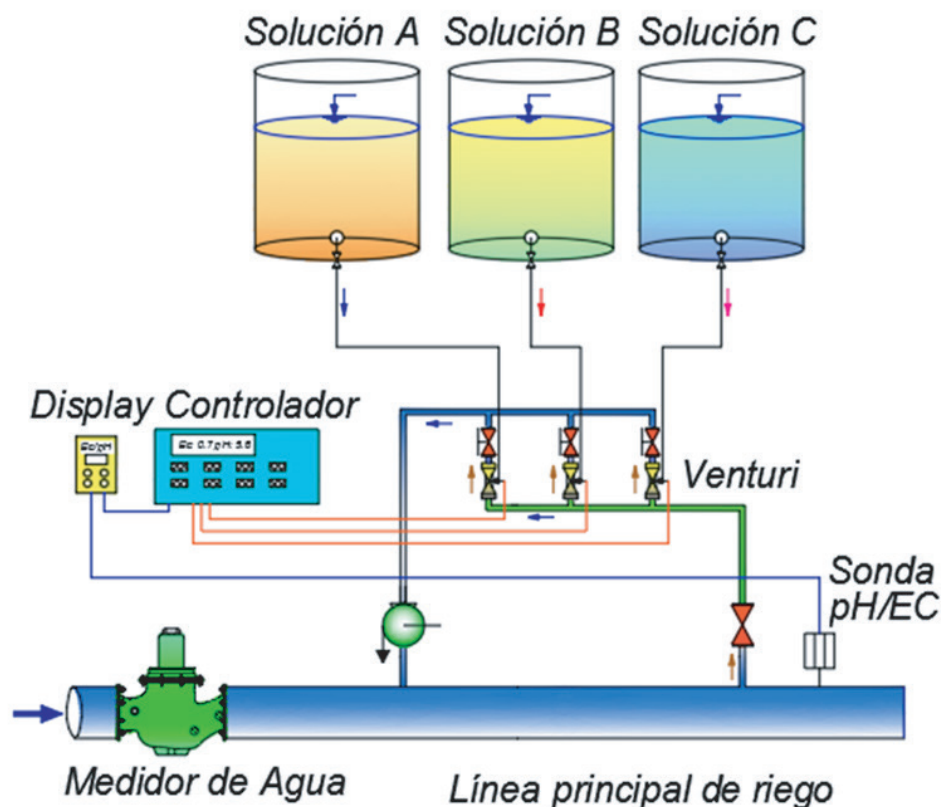
Las máquinas de fertirrigación inyectan los fertilizantes disueltos bajo el mismo esquema de un sistema Booster, adicionalmente, en su estructura tienen instalados medidores de flujo, válvulas eléctricas, controladores o computadores, sondas de pH-CE y otros dispositivos que permiten controlar el pH y CE del agua de riego en forma automatizada.

Normalmente, la concentración de los fertilizantes en la disolución que se utiliza en los métodos convencionales se debe triplicar cuando se utilice máquinas de control electrónicas.

La fertirrigación, a través del control de pH-CE, se realiza en línea o en tanques mezcladores. El control en línea es aplicable cuando los tiempos de riego son mayores a tres minutos, mientras que el tanque mezclador se utiliza cuando los tiempos de riego son muy pequeños como sucede en el riego por pulsos.

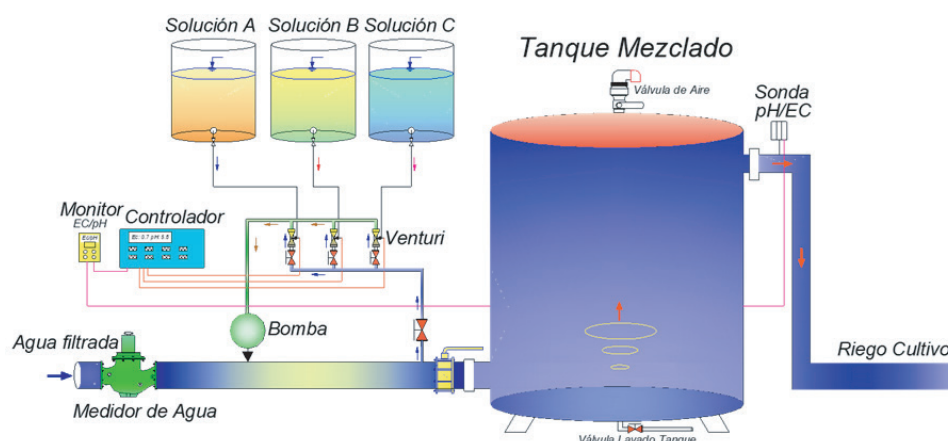
Las disoluciones A, B y C son inyectadas por un venturi independiente. Los venturis que inyectan los macro y micronutrientes trabajan simultáneamente y son los principales modificadores de la conductividad eléctrica del agua de riego, mientras que el venturi que inyecta la disolución para controlar el pH trabaja en forma independiente del ritmo de los anteriores. La medición del pH-CE del agua de riego se realiza a través de las sondas de pH-CE, sus señales son enviadas al controlador y de acuerdo con los parámetros fijados, este controla la tasa de inyección de los venturis hasta alcanzar los valores predeterminados u objetivos (Figuras 31 y 32).

Figura 31. Control de pH y CE en línea.



Fuente: Autoría propia.

Figura 32. Control de pH y CE con tanque mezclador.



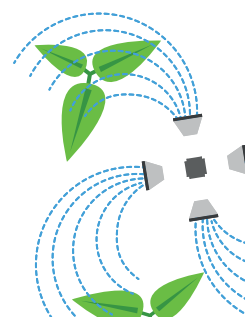
Fuente: Autoría propia.

La incorporación del tanque de mezclado permite homogenizar la mezcla del agua con los fertilizantes. La homogenización de una mezcla con varias disoluciones depende del tiempo de mezclado, de la presión del agua, de los vórtices (remolinos que se forman en un fluido en movimiento) generados por el flujo turbulento dentro del tanque y de la difusión de las sales o gradientes de concentración. Un tiempo de mezclado de cinco minutos es suficiente para producir una homogenización aceptable, asegurando una buena distribución de los fertilizantes en las válvulas cercanas y alejadas del cabezal de riego. El sistema controla la mezcla antes del inicio del riego en las parcelas o en el campo cultivado, es ideal para utilizarse en hidroponía, semi hidroponía y en cultivos irrigados con pequeños volúmenes o por pulsos, estas máquinas se diseñan de acuerdo a las necesidades de cada sistema de riego. La máquina de fertirrigación Dishunit (Booster) se presenta en la Figura 33.

Figura 33. Máquina de fertirrigación DISHUNIT.



Fotografía: Autoría propia.



A continuación, se presentan varios tipos de máquinas de fertirrigación y sistemas de inyección tipo Booster (Figura 34).

Figura 34. Máquinas de fertirrigación



A. Priva
Fuente: Priva, 2015.



B. Fertijet
Fuente: Galcon, 2015.



C. Netajet
Fuente: Netafim, 2015.



D. Xilema
Fuente: Novedades Agrícolas, 2015.



E. Booster - Fertikit
Fuente: Netafim, 2015.

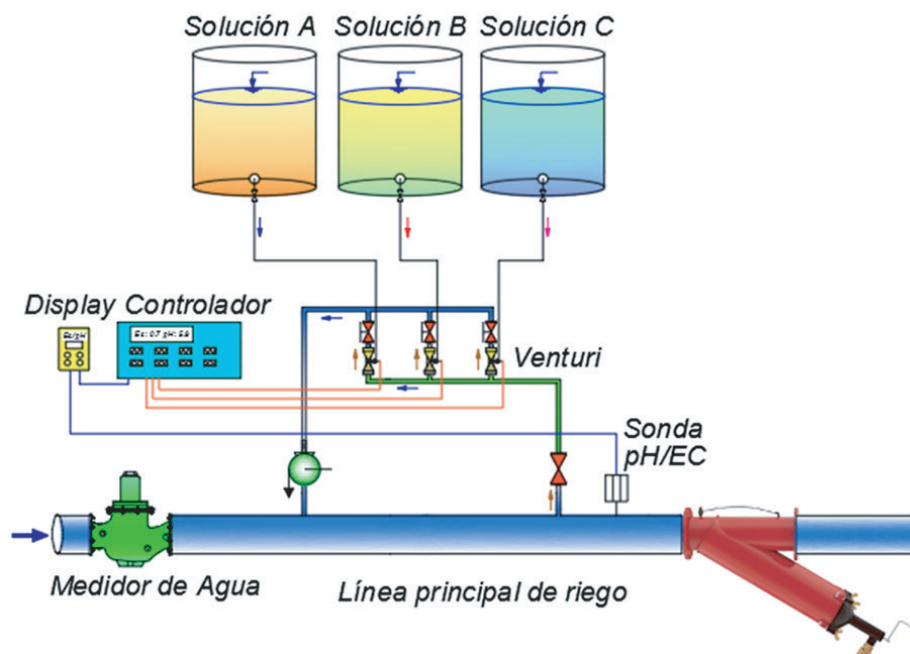


F. Booster - Nutricontrol
Fuente: Netafim, 2015.

11.9. Equipo complementario

Para uniformizar la mezcla del agua de riego con los fertilizantes disueltos, se recomienda instalar un filtro de malla aguas abajo del sistema de inyección, el flujo dentro del filtro mejorará la mezcla (Figura 35).

Figura 35. Filtro para mejorar el mezclado del agua con los fertilizantes.



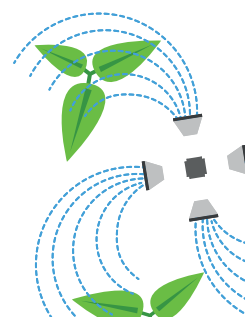
Fuente: Autoría propia.

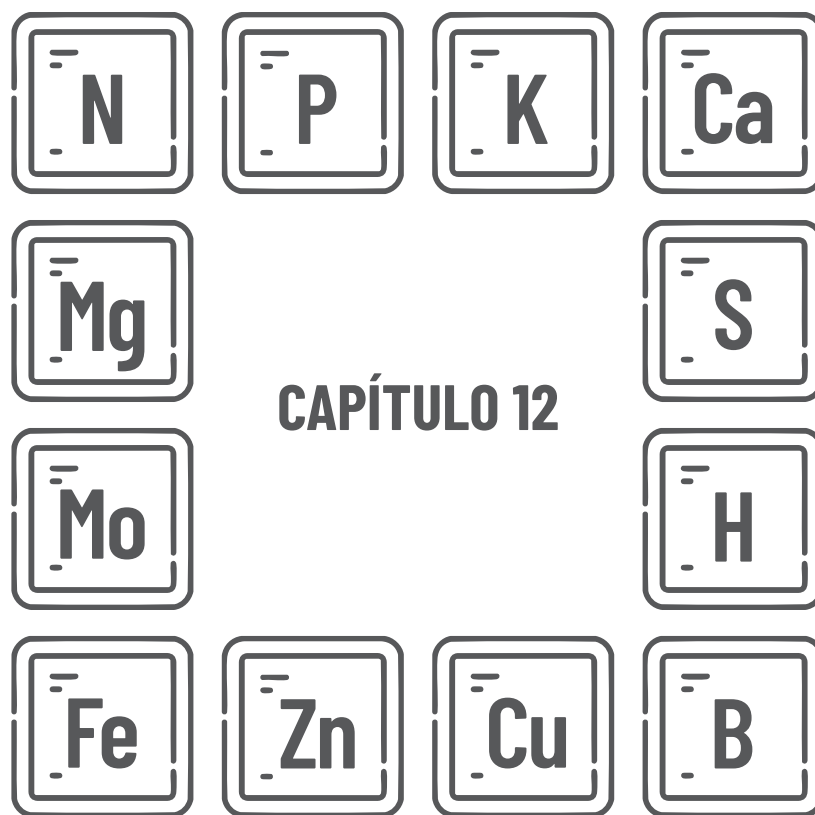
Para los sistemas hidropónicos o donde se requiera una alta uniformidad de distribución de los fertilizantes en el área cultivada, se recomienda la instalación de silos (tanques metálicos) o micro reservorios para almacenar el agua de riego con el pH regulado y los fertilizantes incorporados a través de máquinas de fertilización (Figura 36).

Figura 36. Silo o tanque de mezclado de los fertilizantes.



Fuente: Ritec, 2024.





MONITOREO DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO

Una de las formas de optimizar el proceso de fertirrigación consiste en medir continuamente la parte química de la solución del suelo, controlar la concentración y la dosificación de cada nutriente en base a los análisis foliares; la medición continua o en tiempo real de la parte química de la solución del suelo permite conocer el efecto integrado de las reacciones químicas que se producen entre el suelo, el agua de riego, el cultivo y los fertilizantes aplicados a través de la fertirrigación, por otra parte, el monitoreo continuo de la parte química de la solución del suelo permite conocer la variación en el tiempo de la concentración de los nutrientes durante la etapa fenológica del cultivo y corregir cualquier deficiencia.

Los parámetros principales que se miden en la solución del suelo son pH, CE, nitratos, fósforo, potasio y micronutrientes.

El pH sirve para conocer la disponibilidad de los nutrientes para el cultivo y determinar las actividades a realizar para mantener el pH en el rango 5.50 y 6.50.

El monitoreo de la CE de la solución del suelo sirve para conocer la salinidad o cantidad de sales (nutrientes) presentes y determinar si el proceso de fertirrigación se debe iniciar o detener, los valores de CE de la solución del suelo que no afectan al desarrollo y producción en la mayoría de los cultivos varían de 0.30 - 0.40 dS m⁻¹ mayor que la CE del agua de riego, por ejemplo, si la CE del agua de riego es de 0.30 dS m⁻¹, la máxima CE del agua de riego con los fertilizantes disueltos debería ser de 0.70 dS m⁻¹.

La medición de los nitratos en la solución del suelo sirve para conocer la cantidad de nutrientes disponibles para el cultivo y para conocer cuándo y en qué cantidad se deben aplicar los nutrientes. El nitrógeno es el primer nutriente de la relación N-P-K y los macronutrientes se distribuyen en base a esta relación, además, debido a su alta movilidad en el perfil del suelo y a la alta tasa de absorción por los cultivos, es necesario e ideal controlar la fertilización a través de la medición de los nitratos en la solución del suelo.

El rango ideal de los nitratos en la solución del suelo varía entre 25.00 y 100.00 ppm, en este rango los cultivos se desarrollan en su máximo potencial y se alcanza la máxima producción de los cultivos. La fertirrigación se inicia cuando la concentración de los nitratos en la solución del suelo es de 25.00 ppm y finaliza cuando esta concentración alcanza las 100.00 ppm, luego, la fertilización se detiene hasta que la concentración descienda de 100.00 a 25.00 ppm y se vuelve a repetir el ciclo (Ortiz, 2008).

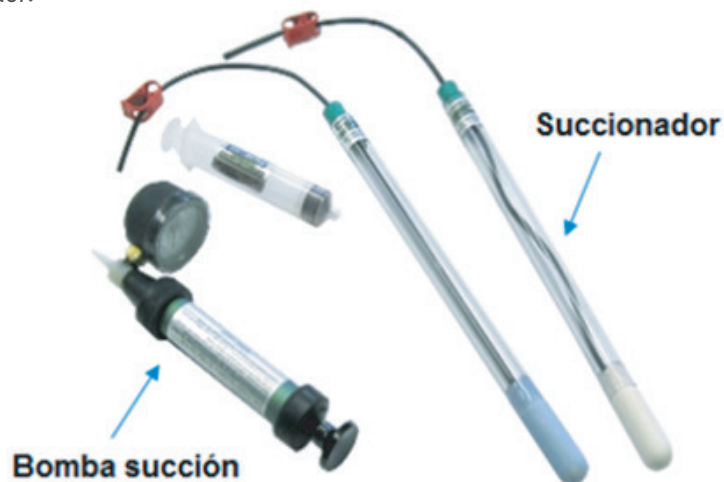


12.1. Equipo de medición manual

Succionador

Para la medición de las variables químicas de la solución del suelo, se utiliza un succionador (un succionador simula a la naturaleza de una raíz, cuyo vacío interior es de 80 centibares), el cual se introduce en el suelo hasta una profundidad máxima de 25 centímetros, la solución del suelo ingresa a este succionador (por el vacío creado) y desde este dispositivo, se extrae una muestra para realizar la medición del pH, CE, nitratos, fósforo, potasio y otros elementos (Figura 37).

Figura 37. Succionador.



Fuente: Irrrometer, 2015.

Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es directamente proporcional a la concentración de los sólidos disueltos presentes en la solución (TDS), valores altos de CE significa alta concentración de sales en la solución (Figura 38).

Figura 38. Materiales y equipos para el monitoreo manual.



Fuente: Hanna, 2016.

Hanna (2016), recomienda considerar las siguientes relaciones para la medición de la CE.

Para agua de riego:

$$\text{ppm} = 2 \times \text{CE} \quad (42)$$

En la Ecuación 42, ppm es la concentración total de las sales disueltas (TDS, mg L^{-1}); CE, la conductividad eléctrica del agua de riego (uS cm^{-1}).

Para la solución del suelo:

$$\text{ppm} = 1.40 \times \text{CEs} \quad (43)$$

En la Ecuación 43, CEs es la conductividad eléctrica de la solución del suelo (uS cm^{-1}).

Los dispositivos para la medición de la conductividad eléctrica pueden ser amperométricos o potenciométricos, los primeros se utilizan para medir bajas concentraciones (agua de riego o solución del suelo) y los segundos para altas concentraciones (laboratorios químicos o preparación de disoluciones); los medidores portátiles o amperométricos se basan en la ley del Ohm y se utilizan para medir una diferencia de potencial conocida como Voltio (V) a dos electrodos y miden la corriente (I) que pasa a través de ellos; el medidor potenciométrico se basa en el método de inducción y se utiliza para medir hasta concentraciones de 200 g L^{-1} ó $200\,000 \text{ uS cm}^{-1}$ (200 dS m^{-1}); el medidor potenciométrico es más estable y preciso que el amperométrico (Hanna, 2016).

En fertirrigación, para sistemas de inyección manuales es suficiente el medidor amperométrico y para sistemas electrónicos con control de pH y CE es mejor el medidor potenciométrico (Hanna, 2016).

Cualquier tipo de medidor requiere de calibración previa a la obtención de las lecturas; en el mercado existen disoluciones preparadas para la calibración de estos medidores.

Potencial hidrógeno (pH)

Un medidor de pH mide la concentración de iones H^+ presentes en la solución (mg L^{-1} , ppm); se basa en el método de medición potenciométrico, el cual mide la diferencia de potencial (V) existente entre dos electrodos; la lectura viene dada en unidades de pH (Hanna, 2016).

Este medidor necesita ser calibrado previo a la obtención de las lecturas, en el mercado existen dos tipos de disoluciones preparadas para la calibración de estos medidores, una para pH 7.00 y otra para pH 4.00. Para medir el pH también se puede utilizar tiras de tornasol o barras de pH, estas barras contienen un ácido (de color rojo) o una base (de color azul), cuando la solución es de pH ácido las barras de color azul se tornan rojas, cuando la solución es alcalina las barras de color rojo se tornan de color azul, son muy económicas y muy útiles, generalmente, la barra se introduce en la solución por un tiempo de 3 a 5 segundos y se compara el color de la barra con el color de referencia, obteniendo de esta manera el valor de pH.

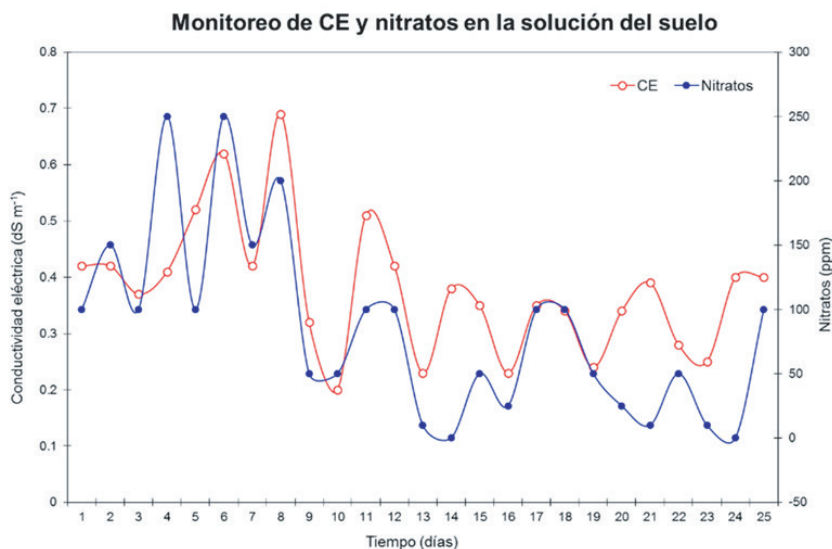
Nitratos, fósforo y potasio

Para medir el contenido de nitratos, fósforo o potasio (ppm, mg L^{-1}) se puede utilizar medidores digitales o barras de test, los medidores digitales son un poco costosos y demandan de ciertos procedimientos químicos para su medición, las barras de test son más fáciles de usar, muy económicas y se pueden encontrar en los mercados locales.

12.2. Monitoreo manual

La medición manual del pH, CE, nitratos y otros elementos en la solución del suelo, se realizan utilizando kits (barras de test) y/o medidores portátiles (Hanna, 2016). Las mediciones se realizan en forma mínima de dos a tres veces a la semana, los datos se almacenan en un formato preparado para el efecto, de tal manera que permitan visualizar la variación de cada uno de los parámetros en forma permanente (Figura 39).

Figura 39. Monitoreo manual de CE y nitratos.



Fuente: Autoría propia.

12.3. Monitoreo en tiempo real

En el mercado existen controladores que permiten medir la temperatura, pH y CE (Figura 40), en tiempo real con intervalos de tiempo de hasta dos minutos, estos controladores tienen la opción de conectarse a un computador y revisar la información en tiempo real, las sondas se instalan en el sistema de riego (Hanna, 2016).

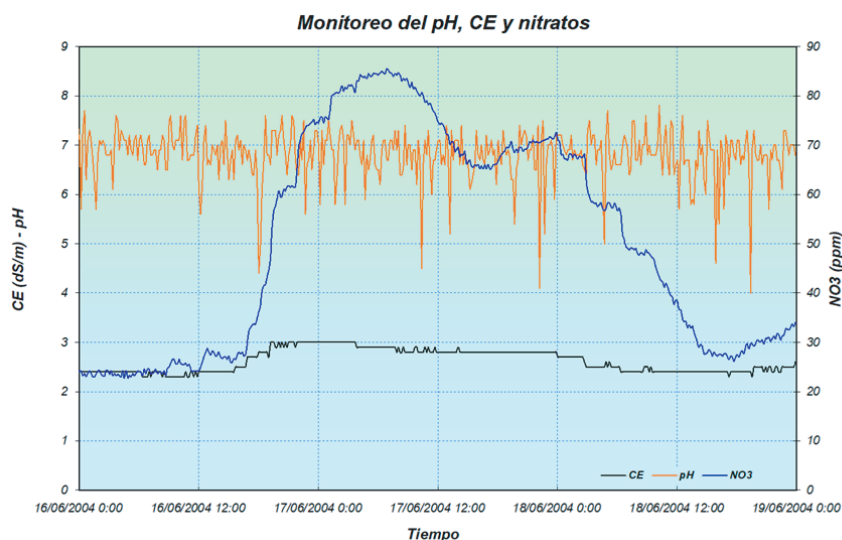
Figura 40. Equipo para monitoreo en tiempo real.



Fuente: Hanna, 2016.

Este tipo de monitoreo es ideal cuando se trabaja con sistemas de riego por pulsos, en el cual el manejo de la parte física y química de la solución del suelo (relación oxígeno - agua) es de vital importancia (Figura 41).

Figura 41. Monitoreo en tiempo real de pH, CE y nitratos.

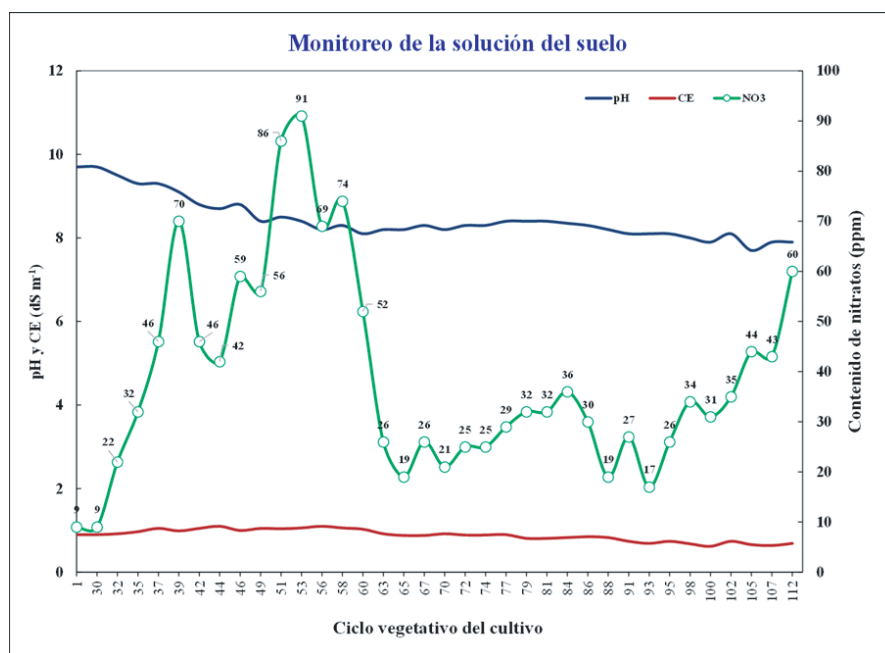


Fuente: Autoría propia.

La agricultura de precisión demanda de una fertilización basada en el requerimiento real del cultivo, para conocer esta demanda se requiere de equipos automatizados que permitan monitorear la parte química de la solución del suelo y del agua de riego, así como, aplicar los fertilizantes en función de este monitoreo.

La acumulación del contenido de nitratos en el suelo desde la siembra hasta el día 53, a partir de esta fecha, el descenso del contenido de nitratos está relacionado con el crecimiento del cultivo; desde el día 53 hasta el día 93, el cultivo aún continuó absorbiendo los nutrientes aportados (formación y llenado de frutos) y a partir del día 93 se produce una acumulación de los nutrientes aplicados vía fertirriego (Figura 42).

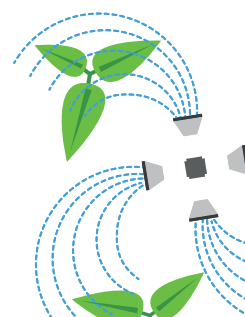
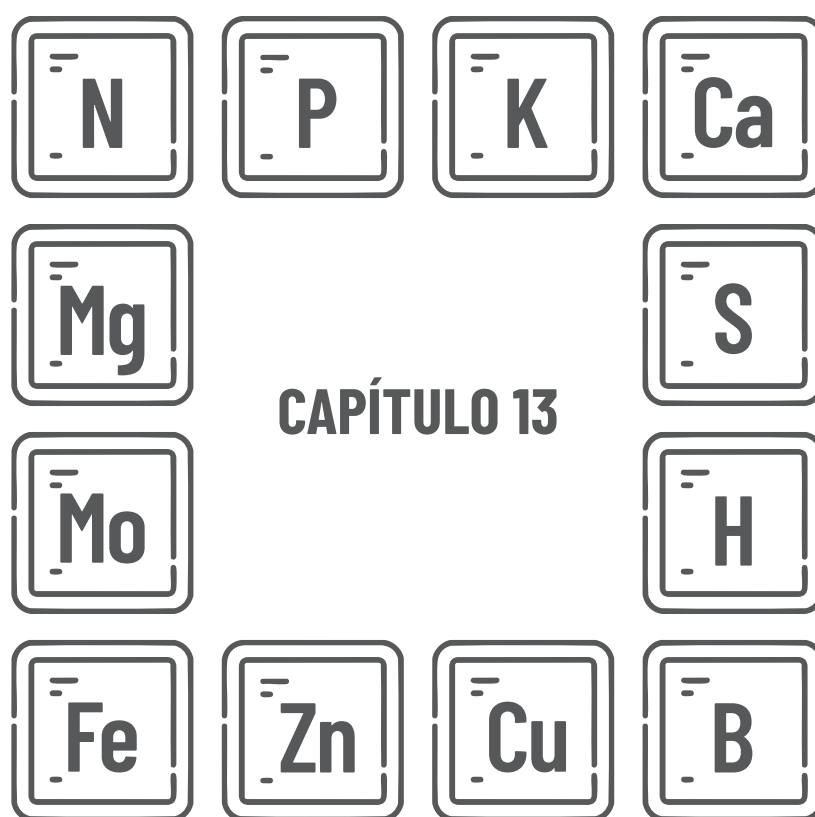
Figura 42. Monitoreo manual de pH, CE y nitratos.



Fuente: Autoría propia.

Este monitoreo de la solución del suelo permitió determinar que el 100% del nitrógeno debe aplicarse hasta el día 53 (aproximadamente 8 semanas); el fósforo, en los primeros 27 días (4 semanas); y el potasio, desde la fecha de siembra hasta el día 60 del ciclo del cultivo (9 semanas). Por otro lado, el monitoreo permitió determinar que la fertilización aplicada fue absorbida por el cultivo y que no se presentó un exceso en la misma (reflejado en la variación del contenido de nitratos y de la conductividad eléctrica), así como, la disminución del pH de 9.90 a 8.10 como resultado de la inyección de ácidos para disminuir el pH.





OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

La unidad de fertirrigación está compuesta por un conjunto de dispositivos que permiten inyectar los fertilizantes disueltos en la tubería principal del agua de riego.

El caudal de inyección de cualquier inyector está en función de la presión existente en la línea de riego (especialmente en las bombas hidráulicas TMB, ITC, Amiad y Dosatron).

Las variaciones de presión en la línea de riego se pueden producir por mal funcionamiento de la unidad de bombeo, pérdida de carga en la unidad de filtrado, rotura de tuberías y consumo excesivo (abertura de un número excesivo de válvulas en el campo).

Las labores de mantenimiento están enfocadas en limpiar, engrasar, regular y cambiar los dispositivos móviles de los inyectores (Amiad, 2015).

Las labores de limpieza se realizan especialmente en los filtros de anillas o mallas que se encuentran instalados en la descarga de los inyectores y en la salida de los tanques de fertilizantes disueltos. Los filtros cumplen la función de retener las sales y los precipitados que no se han disuelto y decantado durante la disolución de los fertilizantes, cuando los filtros se encuentran saturados con impurezas se reducen los caudales de paso, situación que afecta a la concentración de los nutrientes en el agua de riego. La revisión y lavado de los filtros de anillas o mallas se realizan diariamente antes o después de terminar una jornada de riego.

El engrasado y cambio de piezas móviles desgastadas está destinado a mantener, mejorar y ajustar el desplazamiento de pistones y empaques que cumplen la función de almacenar la disolución en su cámara para luego inyectarlos en la línea de riego, durante este proceso las sales (precipitados) que no se han disuelto destruyen (por fricción) las paredes de dichas cámaras debido al movimiento del pistón. El engrasado de las piezas móviles se debe realizar cada tres o cuatro meses.

Las conexiones hidráulicas que existen entre los tanques de fertilizantes y los inyectores, las conexiones eléctricas y el funcionamiento de los mezcladores o agitadores deben revisarse mensualmente.

El aforo del caudal de inyección se realiza semanalmente para ajustar y regular las válvulas que controlan la tasa de inyección, puesto que el peso específico de la disolución en cada tanque es diferente, por lo tanto, este control y operación permite igualar el descenso del nivel de las disoluciones en los tanques, de esta forma proporcionar al cultivo la cantidad de nutrientes planificados de acuerdo con el estado fenológico del cultivo.

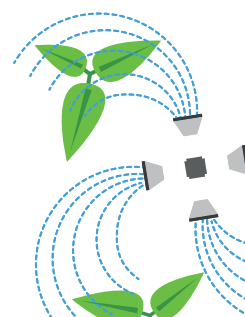
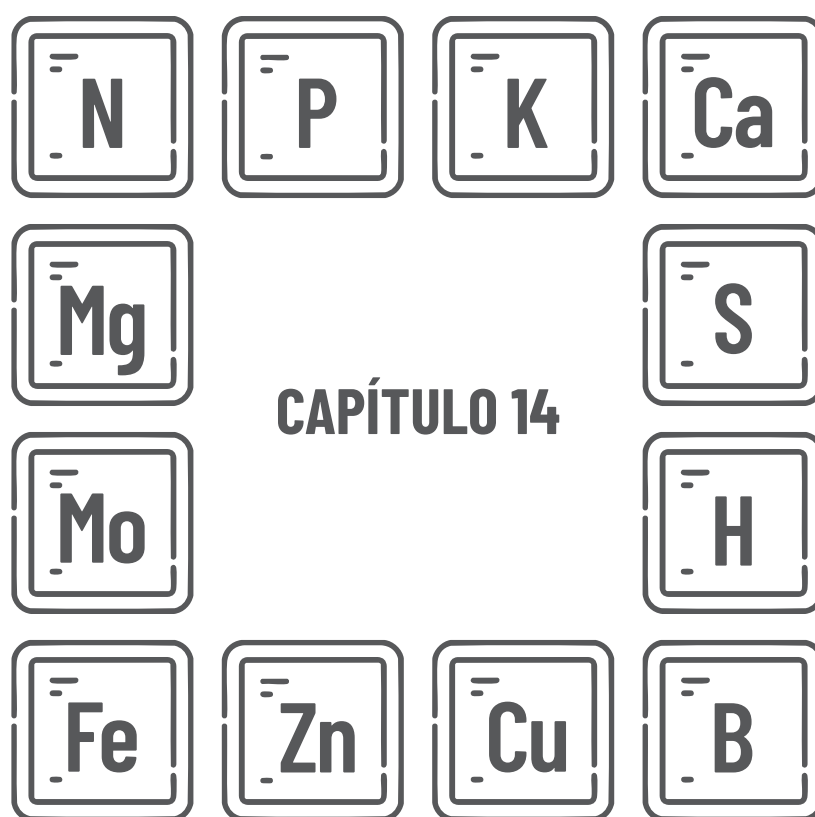
El cálculo de los fertilizantes se realiza en función del caudal de inyección y de riego, el mismo que se puede medir a través de los medidores de fertilizantes y de las válvulas volumétricas (medidores de agua), respectivamente.

Cuando los caudales de las válvulas de riego no son uniformes, la relación de inyección cambia en función de la válvula abierta, situación que afecta a la dosificación y distribución de los nutrientes (especialmente en sistemas manuales). Al ser el caudal de los inyectores constante y el caudal de riego variable, la distribución de los fertilizantes en el cultivo no es uniforme, siendo la concentración mayor de los fertilizantes en las áreas de riego con caudales pequeños, y menor en las áreas de riego con caudales mayores. Para corregir este problema se recomienda la preparación de la disolución del agua de riego con fertilizantes en micro reservorios o silos (tanques metálicos). En sistemas automatizados, este problema no existe debido a que es posible programar el volumen de riego y la cantidad de los fertilizantes a inyectar en cada válvula de riego.

En la disolución de los fertilizantes se debe considerar la compatibilidad entre los diferentes fertilizantes para que no se produzca la formación de precipitados.

No debe olvidarse la norma de inyección de los fertilizantes: V_i , volumen inicial para el lavado de los laterales de riego; V_r , volumen de riego más los fertilizantes disueltos; y V_f , volumen final para el lavado de los laterales de riego. Este método de inyección permite evitar la acumulación de sales en los laterales de riego, goteros y distribuir los fertilizantes en la parte media del perfil humedecido (Keller & Bliesner, 1990).





EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA FERTIRRIGACIÓN

14.1. Información de base

Los datos requeridos para determinar el peso de los fertilizantes a inyectar a través del equipo de fertirrigación son:

- Requerimientos nutricionales e hídricos del cultivo.
- Información del análisis químico de aguas.
- Características técnicas del equipo de riego.

Este ejemplo se desarrollará siguiendo procedimientos de cálculo convencionales y al final se abordará el sistema de manejo de la técnica más avanzada de fertirrigación.

Los cálculos convencionales se basan en los análisis químicos de suelos, aguas y de acuerdo con el tipo de cultivo, siendo los laboratorios de suelos los que generalmente realizan este tipo de recomendaciones (Anexos del 1 al 7).

Para el desarrollo del ejemplo se tomará el cultivo de pimiento en un suelo arenoso (sustrato).

Según la Tabla 24, la fase inicial y de desarrollo del cultivo de pimiento suman un total de 65 días (aproximadamente 9.20 semanas) y la fertilización se realizará durante las primeras 8 semanas del cultivo (una semana menos de la calculada), los siete días de la semana (Tablas 49, 50 y 51).

Tabla 49. Nutrientes requeridos por el cultivo de pimiento.

Rendimiento t ha ⁻¹)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
	(kg t ⁻¹)					
22.50	6.80	2.60	10.80	-	2.10	-

Fuente: Autoría propia.

Tabla 50. Análisis químico del agua de riego.

pH	CE (dS m ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	S
					(ppm)		
7.96	0.24	0.80	0.78	6.11	21.20	11.26	24.47

Fuente: Autoría propia.



Tabla 51. Evapotranspiración real del cultivo de pimienta.

Fertilizante	Mayo	Junio	Julio	Agosto
ETr (mm día ⁻¹)	1.81	2.56	3.73	3.98
Días	31.00	30.00	31.00	31.00
ETr (mm mes ⁻¹)	56.11	76.80	115.63	123.38
V (m ³)	561.10	768.00	1 156.30	1 233.80
VT (m ³)	590.63	808.42	1 217.16	1 298.74

Fuente: Autoría propia.

Las características del equipo de riego son:

Ciclo del cultivo:	120 días
Espaciamento entre laterales de riego (Sl):	0.80 m
Espaciamento entre emisores (Se):	0.20 m
Caudal del emisor (qe):	1.00 L h ⁻¹
Número de laterales por hilera de cultivo (NI):	1.00
Frecuencia de riego (Fr):	diaria
Área de riego por válvula (A):	5 000 m ²
Superficie total (S):	2.00 ha
Número de válvulas:	4
Relación de dilución:	5 L m ⁻³
Tiempo de duración de la mezcla (T):	6 días
Días de fertirriego por semana:	6 días
Eficiencia de aplicación del riego (Efa):	95%
Inyector de fertilizantes:	venturi

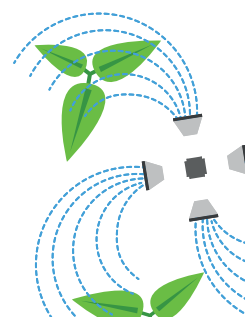
14.2. Conversión de las unidades de los análisis químicos de aguas

Para el cálculo de los nutrientes aportados por el agua de riego, se consideró el volumen de agua a aplicarse en los dos primeros meses (mayo y junio), dando un total de 1 399.05 m³ (Tabla 52).

Tabla 52. Conversión de unidades del análisis de aguas.

Nutriente	Conversión	Ecuación	Nutriente (kg ha ⁻¹)
Nitrógeno			$0.8 \times 1\,399.05 / 1\,000.00 = 1.12$
Fósforo			$0.78 \times 1\,399.05 / 1\,000.00 = 1.10$
Potasio	ppm	$\frac{\text{ppm} \times v}{1\,000}$	$6.11 \times 1\,399.05 / 1\,000.00 = 8.55$
Calcio	kg ha ⁻¹		$21.20 \times 1\,399.05 / 1\,000.00 = 29.66$
Magnesio			$11.26 \times 1\,399.05 / 1\,000.00 = 15.75$
Azufre			$24.47 \times 1\,399.05 / 1\,000.00 = 34.23$

Fuente: Autoría propia.



14.3. Dosis de nutrientes

Cuando se considera el análisis químico del suelo, la dosis de fertilizantes recomendada incluye las cantidades de fertilizantes existentes en el suelo, de tal forma que, no se deben restar de las dosis de recomendación (Tabla 53).

Tabla 53. Dosis de nutrientes para aplicar en la fertirrigación.

Variables	N	P	K	Ca	Mg	S
	(kg ha ⁻¹)					
Agua	1.12	1.10	8.55	29.66	15.75	34.23
Cultivo	153.00	25.51	201.69	-	47.25	-
Diferencia	151.88	24.41	193.14	0.00	31.50	0.00

Fuente: Autoría propia.

Según el estudio de aguas y la necesidad nutricional del cultivo, se requiere aplicar por hectárea 151.88 kg de nitrógeno; 24.41 kg de fósforo; 193.14 kg de potasio y 31.50 kg de magnesio.

La aplicación semanal de los nutrientes por hectárea sería de 18.98 kg de nitrógeno (151.88/8); 3.05 kg de fósforo; 24.14 kg de potasio y 3.94 kg de magnesio, y para las dos hectáreas serían de 37.96 kg de nitrógeno, 6.1 kg de fósforo, 48.28 kg de potasio y 7.88 kg de magnesio.

14.4. Variables del riego

Intensidad de precipitación. Este parámetro es necesario para calcular el caudal de riego en la parcela o bloque de riego y el tiempo de riego para cubrir las necesidades hídricas del cultivo, se determina considerando la distancia entre emisores y entre laterales de riego.

$$I_p = \frac{q_e \times NL}{Se \times SI} \quad (44)$$

$$I_p = \frac{1.00 \times 1.00}{0.20 \times 0.80} = 6.25 \text{ mm h}^{-1}$$

En la Ecuación 44, I_p es la intensidad de la precipitación (mm h^{-1}); q_e es el caudal del emisor (L h^{-1}); NL , el número de laterales de riego por hilera de cultivo; Se , la separación entre emisores (m); SI , la separación entre laterales de riego (m). El valor obtenido de la ecuación significa que el sistema de riego proporcionará una precipitación de 6.25 mm h^{-1} o 6.25 L m^{-2} .

Caudal de riego. El caudal de riego se utiliza para determinar el caudal del inyector de fertilizantes y la relación de inyección.

$$Q_r = \frac{I_p \times A}{1000} \quad (45)$$

$$Q_r = \frac{6.25 \times 5000}{1000} = 31.25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$



En la Ecuación 45, Q_r es el caudal que se requiere para una determinada área ($m^3 h^{-1}$); I_p , la pluviometría de los emisores ($mm h^{-1}$); A , el área que cubre una parcela de riego o válvula (m^2); se requiere $31.25 m^3 h^{-1}$ ($8.7 l s^{-1}$) para cubrir el área de riego de $5\,000 m^2$ con laterales de riego que proporcionan una pluviometría de $6.25 mm h^{-1}$.

Tiempo de riego. Este valor es necesario para la programación del riego y la inyección de los fertilizantes. El tiempo crítico se presenta en el primer mes, debido a la mínima evapotranspiración a reponer, para el resto de los meses el tiempo de riego es mayor.

$$ETra = ETr \times \frac{Fr}{Far} \quad (46a)$$

$$ETra = 1.80 \times 7 = 2.10 mm día^{-1}$$

$$Tr = \frac{ETra}{Efa \times I_p} \quad (46b)$$

$$Tr = \frac{2.10}{0.95 \times 6.25} \times \frac{1}{1} = 0.35 h$$

En las Ecuaciones 46 a y b, Tr es el tiempo de riego (minutos); ETr , la evapotranspiración real del cultivo ($mm día^{-1}$); $ETra$, la evapotranspiración real ajustada ($mm día^{-1}$); Fr , la frecuencia de riego (días); Far , es la frecuencia de riego a aplicar (días); Efa , la eficiencia de aplicación del método de riego (decimal).

Este valor indica que para cubrir un requerimiento hídrico diario de $2.10 mm$, se requiere abrir la válvula que controla el riego dentro de una unidad durante un tiempo de 21 minutos; el tiempo total de riego para cubrir las 2 hectáreas es de 1.40 horas (0.35×4).

El tiempo disponible para la inyección de los fertilizantes es de 15 minutos, considerando un tiempo de un minuto para el llenado del sistema y de cinco minutos para el lavado de los laterales de riego, siendo el tiempo total diario para la inyección de los fertilizantes de las 4 válvulas de 1.00 hora.

Para el segundo mes, el tiempo de riego es de 0.50 horas (30.00 minutos) y se fija el tiempo de inyección en 15 minutos, siendo el tiempo para el llenado y lavado de los laterales de 15.00 minutos.

Caudal del inyector de fertilizantes. El caudal del inyector de fertilizantes se utiliza para los cálculos de la relación de inyección y el peso de los fertilizantes.

$$q_i = \frac{V_f}{V_a} \times Q_{riego} \times Dr = \frac{4}{1} \times 31.25 \times 1.20 = 150.00 L h^{-1}$$

El caudal del inyector debe ser de $150.00 L h^{-1}$; se asume que se abrirá una válvula a la vez.

Se utilizará el inyector venturi, (Tabla 47), el caudal del venturi de 1" proporciona un caudal de $280 L h^{-1}$, mayor al caudal de $150 L h^{-1}$, para regular el caudal de inyección a $150 L h^{-1}$, en la succión del venturi se debe instalar un flujómetro (medidor de caudal) y una válvula manual para la regulación.

Si el tiempo para la inyección de los fertilizantes es de 1.00 hora y el caudal de inyección de $150 L h^{-1}$, el volumen de disolución a inyectarse en forma diaria es de 150 litros y el volumen total para los 6 días de 900 litros; siendo el tanque de 1 000 litros el volumen más cercano.

Para el ácido, es suficiente un venturi de ½" con un caudal de inyección de 30 L h⁻¹, el volumen de la disolución a inyectarse en forma diaria de 36 litros, el volumen total de 216 litros y, el tanque con el volumen más aproximado es el de 250 litros.

Relación de inyección. Este parámetro sirve para calcular la relación real que existe entre el volumen de agua de riego y el volumen de fertilizantes disueltos que se inyectan simultáneamente en la red de riego.

$$RI = \frac{1\,000 \times Q \text{ riego}}{q \text{ inyector}} = \frac{1\,000 \times 31.25}{150.0} = 208.33$$

Para el caudal de riego de 31.25 m³ h⁻¹ y para el caudal del inyector de 150 L h⁻¹, la relación de inyección es de 208.33, esto significa que, por cada 208.33 litros de agua que fluye por el sistema, la unidad de fertirrigación inyectará un litro de disolución. Esto significa que el contenido de cualquier nutriente en la solución madre se diluirá 208.33 veces cuando ésta se inyecte en la línea de riego.

Para incrementar o reducir la relación de inyección, el caudal del inyector debe ajustarse a través de las válvulas instaladas en la succión del venturi.

Para la inyección del ácido, la relación de inyección sería de 1 041.70 (31 250/30).

14.5. Peso de los fertilizantes

El cálculo del peso de los fertilizantes se inicia con el nutriente de menor cantidad (se utiliza la información de la Tabla 35).

Fósforo. El peso del fosfato mono potásico a disolverse en el tanque es de:

$$\text{Fosfato mono potásico} = \frac{P}{IA \times P} = \frac{6.1}{0.2276 \times 0.98} = 27.35 \text{ kg}$$

$$K = \text{Fosfato mono potásico} \times 0.2874 \times P = 27.35 \times 0.2874 \times 0.98 = 7.70 \text{ kg}$$

El peso del fosfato mono potásico es de 27.35 kg, proporciona 6.10 kg de fósforo y 7.70 kg de potasio.

Potasio. El peso del potasio que falta por adicionarse 40.58 kg (48.28 – 7.70); como fuente se considerará el nitrato de potasio.

$$\text{Nitrato de potasio} = \frac{K}{IA \times P} = \frac{40.58}{0.3867 \times 0.95} = 110.46 \text{ kg}$$

$$K = \text{Nitrato de potasio} \times 0.1386 \times P = 110.46 \times 0.1386 \times 0.95 = 14.54 \text{ kg}$$

El peso de 110.46 kg de nitrato de potasio proporcionan 40.58 kg de potasio y 14.54 kg de nitrógeno.

Nitrógeno. El aporte del nitrógeno por el nitrato de potasio es de 14.54 kg, faltando adicionar 23.42 kg para completar la dosis recomendada.

$$\text{Nitrato de amonio} = \frac{N}{IA \times P} = \frac{23.42}{0.335 \times 0.98} = 71.34 \text{ kg}$$

La cantidad de nitrato de amonio a aplicarse es de 71.34 kg.

Magnesio. El peso del sulfato de magnesio a disolverse en el tanque es de:

$$\text{Sulfato de magnesio} = \frac{\text{Mg}}{\text{IA} \times \text{P}} = \frac{7.88}{0.0986 \times 0.98} = 81.55 \text{ kg}$$

$$\text{S} = 81.55 \times 0.1301 \times 0.98 = 10.40 \text{ kg}$$

La aplicación semanal de los nutrientes sería: 37.96 kg de nitrógeno; 6.10 kg de fósforo; 48.28 kg de potasio, 7.88 kg de magnesio y 10.40 kg de azufre (Tabla 54). Es de recordar que este peso se distribuirá en las dos hectáreas durante los 6 días de la semana.

Tabla 54. Cantidad de fertilizante a aplicarse a través de la fertirrigación.

Fertilizante	Peso (kg)	N-NO ₃ ⁻	P-H ₂ PO ₄ ⁻	S-SO ₄ ⁼	N-NH ₄ ⁺	K	Mg
Fosfato mono potásico	27.35		6.10			7.70	
Nitrato de potasio	110.46	14.54				40.58	
Nitrato de amonio	71.34	11.71			11.71		
Sulfato de Magnesio	81.55			10.40			7.88
Total	290.70	26.25	6.10			48.28	7.88

Fuente: Autoría propia.

14.6. Concentración de nutrientes en el tanque y a la salida de los goteros

$$\text{CT} = \frac{\text{PF} \times \text{Ft} \times 106}{\text{V}} \quad (47)$$

$$\text{CG} = \frac{\text{CT}}{\text{RI}} \quad (48)$$

$$\text{CI} = \frac{\text{CG}}{\text{eq}} \quad (49)$$

En las ecuaciones anteriores, CT es la concentración del ion en el tanque de disolución del fertilizante (mg L⁻¹); Ft, factor de transformación (Tabla 8); V, volumen de agua en el cual se disolverá el fertilizante (litros); CG, concentración del ion a la salida del gotero (mg L⁻¹); RI, relación de inyección; CI, es la concentración del ion (meq L⁻¹); eq, miliequivalente químico (mg).

El peso de 110.46 kg de nitrato de potasio proporcionará a la salida del gotero una concentración de nitrógeno de 343.32 ppm y potasio de 216.46 ppm; la concentración del nitrógeno a la salida del gotero es de 5.54 meq L⁻¹ y del potasio de 5.54 meq L⁻¹, cada fertilizante proporciona aniones y cationes en una concentración equilibrada (Tabla 55).

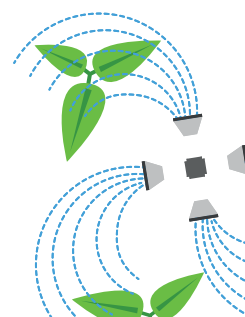


Tabla 55. Concentración de los iones nutrientes en la salida del gotero.

Fertilizante	Ion	CT (mg L ⁻¹)	CG (mg L ⁻¹)	CI (meq L ⁻¹)
Fosfato mono potásico	H ₂ PO ₄ ⁻	$\frac{6.10 \times 3.1316 \times 10^6}{900} = 21\,225.29$	$\frac{21\,225.29}{208.30} = 101.90$	$\frac{101.90}{96.99} = 1.05$
	K ⁺	$\frac{7.70 \times 1 \times 10^6}{900} = 8\,555.56$	$\frac{855.56}{208.30} = 41.07$	$\frac{41.07}{39.10} = 1.05$
Nitrato de potasio	NO ₃ ⁻	$\frac{14.5 \times 4.4266 \times 10^6}{900} = 71\,514.18$	$\frac{71\,514.18}{208.30} = 343.32$	$\frac{343.32}{62.00} = 5.54$
	K ⁺	$\frac{40.58 \times 1 \times 10^6}{900} = 45\,088.89$	$\frac{45\,088.89}{208.30} = 216.46$	$\frac{216.46}{39.10} = 5.54$
Nitrato de amonio	NO ₃ ⁻	$\frac{11.71 \times 4.4266 \times 10^6}{900} = 57\,594.98$	$\frac{57\,594.98}{208.30} = 276.50$	$\frac{276.50}{62.00} = 4.46$
	NH ₄ ⁺	$\frac{11.71 \times 1.2878 \times 10^6}{900} = 16\,755.71$	$\frac{16\,755.71}{208.30} = 80.44$	$\frac{80.44}{18.04} = 4.46$
Sulfato de magnesio	SO ₄ ⁼	$\frac{10.40 \times 2.996 \times 10^6}{900} = 34\,620.44$	$\frac{34\,620.44}{208.30} = 166.20$	$\frac{166.20}{48.03} = 3.46$
	Mg ⁺⁺	$\frac{7.88 \times 1 \times 10^6}{900} = 8\,755.56$	$\frac{8\,755.56}{208.30} = 42.03$	$\frac{42.03}{12.15} = 3.46$

CT, concentración del ion en el tanque; CG, concentración del ion salida del gotero; CI, concentración del ion.

Fuente: Autoria propia.

14.7. Disolución de los fertilizantes

La disolución de los fertilizantes se prepara en tres tanques (A, B y C), en los tanques A y B se disuelven los fertilizantes y en el tanque C el ácido para controlar el pH del agua de riego. La preparación de una disolución se realiza previo el análisis y control de la compatibilidad de los fertilizantes a mezclar. Como norma general, no se debe mezclar los fertilizantes que contienen calcio con los fertilizantes que contengan sulfatos y fosfatos, debido a que pueden precipitarse como fosfatos de calcio (Tabla 56).

Tabla 56. Compatibilidad entre los fertilizantes.

Fertilizante	1	2	3	4	5
1. Nitrato de amonio	-				
2. Nitrato de potasio	C	-			
3. Fosfato mono potásico	C	C	-		
4. Sulfato de magnesio	C	C	C	-	
5. Ácido sulfúrico	C	C	C	C	-

Fuente: Autoria propia.



En el presente ejemplo, el peso total de los fertilizantes es de 290.69 kg y se deben disolver en dos tanques, en el tanque A: el 100% del nitrato de potasio y el 35.56% del sulfato de magnesio; en el tanque B, el 100% del nitrato de amonio y del fosfato mono potásico y el 64.44% del sulfato de magnesio (Tabla 57). Si bien es cierto que todos los fertilizantes son compatibles, es necesario diluirlos en dos tanques para evitar una saturación de la solución madre.

Tabla 57. Peso de los fertilizantes en los tanques.

Fertilizante (kg)	Total (kg)	A	B
Nitrato de amonio	71.34	-	71.34
Nitrato de potasio	110.46	110.46	-
Fosfato mono potásico	27.35	-	27.35
Sulfato de magnesio	81.54	29.0	40.77
Total	290.69	139.46	139.46

Fuente: Autoría propia.

En este esquema, el peso específico de la solución madre en los dos tanques será similar, por tanto, la tasa de inyección también similar y, en consecuencia, el descenso del nivel en los tanques será uniforme, garantizando que los fertilizantes se inyecten según lo programado en toda el área cultivada.

14.8. Cantidad del ácido para regular el pH

El pH del agua de riego debe reducirse de 7.96 a 6.00 unidades, para una concentración de los bicarbonatos en el agua de riego de 0.50 meq L⁻¹; se utilizará el ácido sulfúrico para conseguir el objetivo.

$$\text{Carbonatos} = \frac{0.5 \times 10^{-6.30} \times \left(\frac{10^{-7.96}}{10^{-6.30}} + 1 \right)}{10^{-6.30} + 10^{-6.00}} = 0.1706 \text{ meq L}^{-1}$$

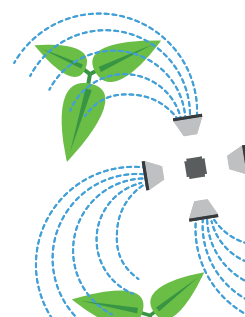
$$\text{RI} = \frac{1000 \times Q_{\text{riego}}}{q_{\text{inyector}}} = \frac{1000 \times 31.25}{30.00} = 1041.67$$

$$\text{VA} = \frac{0.70 \times (0.1706 - 0.0) \times 49.00 \times 1041.67 \times 500}{15 \times 98.08 \times 1.83} = 1132.0 \text{ cm}^3$$

Para neutralizar 2.50 meq L⁻¹ de bicarbonatos, se requiere diluir 1.13 litros de ácido sulfúrico en un volumen de agua de 500 litros.

En el cálculo de los fertilizantes se utilizan ácidos, la concentración del ion H⁺ puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$\text{H}^+ = \frac{\text{ppm}(\text{H}_2\text{SO}_4)}{49.038} + \frac{\text{ppm}(\text{HNO}_3)}{63.018} + \frac{\text{ppm}(\text{H}_3\text{PO}_4)}{32.665}$$



El ácido nítrico a utilizarse como fuente de nitratos, debe disolverse con la siguiente recomendación.

- Llenar el tanque con agua hasta un 50% de su volumen.
- Agregar el ácido lentamente.
- Adicionar el agua hasta completar el volumen total.
- Agitar hasta que la disolución sea uniforme.

Cuando no se dispone de un análisis químico del agua, se agrega el ácido al tanque hasta que el pH de la disolución alcance un valor de 1.80, bajo esta concentración, el pH a la salida del gotero es de 1.50 menos, por ejemplo, si el pH es de 8.00, el pH a la salida del gotero sería de 6.50. En caso de que no existir un análisis de agua, en campo se realiza una titulación con diferentes cantidades de ácido disuelto en el agua de riego y diferentes tasas de inyección, el pH se mide a la salida del gotero y en función de este valor se determina la cantidad de ácido a disolverse en el tanque. Siguiendo el esquema, el 100% del ácido se debe disolver en el tanque de 250 litros.

14.9. oncentración de las sales a la salida de los goteros

El cálculo de la concentración de los diferentes iones en el agua de riego, a la salida del gotero, se debe hacer tanto para el ácido como para los fertilizantes, a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{ppm}_{\text{gotero}} = \text{ppmA} + \text{ppmF} \quad (50)$$

$$\text{ppmA} = \frac{\text{VA} \times \text{DA} \times 1000}{\text{Rla} \times \text{Va}} = \frac{1\,132 \times 1.83 \times 1\,000}{1\,041.67 \times 250} = 19.89 \text{ mg L}^{-1}$$

$$\text{ppmF} = \frac{\text{Peso} \times 1\,000}{\text{RI} \times \text{V}} = \frac{290\,690 \times 1\,000}{1\,041.67 \times 250} = 1\,150.59 \text{ mg L}^{-1}$$

$$\text{ppm}_{\text{gotero}} = 10.89 + 1\,150.59 = 1\,161.48 \text{ mg L}^{-1}$$

La concentración total de los diferentes iones a la salida de los goteros es de 1 161.48 ppm.

14.10. Conductividad eléctrica a la salida del gotero

$$\text{CE} = \text{ppm} = 1\,161.48 = 3.14 \text{ dS m}^{-1}$$

La conductividad eléctrica producida por los fertilizantes es de 3.14 dS m⁻¹, si a este valor se suma la CE del suelo y del agua de riego, la CE en la solución del suelo sería de 3.38 dS m⁻¹.

$$\text{PO} = 36.5 \times \text{CE} = 36.5 \times 3.38 = 123.37 \text{ centibares}$$

El potencial osmótico total es de 123.37 centibares.

14.11. Programación de la inyección de los fertilizantes

La programación de la fertirrigación se basa en la distribución del agua de riego y de la inyección de los fertilizantes disueltos, en la cual se debe considerar el tiempo inicial y final tanto para el llenado como para el lavado de las sales desde los laterales de riego.



Para la programación de la fertirrigación se considera el tiempo inicial requerido para el llenado del múltiple o porta laterales y los laterales de riego como máximo un minuto y un tiempo mínimo requerido para el lavado de los fertilizantes de los laterales de riego de cinco minutos, siendo el tiempo disponible para realizar la fertirrigación de 15 minutos, este tiempo de inyección se mantiene desde el inicio hasta el final del ciclo de la fertilización, aunque el tiempo de riego varíe a lo largo del ciclo.

Inyección del Ácido. El ácido se inyecta desde el inicio hasta el final del tiempo de riego; en el ejemplo, durante los 21 minutos, su función es regular el pH del agua de riego.

14.12. Cantidad de nutrientes aplicados en cada gotero

La cantidad de los nutrientes aplicados a través de cada gotero se calcula con la siguiente ecuación.

$$PFg = 1\,000 \times PTN \times Se \times SI \quad (51)$$

En la Ecuación 51, PFg es la cantidad del nutriente aplicado (mg); PTN, es el peso total del nutriente aplicado (gramos); Se es la separación entre emisores (m); SI es la separación entre laterales (m) y A es el área total (m²).

$$PFg = \frac{1\,000 \times 303\,680 \times 0.20 \times 0.80}{20\,000} = 2\,429.40 \text{ mg}$$

La cantidad total de nitrógeno aportado en las 8 aplicaciones a través de cada gotero es de 2 429.40 mg (2.43 gramos) y en cada aplicación 303.67 mg.

La cantidad del nitrógeno aplicado a través de cada gotero también se puede calcular con la siguiente ecuación.

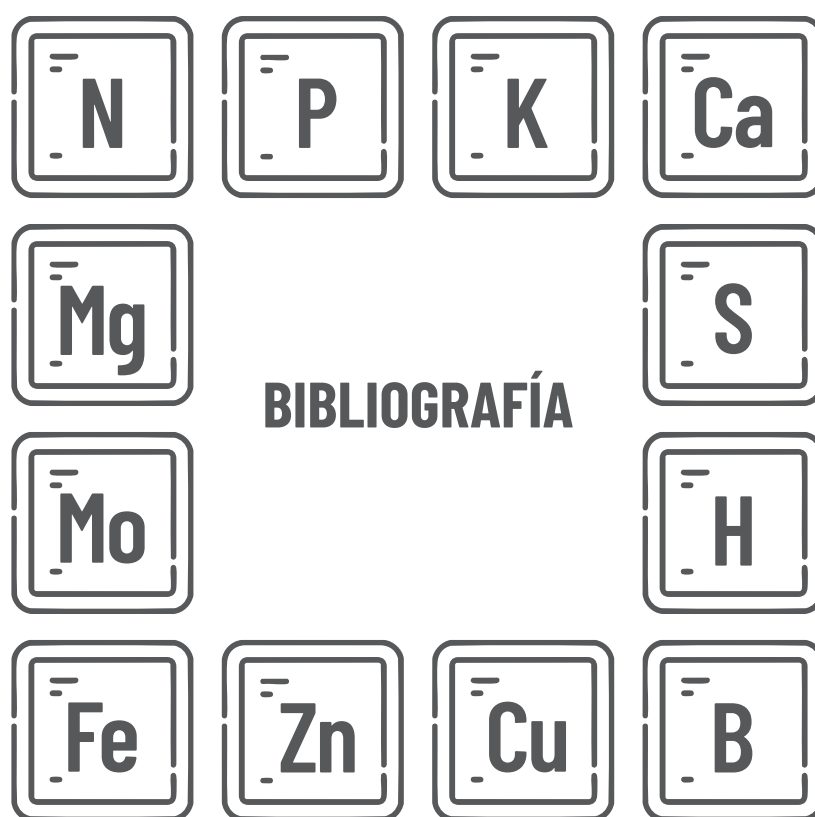
$$PFg = \frac{1\,000 \times PN \times NF \times Tf \times Df \times Qe}{Vt \times RI} \quad (52)$$

En la Ecuación 52, PFg es la cantidad de nitrógeno aplicado (mg); PN es el peso del nutriente aplicado (gramos); NF es el número de fertilizaciones; Tf es el tiempo de fertirrigación diario (horas); Df es el número de días de la semana que dura la fertilización; Qe es el caudal del emisor (l h⁻¹); Vt es el volumen del tanque de la solución madre (litros); y RI es la relación de inyección.

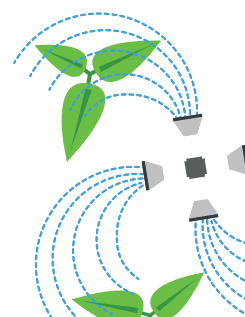
$$PFg = \frac{1\,000 \times 37\,960 \times 8 \times 0.25 \times 6 \times 1.00}{900 \times 208.30} = 2\,429.80 \text{ mg}$$

La cantidad total de nitrógeno aportado en las 8 aplicaciones a través de cada gotero es de 2 429.80 mg (2.43 gramos).

Los dos valores son similares, con lo cual, queda demostrado que la nueva metodología desarrollada es precisa.



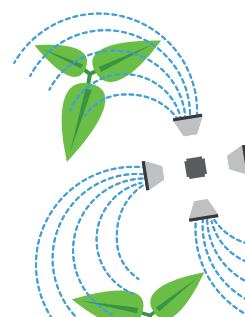
- Allen, R., Pereira, R., Raetz, D. & Smith, M. (2006). Evapotranspiración de cultivo. Roma: Boletín FAO 56.
- Agroproductores. (2022). Disponibilidad de nutrientes según pH del suelo. agroproductores.com. <https://agroproductores.com/disponibilidad-nutrientes-segun-ph/>
- Amiad. (2015). Manual para inyectoras para fertilizante. Jerusalem, Israel. <https://www.netafim.pe/bynder/82ECF724-78A5-4149-8F07F2C80657B30F-fertilizer-4-01-4-02-spanish-2013.pdf>
- Argus controls. (2009). Argus nutrient dosing handbook. British Columbia. https://www.exkalapalatt.info/wp-content/uploads/2015/09/argus_nutrient_dosing_handbook.pdf
- Bertsch, F. (2009). Absorción de nutrientes por los cultivos. Universidad de Costa Rica y Centro de Investigaciones Agronómicas. San José, Costa Rica.
- Cadahía, C. (2005). Fertirrigación: cultivos hortícolas y ornamentales. Madrid, España: Editorial Mundi-Prensa.
- Cartagena, Y. (2005). Análisis químicos de suelos: una herramienta para diseñar recomendaciones de fertilización y enmiendas en los cultivos. Quito, Ecuador: Editorial INIAP. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/4776/6/iniapsctC322a.pdf>
- Cartagena, Y. (2014). El modelo sistémico para la fertilización nitrogenada en brócoli (*Brassica oleracea* itálica). Colegio de Postgraduados. <http://hdl.handle.net/10521/2390>
- Chávez, E., Preciado, P., & Benavides, A., (2006). Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, México.
- Dosatron. (2015). Bombas inyectoras de fertilizantes. Buenos Aires, Argentina. <https://www.dosatron.com/es-ec/products/fertilizer-dosing-pumps>
- Dorembos, J. & Pruitt, W. (1990). Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 24. FAO.
- Espín, M. (2015). Evaluación de los efectos de la contaminación ambiental en la productividad de los cultivos agrícolas en los barrios La Morita, la Tola, el Arenal, la Esperanza y Collaqui ubicados en la parroquia Tumbaco, distrito metropolitano de Quito. Tesis Ingeniero Ambiental. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11852>
- Fernández, F. (1996). Agronomía de los cultivos. Madrid, España: Editorial Mundi-Prensa.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2000). Los abonos orgánicos. Roma, Italia: Editorial FAO. <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1133254/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2015). Seguridad Alimentaria. Roma: FAO. <https://www.fao.org/4/y3557s/y3557s06.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2024). Alimentación y agricultura sostenibles. Roma, Italia: Editorial FAO. <https://www.fao.org/sustainability/background/es/>
- Fuentes, J. (1996). Técnicas de riego. Madrid, España: Editorial Mundi-Prensa.
- Fuentes, F. (2003). Fundamentos químicos para la estimación de la cantidad dosificada en el ajuste automático del pH. Madrid, España: Editorial Mundi-Prensa.
- Galcon. (2015). Controladores de riego y fertirrigación. Jerusalem, Israel. <https://es.galconc.com/#>
- Gavi, F. (2010). Uso de fertilizantes. México, México: Editorial SAGARPA.

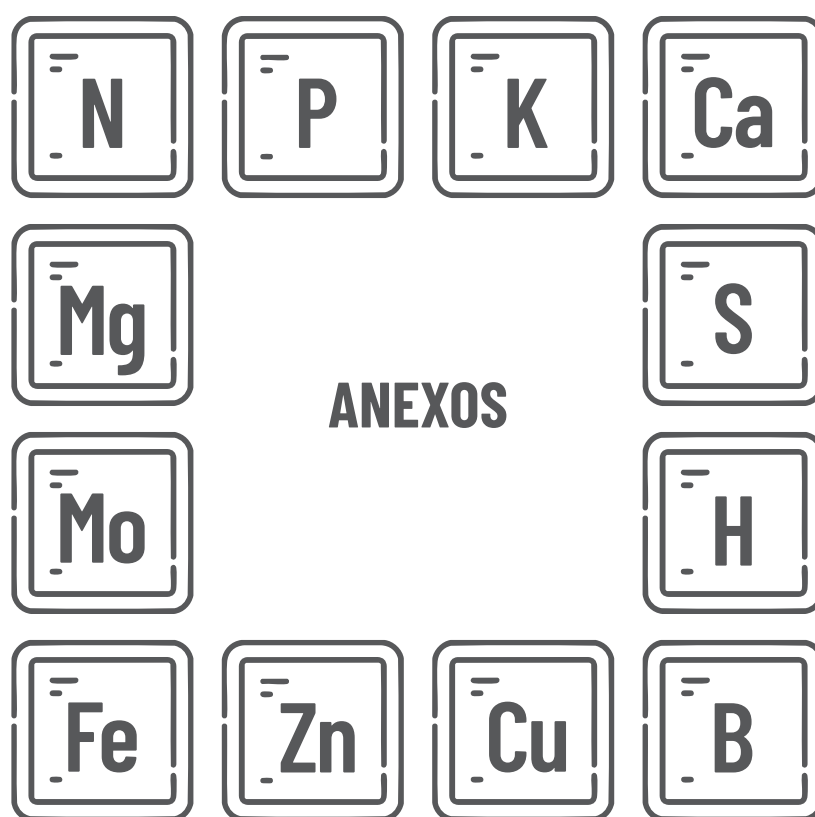


- Granda, W. (2003). Evaluación del tiempo mínimo para alcanzar el pH y la CE del agua de riego con el Dishunit. Tesis Ingeniero Electrónico. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11026/1/T1646.pdf>
- Grundfos. (2015). Water pumps. Sao Paulo, Brasil. <https://product-selection.grundfos.com/products/sp-sp-g/sp?tab=models>
- Hanna. (2016). Equipos para medir el pH y la conductividad eléctrica en el agua y en el suelo. New York, Estados Unidos. <https://www.hannainst.es/img/catalogos/ficheros/catalogo-agricultura-hanna.pdf>
- Hofman, J., Rhoades, J. & Letey, J. (1990). "Salinity Management". En Management of farm irrigation systems. Ed.: G. J. Hofman, T.A. Howell y K. H. Solomon. The American Society of Agricultural Engineers, Michigan (EE. UU.), pp. 667-715.
- Ingham, E. (2017). Microorganismos del suelo. <http://www.soilfoodweb.com/>: <http://www.soilfoodweb.com/>
- Iñiguez, M. (1993). Fertilización de los cultivos. Loja, Ecuador: Editorial Universidad Nacional de Loja.
- Iñiguez, M. (1999). Manejo y conservación de suelos y aguas. Loja, Ecuador: Editorial Universidad Nacional de Loja.
- Irrrometer. (2015). Tensiometros. Jerusalem, Israel. <https://www.irrometer.com/sensorssp.html>
- Israelí, E. (2002). Fertirrigación en riego por pulsos. Quito, Ecuador.
- ITC. (2015). Inyectores de fertilizantes. Madrid, España. <https://www.itc.es/es/ventajas-fertirrigacion-mediante-bombas-dosificadoras-itc/>
- Keller, J., & Bliesner, R. (1990). Sprinkle and trickle irrigation. New York, Estados Unidos: Editorial Van Nostrand Reinhold.
- Mariscal, I. (2002). Incidencias de los fertilizantes sobre el pH del suelo. Madrid, España: Editorial Fertiberia S.A.
- Martínez, L. (1998). Manual de fertirrigación. Huasco: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants. 2 nd ed. Academic Press, San Diego, New York.
- Masis, F., Hernández, R. & Piedra, G. (2017). Química Agrícola. Editorial Universitaria a Distancia. Costa Rica. https://www.researchgate.net/profile/Rodolfo-Hernandez-Chavez/publication/321278297_Quimica_Agricola/links/5aa0104c0f7e9badd99f8d43/Quimica-Agricola.pdf
- Mazzei. (2015). Inyectores venturi. New York, Estados Unidos: Editorial Mazzei. <https://mazzei.net/es/productos/inyectores-venturi/>
- Melendres, A. (1998). Fertirrigación. México, México: Editorial Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- Mengel, K., & Kirkby, E. (2000). Principios de Nutrición Vegetal. 4ta edición, 1era en español. Traducido por Ricardo Melgar. Instituto Internacional del Potasio. Basilea, Suiza.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca [MAGAP]. (2013). Plan Nacional de Riego y Drenaje. Quito, Ecuador.
- Ministerio de Medio Ambiente [MAE]. (2014). Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes. Quito: Ministerio de medio ambiente. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- Molina, E. & Meléndez, G. (2002). Tabla de interpretación de análisis de suelos. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. Mimeo.



- Natan, R. (2002). La fertilización combinada en el riego. Jerusalem, Israel: Editorial CINADCO.
- Navarro, G. & Navarro, S. (2003). Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Ediciones Mundi-Prensa.
- Netafim. (2015). Crop management technology. Jerusalem, Israel. <https://irrigationdesign.co.uk/wp-content/uploads/2015/11/IDAS-Catalogue-CROP-MANAGEMENT-TECHNOLOGY.pdf>
- Novedades Agrícolas. (2015). Máquinas de fertirrigación. Madrid, España.
- Ortiz, R. (2008). Hidroponía en el suelo. Quito, Ecuador: Editorial Abya Yala.
- Osorio, N. (2012). El análisis foliar: una poderosa herramienta para diagnosticar el estado nutricional de los cultivos, pasturas y plantaciones. Revista Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal, 1(3):1-4.
- Oxman, E. (1997). Fertirrigación. Quito, Ecuador.
- Padilla, W. (1979). Guía de fertilización de cultivos del Ecuador. Quito: Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. <https://repositorio.iniap.gob.ec/jspui/bitstream/41000/432/4/iniapscbt32.pdf>
- Pizarro, F. (1996). Riegos localizados de alta frecuencia. 3ra Edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Priva. (2015). Fertigation machines. Amsterdam, The Netherlands. <https://www.gulphydroponic.com/product/priva-holland-automatic-irrigation-fertigation-system-for-agriculture/>
- Proaño, J. (2010). Fertirrigación. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Resh, H. (1997). Cultivos hidropónicos. Madrid, España: Editorial Mundi-Prensa.
- Salvatierra, B. (2022). Curso de fertirrigación. Universidad Internacional del Riego. Madrid, España.
- Valarezo, C. (1989). Química Agrícola. Loja, Ecuador: Editorial Universidad Nacional de Loja.
- Vidal, I. (2022). Nutrición Vegetal. Universidad Concepción de Chile, Chile.





Anexo 1. Cálculo de la fertirrigación, con tablas guías de fertilización.

1. Información básica

Para el cálculo del peso de fertilizantes se asume la siguiente información del cultivo y equipo de riego por goteo.

Espaciamiento entre laterales de riego (SI):	0.80 m
Espaciamiento entre emisores (Se):	0.20 m
Caudal del emisor (qe):	1.60 L h ⁻¹
Número de laterales por hilera de cultivo (NI):	1
Frecuencia de riego (Fr):	diaria
Tamaño del lote de cultivo:	2 500.00 m ²
Superficie total del cultivo:	10 000.00 m ²
Número de válvulas:	4
Relación de dilución:	5.00 L m ⁻³
Días de riego:	6.00 días
Aplicación de los fertilizantes:	diaria
Eficiencia de aplicación del riego (Efa):	0.95
Inyector de fertilizantes:	venturi

La evapotranspiración real (ET_r) se ha estimado en 3.3 mm día⁻¹ para el primer mes, 3.9 mm día⁻¹ para el segundo mes y 4.76 mm día⁻¹ para el tercer mes (máxima demanda hídrica). El tiempo de riego base para la fertirrigación será para el primer mes.

2. Nutrientes por aplicarse

Para el cultivo de fréjol (Tabla 24), la fase inicial del cultivo es de 20 días y la fase de desarrollo de 30 días, estas dos fases suman un total de 50 días, aproximadamente 8 semanas.

Para alcanzar un rendimiento de 4.0 t ha⁻¹ de fréjol, la dosis de nitrógeno es de 68.8 kg ha⁻¹, fósforo de 17.6 kg ha⁻¹, potasio de 75.6 kg ha⁻¹, calcio de 8.8 kg ha⁻¹, magnesio de 8.8 kg ha⁻¹ y azufre de 8.0 kg ha⁻¹ (Tabla 29). El 100% del nitrógeno y del potasio se distribuirán en las primeras 8 semanas y el 100% del fósforo en las primeras 4 semanas (Tabla 58).

Tabla 58. Distribución semanal de los nutrientes en el cultivo de fréjol.

(kg)	Nutriente (kg ha ⁻¹)	Semanas	
		1	5
	Nitrógeno	8.60	8.60
	Fósforo	4.40	-
	Potasio	9.45	9.45
	Calcio	1.10	1.10
	Magnesio	1.10	1.10
	Azufre	1.00	1.00

Fuente: Autoría propia.

Como fuente de suministro de los nutrientes se tendrá a los siguientes fertilizantes: nitrato de amonio, nitrato de potasio, fosfato mono potásico, nitrato de calcio y sulfato de magnesio.

3. Dimensionamiento del equipo de inyección

Intensidad de precipitación. Para el cultivo de fréjol, la separación entre laterales es de 0.80 metros, la separación entre emisores 0.20 metros y el caudal del gotero de 1.60 L h⁻¹.

$$I_p = \frac{q_e \times NL}{S_e \times SI} = \frac{1.6 \times 1}{0.2 \times 0.8} = 10.00 \text{ mm h}^{-1}$$

Caudal de riego. El caudal de riego para una superficie de 2 500.00 m² por válvula será:

$$Q_r = \frac{I_p \times A}{1\,000} = \frac{10 \times 2\,500}{1\,000} = 25.00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

Se requiere 25.00 m³ h⁻¹ (6.94 L s⁻¹) para cubrir el área de riego de 2 500.00 m² con laterales de riego que proporcionan una pluviometría de 10.00 mm h⁻¹.

Tiempo de riego. El tiempo de riego para cubrir la lámina de 3.30 mm día⁻¹ es de 0.40 horas.

$$T_r = \frac{E_{Tr}}{E_{fa} \times I_p} = \frac{F_r}{P_r} = \frac{3.30}{0.95 \times 10.0} \times \frac{7}{6} = 0.40 \text{ h} \approx 24 \text{ min}$$

El tiempo de riego es de 24 minutos, siendo el tiempo para la inyección de los fertilizantes es de 15 minutos, considerando un tiempo de un minuto para el llenado del sistema y un tiempo de cinco minutos para el lavado de los laterales de riego. El tiempo total que se requiere para la inyección de los fertilizantes es de 45 minutos.

Caudal del inyector de fertilizantes. El caudal del inyector de los fertilizantes tomando en cuenta una relación de dilución de 5 litros por cada metro cúbico sería de:

$$Q_{\text{inyector}} = \frac{V_f}{V_a} \times Q_{\text{riego}} \times D_r = \frac{5}{1} \times 25 \times 1.2 = 150.01 \text{ L h}^{-1}$$

El caudal del inyector es de 150.01 L h⁻¹, asumiendo que se abrirá una válvula a la vez o por turno. Se utilizará un inyector venturi de 1", cuyo caudal motriz (QM) es de 3.70 m³ h⁻¹, menor al caudal de riego del lote de cultivo (25.00 m³ h⁻¹). El volumen para inyectarse en forma diaria es de 150 litros y a nivel semanal de 900 litros (se utilizará un tanque de 1000 litros). Para el ácido, es suficiente un venturi de 3/4" con un caudal de inyección de 76.00 L h⁻¹, siendo el volumen de la disolución a inyectarse en forma diaria de 106.40 litros y semanal de 638.40 litros (se utilizará un tanque de 1000 litros).

Relación de inyección. La relación de inyección sería de:

$$RI = \frac{1\,000 \times Q_{\text{riego}}}{Q_{\text{inyector}}} = \frac{1\,000 \times 25}{150.00} = 166.67$$

Para el caudal de riego de 25.00 m³ h⁻¹ y para el caudal del inyector de 150 L h⁻¹, la relación de inyección es de 166.67, esto significa que, por cada 166.67 litros de agua que fluyen por el sistema, la unidad de fertirrigación inyectará un litro de disolución.

Para la inyección del ácido, la relación de inyección sería de 328.95 (25 000/76).

4. Peso de los fertilizantes

El cálculo del peso de los fertilizantes se inicia con el nutriente de menor cantidad (Tabla 35).

Fósforo. El peso del fosfato mono potásico a disolverse en el tanque es de:

$$\text{Fosfato mono potásico} = \frac{P}{IA \times P} = \frac{4.40}{0.2276 \times 0.98} = 19.73 \text{ kg}$$

$$K = \text{Fosfato mono potásico} \times 0.2874 \times P = 19.73 \times 0.2874 \times 0.9 = 5.56 \text{ kg}$$

El peso del fosfato mono potásico es de 19.73 kg, proporciona 4.40 kg de fósforo y 5.56 kg de potasio.

Potasio. El peso del potasio que falta por adicionarse es de 3.89 kg (9.45 – 5.56); como fuente se considerará el nitrato de potasio.

$$\text{Nitrato de potasio} = \frac{K}{IA \times P} = \frac{3.89}{0.3867 \times 0.95} = 10.59 \text{ kg}$$

$$N = \text{Nitrato de potasio} \times 0.1386 \times P = 10.59 \times 0.1386 \times 0.95 = 1.39 \text{ kg}$$

El nitrato de potasio con un peso de 10.59 kg, proporciona 3.89 kg de potasio y 1.39 kg de nitrógeno.

Calcio. Como fuente se considerará el nitrato de calcio.

$$\text{Nitrato de calcio} = \frac{Ca}{IA \times P} = \frac{1.10}{0.1697 \times 0.90} = 7.20 \text{ kg}$$

$$N = \text{Nitrato de de calcio} \times 0.1186 \times P = 7.20 \times 0.1186 \times 0.90 = 0.77 \text{ kg}$$

El nitrato de calcio con un peso de 7.20 kg, proporciona 1.10 kg de calcio y 0.77 kg de nitrógeno.

Nitrógeno. El aporte del nitrógeno por el nitrato de potasio (1.39) y por el nitrato de calcio (0.77) es de 2.16 kg, faltando adicionar 6.44 kg para completar la dosis recomendada.

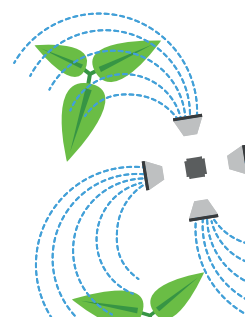
$$\text{Nitrato de amonio} = \frac{N}{IA \times P} = \frac{6.44}{0.335 \times 0.98} = 19.62 \text{ kg}$$

La cantidad de nitrato de amonio a aplicarse es de 19.62 kg.

Magnesio. El peso del sulfato de magnesio a disolverse en el tanque es de:

$$\text{Nitrato de amonio} = \frac{Mg}{IA \times P} = \frac{1.10}{0.0986 \times 0.98} = 11.38 \text{ kg}$$

$$S = 11.38 \times 0.1301 \times 0.98 = 1.45 \text{ kg}$$



La aplicación semanal de los nutrientes sería: 8.6 kg de nitrógeno; 4.4 kg de fósforo; 9.45 kg de potasio, 1.10 kg de magnesio, 1.10 kg de calcio y 1.45 kg de azufre (Tabla 57). El peso total de los fertilizantes es de 68.52 kg (Tabla 59).

Tabla 59. Nutrientes a aplicarse a través de la fertirrigación.

Fertilizante	Peso (kg)	N-NO ₃ ⁻	P-H ₂ PO ₄ ⁻	S-SO ₄ ⁼	N-NH ₄ ⁺	K	Ca	K
Fosfato mono potásico	19.73		4.40			5.56		
Nitrato de potasio	10.59	1.39				3.89		
Nitrato de calcio	7.20	0.77						
Nitrato de amonio	19.62	3.22			3.22		1.10	
Sulfato de Magnesio	11.38			1.45				1.10
Total	68.52	5.38	4.40	1.45	3.22	9.45	1.10	1.10

Fuente: Autoría propia.

Control de la solubilidad. El volumen de agua mínimo en el cual deben disolverse los fertilizantes considerando su solubilidad es:

$$V = \frac{PF_1}{S_1} + \dots + \frac{PF_n}{S_n} = \frac{19\,730}{230} + \frac{10\,590}{300} + \frac{7\,200}{1200} + \frac{10\,620}{1900} + \frac{11\,380}{710} = 153.441$$

Se requiere un volumen de 153.44 litros para disolver el peso total de los fertilizantes, al ser el volumen mínimo para inyectarse de 900 litros, no existirá problemas en relación con la solubilidad de los fertilizantes.

Cantidad del ácido para regular el pH. Cuando no se cuenta con un análisis químico de agua, se agrega el ácido al tanque hasta que el pH de la disolución alcance un valor de 1.80, bajo esta concentración, el pH a la salida del gotero disminuye en 1.50, por ejemplo, si el pH es de 8.00, el pH a la salida del gotero será de 6.50.

5. Disolución de los fertilizantes

La disolución de los fertilizantes se realizará en dos tanques (A y B), en el tanque A se disolverán los fertilizantes que contengan nitrógeno y los micronutrientes y en el tanque B, los fertilizantes que contengan fosfatos y sulfatos; para controlar el pH del agua de riego, se necesitará un tanque adicional (Tablas 60 y 61).

Tabla 60. Compatibilidad entre los fertilizantes.

Fertilizantes	1	2	3	4	5
1.Nitrato de amonio	-				
2.Nitrato de calcio	C	-			
3.Nitrato de potasio	C	C	-		
4.Fosfato mono potásico	C	C	C	-	
5.Sulfato de magnesio	C	C	C	C	-

Fuente: Autoría propia.

Tabla 61. Distribución de los fertilizantes en los tanques A y B.

Fertilizantes (kg)	Tanques	
	A	B
Fosfato mono potásico	-	19.73
Nitrato de potasio	7.44	3.15
Nitrato de calcio	7.20	-
Nitrato de amonio	19.62	-
Sulfato de magnesio	-	11.38
Total	34.26	34.26

Fuente: Autoría propia.

6. Concentración de los nutrientes a la salida de gotero

La concentración de los nutrientes a la salida del gotero será:

$$\text{ppm}_{\text{gotero}} = \text{ppmA} + \text{ppmF}$$

$$\text{TanqueA} = \frac{\text{Peso} \times 1\,000}{\text{RI} \times \text{V}} = \frac{37\,410 \times 1\,000}{166.67 \times 900} = 249.39 \text{ ppm}$$

$$\text{TanqueB} = \frac{\text{Peso} \times 1\,000}{\text{RI} \times \text{V}} = \frac{31\,110 \times 1\,000}{166.67 \times 900} = 207.39 \text{ ppm}$$

$$\text{TanqueC} = \frac{\text{VA} \times \text{DA} \times 1\,000}{\text{RI} \times \text{V}} = 0.0 \text{ ppm}$$

$$\text{ppm}_{\text{gotero}} = 0.0 + 249.39 + 207.39 = 456.78 \text{ ppm}$$

La concentración total de los diferentes iones a la salida de los goteros es de 456.78 ppm, inferior a la concentración recomendada de 700 y 1 200 ppm.

Conductividad eléctrica a la salida del gotero. La conductividad eléctrica producida por los fertilizantes durante el proceso de inyección es de 0.91 dS m⁻¹.

$$\text{Nitrógeno: } \text{PFg} = \frac{8\,600 \times 8 \times 0.2 \times 0.8 \times 1\,000}{10\,000} = 1\,100.80 \text{ mg}$$

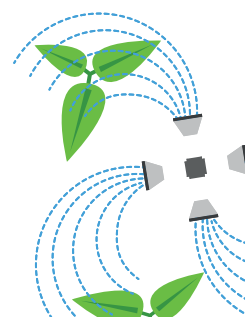
$$\text{Fósforo: } \text{PFg} = \frac{4\,400 \times 4 \times 0.2 \times 0.8 \times 1\,000}{10\,000} = 281.60 \text{ mg}$$

$$\text{Potasio: } \text{PFg} = \frac{9\,450 \times 8 \times 0.2 \times 0.8 \times 1\,000}{10\,000} = 1\,209.60 \text{ mg}$$

$$\text{Calcio: } \text{PFg} = \frac{1\,100 \times 8 \times 0.2 \times 0.8 \times 1\,000}{10\,000} = 140.80 \text{ mg}$$

$$\text{Magnesio: } \text{PFg} = \frac{1\,100 \times 8 \times 0.2 \times 0.8 \times 1\,000}{10\,000} = 140.80 \text{ mg}$$

$$\text{Azufre: } \text{PFg} = \frac{1\,450 \times 8 \times 0.2 \times 0.8 \times 1\,000}{10\,000} = 185.60 \text{ mg}$$



Al final del proceso de fertilización, a través de cada gotero se suministrará al cultivo 1 100.80 miligramos de nitrógeno, 281.60 miligramos de fósforo, 1209.60 miligramos de potasio, 140.80 miligramos de calcio, 140.80 miligramos de magnesio y 185.60 miligramos de azufre, siendo la cantidad total de los nutrientes aportados de 3 059.20 miligramos (3.06 gramos).



Anexo 2. Cálculo de la fertirrigación, con análisis químicos de suelos.

1. Información básica

Para el presente ejercicio de cálculo se tomará como base la información desarrollada en el ejercicio del Anexo 1.

Caudal de riego:	25.00 m ³ h ⁻¹
Caudal del inyector:	150.00 L h ⁻¹
Volumen de agua:	900 litros
Relación de inyección:	166.67
Semanas de fertilización:	8

Para el cultivo de fréjol, para alcanzar un rendimiento de 4.00 t ha⁻¹, la dosis de requerimiento de nitrógeno es de 68.80 kg ha⁻¹, fósforo de 17.6 kg ha⁻¹, potasio de 75.60 kg ha⁻¹, calcio de 8.80 kg ha⁻¹, magnesio de 8.80 kg ha⁻¹ y azufre de 8.00 kg ha⁻¹ (Tabla 29) y los resultados del análisis de químico del suelo se presenta en la Tabla 62.

Tabla 62. Análisis de químico del suelo.

Análisis	pH	CE (dS m ⁻¹)	N (%)	P (ppm)	K (meq 100 g ⁻¹)	Ca	Mg	MO (%)	Da (g cm ⁻³)
Suelos	6.78	0.24	0.15	45.9	0.56	8.80	4.70	3.10	1.00

Profundidad efectiva del suelo = 0.2 metros; f = 2 **Fuente:** Autoría propia.

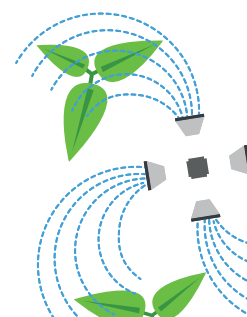
2. Conversión de unidades de los nutrientes

Utilizando las ecuaciones de la Tabla 6, la conversión de unidades de los nutrientes se resume en la Tabla 63.

Tabla 63. Conversión de unidades.

Nutriente	Conversión	Ecuación	Nutriente (kg ha ⁻¹)
Nitrógeno total (NT)	% a kg ha ⁻¹	f X C X 104	2 X 0.15 X 10 000 = 3 000.00
Nitrógeno (ND)	-	0.01 X N	0.01 X 3000 = 30.00
Nitrógeno de MO	% a kg ha ⁻¹	0.05 X MO X Da X Pr	0.05 X 3.10 X 1 000 X 0.20 = 31.00
Fósforo	ppm a kg ha ⁻¹	f X C	2 X 45.90 = 91.80
Potasio	meq 100 g ⁻¹ a kg ha ⁻¹	10 X f X C X meq	10 X 2 X 0.56 X 39.10 = 437.92
Calcio	meq 100 g ⁻¹ a kg ha ⁻¹	10 X f X C X meq	10 X 2 X 8.80 X 20.04 = 3 527.04
Magnesio	meq 100 g ⁻¹ a kg ha ⁻¹	10 X f X C X meq	10 X 2 X 4.70 X 12.15 = 1 142.10

ND, nitrógeno disponible. **Fuente:** Autoría propia.



3. Nutrientes a aplicarse

Los nutrientes que se aplicarán se presentan en la Tabla 64.

Tabla 64. Nutrientes para aplicarse a través del fertirriego.

Variables	N	P	K	Ca	Mg	S
	(kg ha ⁻¹)					
Cultivo	68.80	17.60	75.60	8.80	8.80	8.00
Suelo	30.00	91.80	437.92	3 527.04	1 142.10	0.00
Factor	0.60	0.10	0.50	0.60	0.60	0.40
Dosis	64.66	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00

Fuente: Autoría propia.

La dosis se obtiene de la diferencia del cultivo con el suelo, y este valor sobre el factor de eficiencia de recuperación de fertilizante (Cartagena, 2014).

Considerando el análisis químico de suelo que tiene una concentración de fósforo, potasio, calcio y magnesio disponible mayor a la requerida por el cultivo de fréjol, necesítandose complementar la demanda nutricional con 64.66 kg ha⁻¹ de nitrógeno y 20.00 kg ha⁻¹ de azufre.

4. Peso de los fertilizantes

Los fertilizantes que se utilizarán para complementar la necesidad nutricional es el sulfato de amonio y nitrato de amonio; los nutrientes se distribuirán en 8 semanas, en cada semana se suministrarán 8.08 kg de nitrógeno y 2.50 kg de azufre.

Azufre. Como fuente se considerará el sulfato de amonio.

$$\text{Sulfato de amonio} = \frac{S}{IA \times P} = \frac{2.50}{0.335 \times 0.98} = 10.96 \text{ kg}$$

$$N = \text{Sulfato de amonio} \times 0.2120 \times P = 10.96 \times 0.212 \times 0.94 = 2.18 \text{ kg}$$

El peso de 10.96 kg de sulfato de amonio proporciona 2.50 kg de azufre y 2.18 kg de nitrógeno.

Nitrógeno. El aporte del nitrógeno por el sulfato de amonio es de 2.18 kg, faltando adicionar 5.90 kg para completar la dosis recomendada.

$$\text{Nitro de amonio} = \frac{N}{IA \times P} = \frac{5.90}{0.335 \times 0.98} = 17.97 \text{ kg}$$

La cantidad de nitrato de amonio a aplicarse es de 17.97 kg.



Control de la solubilidad. El volumen de agua mínimo en el cual deben disolverse los fertilizantes considerando su solubilidad es:

$$V = \frac{PF1}{S1} + \frac{PF2}{S2} + \frac{10\ 960}{730} + \frac{17\ 971}{1\ 900} = 24.471$$

Se requiere un volumen de 24.47 litros para disolver el peso total de los fertilizantes.

5. Disolución de los fertilizantes

Para este caso, el sulfato de amonio y del nitrato de amonio son compatibles, por lo tanto, se disolverán en un solo tanque.

6. Concentración de los nutrientes a la salida de gotero

La concentración de nutrientes será:

$$ppm_{gotero} = ppmA + ppmF$$

$$\text{Tanque C} = \frac{VA \times DA \times 1000}{RI \times V} = 0.00 \text{ ppm}$$

$$\text{Tanque A} = \frac{\text{Peso} \times 1\ 000}{RI \times V} = \frac{28\ 931 \times 1\ 000}{166.67 \times 900} = 192.86 \text{ ppm}$$

La concentración total de los diferentes iones a la salida de los goteros es de 192.86 ppm, inferior a la concentración máxima de 1 200 ppm.

Conductividad eléctrica a la salida del gotero. La conductividad eléctrica producida por los fertilizantes durante el proceso de inyección de los fertilizantes es de 0.38 dS m⁻¹

$$CE = \frac{ppm}{500} = \frac{192.86}{500} = 0.38 \text{ dS m}^{-1}$$

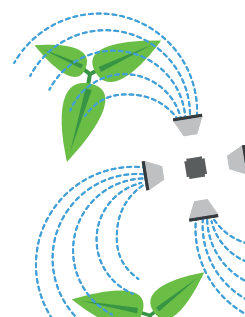
$$PO = 36.50 \times CE = 36.50 \times 0.38 = 13.87 \text{ centíbares}$$

El potencial osmótico generado por los fertilizantes es de 13.87 centibares.

Cantidad de nutrientes aplicados por cada gotero. Al final del proceso de fertilización, a través de cada gotero se suministrará al cultivo 1 034.49 miligramos de nitrógeno y 320.00 miligramos de azufre, siendo la cantidad total de los nutrientes aportados de 1 354.49 miligramos (1.30 gramos).

$$\text{Nitrógeno: } PFg = \frac{8\ 082 \times 8 \times 0.2 \times 0.8 \times 1\ 000}{10\ 000} = 1\ 034.49 \text{ mg}$$

$$\text{Azufre: } PFg = \frac{8\ 082 \times 8 \times 0.2 \times 0.8 \times 1\ 000}{10\ 000} = 1\ 034.49 \text{ mg}$$



Anexo 3. Cálculo de la fertirrigación, con análisis químico de suelos y aguas.

1. Información básica

Para el presente ejercicio se parte de la información técnica del ejercicio anterior:

Caudal de riego:	25.00 m ³ h ⁻¹
Caudal del inyector:	150.00 L h ⁻¹
Volumen de agua:	900 litros
Relación de inyección:	166.67
Semanas de fertilización:	8

Tabla 65. Análisis químico y físico del suelo.

Análisis	pH	CE	N	P	K	Ca	Mg	Mo	Da
		(dS m ⁻¹)	(%)	(ppm)		(meq 100 g ⁻¹)		(%)	(g cm ⁻³)
Suelos	6.78	0.40	0.15	45.9	0.92	10.77	5.73	3.10	1.00

Profundidad efectiva del suelo = 0.2 metros; f = 2

Fuente: Autoría propia.

Tabla 66. Análisis químico del agua de riego.

Análisis	pH	CE	N	P	K	Ca	Mg	S
		(dS m ⁻¹)			(ppm)			
Aguas	7.96	0.24	0.80	0.78	6.11	21.20	11.26	24.47

Fuente: Autoría propia.

2. Conversión de unidades de los nutrientes

Para la conversión de las unidades del análisis químico de suelos se utilizó de la Tabla 6. El contenido de nitrógeno disponible se determinó a partir del nitrógeno total (Tablas 67 y 68).

Tabla 67. Conversión de unidades del análisis químico de suelos.

Nutriente	Conversión	Ecuación	Nutriente (kg ha ⁻¹)
Nitrógeno total (NT)	% a kg ha ⁻¹	f X C X 104	2 X 0.14 X 10000 = 2 800
Nitrógeno (ND)	-	0.01 X N	0.01 X 3 000 = 30.00
Nitrógeno de MO	% a kg ha ⁻¹	0.05 X MO X Da X Pr	0.05 X 2.9 X 1 000 X 0.20 = 29.00
Fósforo	ppm a kg ha ⁻¹	f X C	2 X 45.9 = 91.80
Potasio	meq 100 g ⁻¹ a kg ha ⁻¹		10 X 2 X 0.92 X 39.10 = 719.44
Calcio	meq 100 g ⁻¹ a kg ha ⁻¹	10 X f X C X meq	10 X 2 X 10.77 X 20.04 = 4 316.60
Magnesio	meq 100 g ⁻¹ a kg ha ⁻¹		10 X 2 X 5.73 X 12.15 = 1 392.40

ND, nitrógeno disponible. **Fuente:** Autoría propia.



Para calcular el aporte de los nutrientes por el agua de riego, el volumen total de agua se contabilizará en las primeras 8 semanas (60 días); el volumen total de agua sería de 2 273.7 m³ ha⁻¹ (Tabla 68).

$$V = \frac{10 \times (ET_{r1} \times 30 + ET_{r2} \times 30)}{E_{fa}} = \frac{10 \times (3.30 \times 30 + 3.90 \times 30)}{0.95} = 2\,273.70 \text{ m}^3$$

Tabla 68. Conversión de nutrientes del análisis químico de aguas.

Nutriente	Conversión	Ecuación	Nutriente (kg ha ⁻¹)
Nitrógeno	ppm a kg ha ⁻¹	$\frac{\text{ppm} \times V}{1\,000}$	$0.80 \times 2\,273.70 / 1\,000 = 1.81$
Fósforo			$0.78 \times 2\,273.70 / 1\,000 = 1.77$
Potasio			$6.11 \times 2\,273.70 / 1\,000 = 13.89$
Calcio			$21.20 \times 2\,273.70 / 1\,000 = 48.20$
Magnesio			$11.26 \times 2\,273.70 / 1\,000 = 25.60$
Azufre			$24.47 \times 2\,273.70 / 1\,000 = 55.63$

Fuente: Autoría propia.

3. Nutrientes a aplicarse

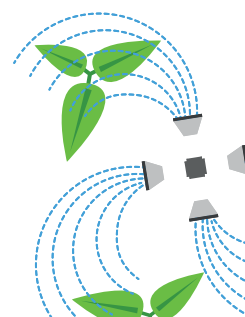
Se considera como fertilidad disponible el 30% de los valores reportados en el análisis químico de suelos (fertilidad total).

Considerando el análisis químico del suelo y del agua de riego, la suma de los dos análisis aporta una cantidad de fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre mayor a la requerida por el cultivo de fréjol, necesiéndose complementar la demanda nutricional con 59.98 kg ha⁻¹, se aplicará a razón de 7.49 kg por semana (Tabla 69).

Tabla 69. Nutrientes a aplicarse a través de la fertirrigación.

Variables	N	P	K	Ca	Mg	S
	(kg ha ⁻¹)					
Cultivo	68.80	17.60	75.60	8.80	8.80	8.00
Suelos	31.00	91.80	719.44	4 316.60	1 392.40	0.00
Aguas	1.81	1.77	13.89	48.20	25.60	55.63
Factor	0.60	0.10	0.50	0.60	0.60	0.40
Dosis	59.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Autoría propia.



4. Fertilizantes a aplicarse

Para el aporte del nitrógeno se considerará el nitrato de amonio; todo el fertilizante se distribuirá en 8 semanas y tres días por semana, siendo el peso del nitrógeno por aplicación de:

$$\text{Nitrato de amonio} = \frac{N}{IA \times P} = \frac{7.49}{0.335 \times 0.98} = 22.81 \text{ kg}$$

La cantidad de nitrato de amonio a aportarse en cada disolución es de 22.81 kg, de los cuales 7.49 kg corresponden a nitrógeno y la concentración del nitrógeno a la salida del gotero será de 49.92 ppm.

$$CFG = \frac{PF \times NA \times P \times 100}{RI \times V} = \frac{22.81 \times 33.5 \times 98 \times 100}{166.67 \times 900} = 49.92 \text{ ppm}$$

Control de la solubilidad. El volumen de agua mínimo en el cual deben disolverse los fertilizantes considerando su solubilidad es:

$$V = \frac{PF_i}{S_i} = \frac{22.81}{1.900} = 12.00 \text{ litros}$$

Se requiere un volumen de 12.00 litros para disolver el peso total del nitrato de amonio.

Cantidad de ácido para regular el pH.

$$VA = \frac{(pH_1 - pH_2) \times eq}{15 \times P \times DA} = \frac{(7.96 - 6.0) \times 32.66}{15 \times 75 \times 1.84} = 0.031 \text{ mL L}^{-1}$$

5. Disolución de los fertilizantes

Para el presente caso, el nitrato de amonio y el ácido sulfúrico son compatibles, por tanto, se pueden disolver en un solo tanque.

6. Concentración de los nutrientes a la salida de gotero

El cálculo de la concentración de los diferentes iones en el agua de riego, a la salida del gotero, se debe hacer para el ácido y los fertilizantes, a través de las siguientes ecuaciones:

$$ppm_{\text{gotero}} = ppm_A + ppm_F$$

$$\text{Ácido} = \frac{VA \times DA \times 1000}{RI \times V} = \frac{31 \times 1.84 \times 1000}{166.67 \times 900} = 0.38$$

$$\text{Fertilizante} = \frac{\text{Peso} \times 1000}{RI \times V} = \frac{7497 \times 1000}{166.67 \times 900} = 49.97 \text{ ppm}$$

$$ppm_{\text{gotero}} = 0.38 + 49.97 = 50.35 \text{ ppm}$$

La concentración total de los diferentes iones a la salida de los goteros es de 50.35 ppm, inferior a la máxima concentración de 1 200 ppm.



Conductividad eléctrica a la salida del gotero.

La conductividad eléctrica producida por los fertilizantes durante el proceso de inyección de los fertilizantes es de 0.10 dS m^{-1} , si a este valor se suma la CE del agua de riego de 0.24 dS m^{-1} , la CE total a la salida del gotero sería de 0.34 dS m^{-1} .

$$CE = \frac{\text{ppm}}{500} = \frac{50.35}{500} = 0.10 \text{ dS m}^{-1}$$

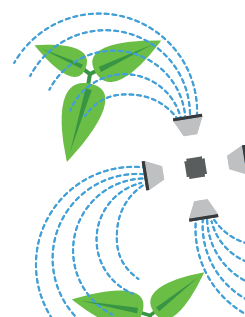
$$PO = 36.5 \times CE = 36.5 \times 0.34 = 12.41 \text{ centíbares}$$

El potencial osmótico generado por las sales es de 12.41 centíbares.

7. Cantidad de nutrientes aplicados por cada gotero

Al final del proceso de fertilización (8 semanas), a través de cada gotero se suministrará al cultivo 959.61 miligramos de nitrógeno (0.95 gramos).

$$\text{Nitrógeno: PFg} = \frac{7\,497 \times 8 \times 0.2 \times 0.8 \times 1\,000}{10\,000} = 959.61 \text{ mg}$$



Anexo 4. Cálculo de la fertirrigación, con nutrientes aportados por un biol.

1. Información básica

Para el ejemplo se utilizará la información desarrollada en el anexo 3. Se requiere aplicar 57.69 kg ha⁻¹ de nitrógeno para completar la demanda nutricional del cultivo de fréjol, distribuido en 8 semanas. La cantidad de nitrógeno a aplicarse en cada semana es de 7.21 kg. Como fuente de aporte de nutrientes se utilizará el biol producido con el estiércol del cuy (Tabla 33), en donde la concentración del nitrógeno es de 500 ppm y el peso específico del biol se asume en 1.15 g cm⁻³.

2. Cálculo del volumen del biol para inyectarse

El cálculo del volumen del biol que se debe inyectar por cada semana es de 12.50 m³, al aplicar el biol en forma diaria, el volumen a inyectarse es de 2.10 m³ y, el volumen total del biol a inyectarse en las 8 semanas de 100 m³.

$$VF = \frac{PF \times 10^6}{C \times Da} = \frac{7.21 \times 10^6}{500 \times 1.15} = 12\,549.10 \text{ litros}$$

En la ecuación anterior, VF es el volumen del biol (litros); PF es el peso del fertilizante (mg); C es la concentración del nitrógeno en el biol (mg L⁻¹); Da es la densidad del biol (g cm³).

3. Cálculo del caudal de inyección

El caudal que se requiere inyectar es de 2.62 m³, considerando el tiempo de inyección mínimo de 48 minutos (0.8 horas).

$$Q = \frac{V}{T} = \frac{2.1}{0.8} = 2.62 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

En la ecuación, Q es el caudal de inyección (m³ h⁻¹); V es el volumen del biol a inyectarse (m³); T es el tiempo de inyección de los fertilizantes (h).

Este caudal se puede inyectar por medio de un venturi a través de dos métodos (Booster o bomba de eje vertical de acero inoxidable), desde donde se inyectará el biol directamente desde el tanque de almacenamiento a la línea de riego; siendo, el más económico el de la bomba de eje vertical de acero inoxidable.



4. Concentración de los nutrientes a la salida de gotero

Es necesario indicar que el biol se utilizará solo como fuente de aporte de nitrógeno, sin embargo, el biol tiene más elementos nutritivos para la planta (Tabla 70).

Tabla 70. Concentración de los nutrientes a la salida del gotero.

Nutriente	Biol (mg L ⁻¹)	PFG (mg)
N	560.00	896.00
P	64.00	102.40
K	2 275.00	3 640.00
Ca	101.00	161.60
Mg	132.50	212.00
Na	691.25	1 106.00
Fe	18.83	30.128
Cu	0.19	0.304
Zn	0.49	0.784
Mn	0.38	0.608
B	1.27	2.032
Total	3 844.91	6 151.86

Fuente: Autoría propia.

La concentración de los nutrientes a la salida del gotero es de 23.07 ppm (3 844.91/166.67), menor a la concentración máxima recomendada de 1 200 ppm y el peso total de fertilizantes aplicado en cada gotero de 6 151.86 mg (6.10 g). Para el caso del nitrógeno, el peso total aplicado es de 896.00 mg.

$$PN = \frac{N - \text{Biol} \times V \times 1\,000 \times Se \times SI}{A} = \frac{560 \times 100 \times 1\,000 \times 0.20 \times 0.80}{10\,000} = 896.00 \text{ mg}$$

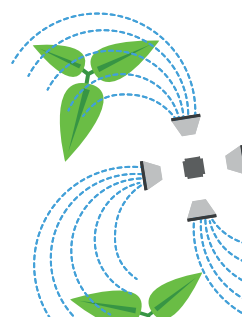
Control de la conductividad eléctrica a la salida del gotero

La conductividad eléctrica producida por los bioles es de 0.046 dS m⁻¹, este valor se suma la CE del agua de riego de 0.24 dS m⁻¹, la CE total a la salida del gotero sería de 0.286 dS m⁻¹.

$$CE = \frac{\text{ppm}}{500 \times RI} = \frac{3\,844.91}{500 \times 166.67} = 0.046 \text{ dS m}^{-1}$$

$$PO = 36.50 \times CE = 36.50 \times 0.286 = 10.44 \text{ centíbares}$$

El potencial osmótico generado por las sales es de 10.44 centíbares.



Anexo 5. Cálculo de la solución madre utilizando un sustrato.

1. Información básica

La preparación de una solución madre para fertilizar cultivos en sustratos (arena, cascajo, coco peat, lana de roca, entre otros materiales) se requiere conocer lo siguiente: el análisis químico de suelos no tiene ningún valor en este tipo de explotaciones; el agua de riego puede tener cierta influencia en la dosificación del calcio y magnesio, sin embargo, en cultivos semihidropónicos no se considera el análisis químico del agua de riego para preparar la solución madre, de hacerlo, se debe balancear el equilibrio iónico entre los cationes y los aniones; se recomienda disolver un fertilizante en un tanque independiente y éste debe disponer de un inyector por separado.

El riego en sustratos se debe calcular en campo para evitar un drenaje excesivo, normalmente se manejan tiempos de riego que oscilan entre 3 y 5 minutos, distribuidos a lo largo del día. La aplicación del agua de riego es semanal, de lunes a domingo. Para evitar la salinización del sustrato, un día de la semana debe aplicarse agua sin fertilizantes (con pH regulado). Este tipo de explotación requiere de automatismos para su operación y solo se hace en cultivos altamente rentables como: tomate riñón, pimiento, frutilla, rosas, flores de verano, entre otros cultivos.

Para el ejercicio se considerará la solución balanceada de Steiner (Tabla 71) y la siguiente información del sistema de riego:

Caudal de riego:	31.25 m ³ h ⁻¹
Caudal del inyector:	312.50 L h ⁻¹
Relación de inyección:	100
Tiempo de riego total:	21 minutos día ⁻¹
Tiempo de riego por pulso:	3 minutos
Volumen del tanque:	1 500.00 litros

Para cultivos semi hidropónicos, la relación de dilución es de 10.00, para este caso, el caudal del inyector será de 312.50 L h⁻¹ (inyector venturi de 1.5"). Considerando el tiempo de riego de 21 minutos diarios y cuatro válvulas, el volumen total de la solución a inyectarse es de 2 625.00 litros (el tanque para preparar la solución madre será de 3 000.00 litros).

Tabla 71. Fórmula de la solución nutritiva universal Steiner.

Elemento	Símbolo	Límite	Dosis (mg L ⁻¹)
Nitrógeno	N	150.00 - 250.00	168.00
Fósforo	P	30.00 - 60.00	31.00
Potasio	K	200.00 - 300.00	273.00
Calcio	Ca	150.00 - 250.00	180.00
Magnesio	Mg	30.00 - 70.00	48.00
Azufre	S	100.00 - 300.00	112.00
Hierro	Fe	2.00 - 8.00	3.00
Manganeso	Mn	0.60 - 1.20	1.40
Zinc	Zn	0.05 - 0.30	0.28
Cobre	Cu	0.01 - 0.15	0.11
Boro	B	0.30 - 0.80	0.26
Molibdeno	Mo	0.01 - 0.30	0.10

Fuente: Chávez et al., 2006.

2. Peso de los fertilizantes

Como fuente de aporte de los diferentes nutrientes se utilizarán: ácido nítrico, fosfato mono amónico, nitrato de calcio, fosfato mono potásico, nitrato de potasio y sulfato de magnesio (Tabla 72).

Tabla 72. Peso de los fertilizantes.

Elemento	Nutriente	Concentración (ppm)	Peso (kg)
Fosfato mono potásico	P K	31.00 $0.792 \times 31.00 = 24.55$	$31.0 \times 100 \times 2\ 625 = 28.89$ $28.74 \times 98 \times 100$
Sulfato de magnesio	MG S	48.00 $1.319 \times 48 = 63.31$	$48 \times 100 \times 2\ 625 = 130.40$ $9.86 \times 98 \times 100$
Sulfato de potasio	S K	$112.00 - 63.31 = 48.69$ $48.69 / 0.41 = 118.76$	$48.69 \times 100 \times 2\ 625 = 70.88$ $18.40 \times 98 \times 100$
Nitrato de calcio	Ca N	180.00 $0.699 \times 180 = 125.82$	$180 \times 100 \times 2\ 625 = 309.37$ $16.97 \times 90 \times 100$
Nitrato de potasio	K N	$273.00 - 24.55 - 118.76 = 129.69$ $129.69 \times 0.358 = 46.43$	$129.69 \times 100 \times 2\ 625 = 92.67$ $38.67 \times 95 \times 100$

Fuente: Autoría propia.

El cálculo del peso de los nutrientes se realizó utilizando la información técnica presentada en las Tablas 35 y 42, y las ecuaciones 8.5 y 8.7. El proceso consiste en determinar el peso de los fertilizantes desde el nutriente de menor concentración.

3. Disolución de los fertilizantes

Para la preparación de los fertilizantes se utilizarán tres tanques, en el tanque A se disolverán los fertilizantes que contengan fosfatos y sulfatos, en el tanque B con nitratos y en el tanque C, el ácido para corregir el pH (Tabla 73).

Tabla 73. Distribución de los fertilizantes en los tanques A y B.

Fertilizantes (kg)	Tanques	
	A	B
Fosfato mono potásico	28.89	-
Sulfato de magnesio	130.40	-
Sulfato de potasio	70.88	-
Nitrato de calcio	-	309.37
Nitrato de potasio	85.93	6.73
Total	316.10	316.10
VT (litros)	3 000.00	3 000.00
CT (ppm)	105 366.67	
CET (dS/m)	210.73	
CG (ppm)	1 053.67	
CEG (dS/m)	2.11	

Fuente: Autoría propia.



Es necesario balancear el peso de los fertilizantes en cada tanque para evitar que uno de ellos se vacíe más rápido que el otro.

En este caso, se requiere un total de tres venturis, dos venturis de 1.5" (uno para cada tanque) y un venturi de 1" para la inyección del ácido; el caudal motriz total de los venturis será de $23.70 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, menor al caudal de riego de $31.25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

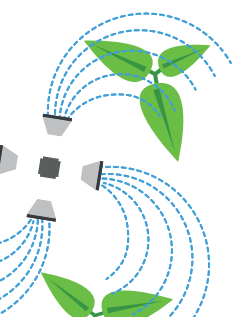
Los tanques para disolver los fertilizantes son dos de $3\,000.00 \text{ m}^3$ y un tanque de 1000.00 litros para el ácido.

4. Concentración de los nutrientes a la salida de gotero

La concentración total de los nutrientes en el agua a la salida del gotero es de $1\,053.67 \text{ ppm}$, inferior a la concentración máxima recomendada de $1\,200 \text{ ppm}$.

La conductividad eléctrica producida por los fertilizantes es de 2.11 dS m^{-1} , este valor se suma la CE del agua de riego de 0.24 dS m^{-1} , la CE total a la salida del gotero sería de 2.35 dS m^{-1} .

El potencial osmótico sería de 85.80 centibares.

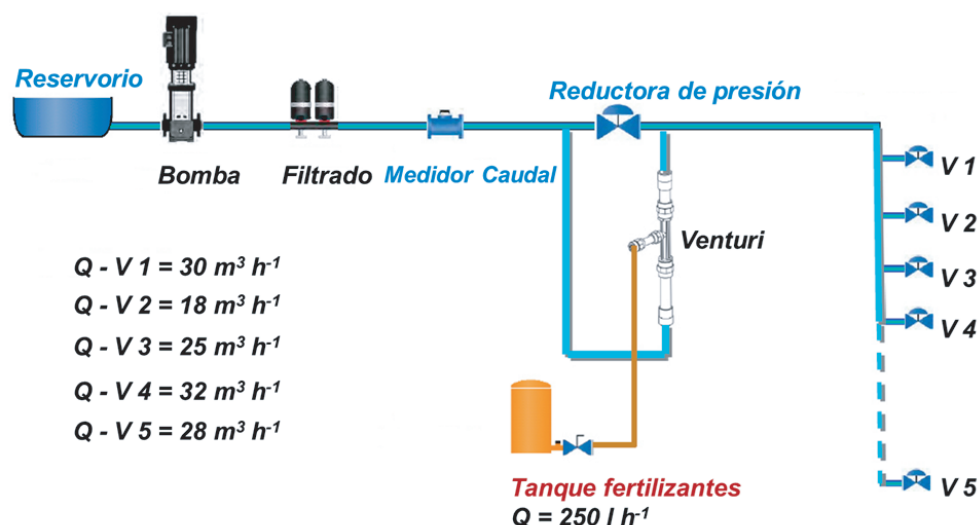


Anexo 6. Cálculo de la relación de inyección de los fertilizantes.

El control de la relación de inyección en un campo cultivado con varios caudales de riego (áreas de riego de diferente tamaño, debe ajustarse bajo el siguiente procedimiento para mantener una uniformidad alta en la distribución de los fertilizantes en todas las áreas de cultivo.

Para el ejemplo, la concentración del nitrógeno a la salida del gotero será de 100 ppm, el tiempo de riego de 1.00 hora, el tiempo de fertilización de 0.50 horas, se utilizará el nitrato de amonio como fuente de aporte del nitrógeno, caudal del emisor de 1.60 L h^{-1} y el volumen del tanque para disolver los fertilizantes de 1000 litros; los caudales de las válvulas son: 30, 18, 25, 32 y $28 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y el caudal del inyector de 250 L h^{-1} (Figura 43).

Figura 43. Esquema del sistema de riego.



Fuente: Netafim, 2015.

1. Relación de inyección para cada válvula

Estos cálculos permiten determinar la máxima y la mínima relación de inyección.

$$R_4 = \frac{32\,000}{250} = 128.00 \text{ L h}^{-1}$$

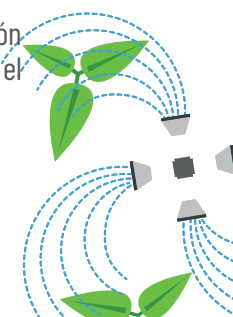
$$R_1 = \frac{30\,000}{250} = 120.00 \text{ L h}^{-1}$$

$$R_5 = \frac{28\,000}{250} = 112.00 \text{ L h}^{-1}$$

$$R_3 = \frac{25\,000}{250} = 100.00 \text{ L h}^{-1}$$

$$R_2 = \frac{18\,000}{250} = 72.00 \text{ L h}^{-1}$$

Como puede observarse, cuando el caudal del inyector no se regula de acuerdo al caudal de riego, la relación de inyección o de dilución es diferente para cada válvula. La máxima RI es de 128 y la mínima de 72; para el cálculo de los fertilizantes se utiliza la máxima relación de inyección.



2. Peso del nitrato de amonio para la máxima relación de inyección

Para el cálculo del peso del fertilizante nitrato de amonio, se utilizará la ecuación:

$$\text{Nitrato de amonio} = 2.9154 \times 10^{-6} \times \text{Cfg} \times \text{RI} \times \text{V} \quad (\text{A4.1})$$

$$\text{Nitrato de amonio} = 2.9154 \times 10^{-6} \times 100 \times 128 \times 1000 = 37.32 \text{ kg}$$

$$\text{Nitrógeno} = \text{Nitrato de amonio} \times \text{NA} \times \text{P} = 37.32 \times 0.35 \times 0.98 = 12.80 \text{ kg}$$

Para alcanzar una concentración de nitrógeno de 100 ppm a la salida del gotero, se requiere disolver 37.32 kilogramos de nitrato de amonio en el tanque de 1 000 litros, este peso contiene 12.80 kilogramos de nitrógeno.

3. Concentración del nitrógeno en el tanque de 1000 litros

La concentración del nitrógeno en el tanque (CT) es de 12 800 ppm (mg L^{-1}).

$$\text{CT} = \text{Nitrógeno} \times 1 \times 10^6 = 12.8 \times 1 \times 10^6 = 12\,800.00 \text{ mg L}^{-1}$$

4. Concentración del nitrógeno para cada válvula

Para calcular la concentración del nitrógeno a la salida del gotero para cada válvula y entender que a medida que el caudal de la válvula disminuye, la concentración del fertilizante es mayor.

$$\text{Cfg}_4 = \frac{\text{CNT}}{\text{RI}_4} = \frac{12\,800}{128} = 100.00 \text{ mg L}^{-1}$$

$$\text{Cfg}_1 = \frac{\text{CNT}}{\text{RI}_1} = \frac{12\,800}{120} = 106.70 \text{ L h}^{-1}$$

$$\text{Cfg}_5 = \frac{\text{CNT}}{\text{RI}_5} = \frac{12\,800}{112} = 114.30 \text{ L h}^{-1}$$

$$\text{Cfg}_3 = \frac{\text{CNT}}{\text{RI}_3} = \frac{12\,800}{100} = 128.00 \text{ L h}^{-1}$$

$$\text{Cfg}_2 = \frac{\text{CNT}}{\text{RI}_2} = \frac{12\,800}{72} = 177.80 \text{ L h}^{-1}$$

La concentración del nitrógeno a la salida de los goteros es diferente para cada válvula, siendo la mínima de 100.00 ppm y la máxima de 177.80 ppm.



5. Tiempo de inyección de los fertilizantes para cada válvula

Este procedimiento permite determinar el tiempo de inyección de los fertilizantes disueltos para cada válvula para alcanzar una concentración de fertilizantes constante.

$$Tf_1 = \frac{ppm_4}{ppm_1} \times Tf = \frac{100}{100} \times 0.5 = 0.469 \text{ horas}$$

$$Tf_2 = \frac{ppm_4}{ppm_2} \times Tf = \frac{100}{177.8} \times 0.5 = 0.281 \text{ horas}$$

$$Tf_3 = \frac{ppm_4}{ppm_3} \times Tf = \frac{100}{128} \times 0.5 = 0.281 \text{ horas}$$

$$Tf_5 = \frac{ppm_4}{ppm_5} \times Tf = \frac{100}{114.3} \times 0.5 = 0.437 \text{ horas}$$

Al ajustar el tiempo de inyección, paralelamente se ajusta el volumen de inyección de los fertilizantes disueltos, lo cual permite igualar la concentración de los fertilizantes en cada válvula de riego.

6. Volumen de inyección para cada válvula

El cálculo del volumen de los fertilizantes a inyectarse permite conocer el volumen total que debe prepararse para ser aplicado al cultivo.

$$Vf_1 = Tf_1 \times Qi = 0.469 \times 250 = 117.25 \text{ litros}$$

$$Vf_2 = Tf_2 \times Qi = 0.281 \times 250 = 70.25 \text{ litros}$$

$$Vf_3 = Tf_3 \times Qi = 0.391 \times 250 = 97.75 \text{ litros}$$

$$Vf_4 = Tf_4 \times Qi = 0.50 \times 250 = 125.0 \text{ litros}$$

$$Vf_5 = Tf_5 \times Qi = 0.437 \times 250 = 109.25 \text{ litros}$$

7. Volumen de agua de riego aplicado por válvula

Este valor nos indica el volumen de agua que se aplicará al cultivo en función del tiempo y caudal de riego.

$$VR_1 = Tr \times Q_1 = 0.50 \times 30\,000 = 15\,000.00 \text{ m}^3$$

$$VR_2 = Tr \times Q_2 = 0.50 \times 18\,000 = 9\,000.00 \text{ m}^3$$

$$VR_3 = Tr \times Q_3 = 0.50 \times 25\,000 = 12\,500.00 \text{ m}^3$$

$$VR_4 = Tr \times Q_4 = 0.50 \times 32\,000 = 16\,000.00 \text{ m}^3$$

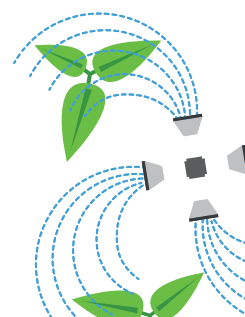
$$VR_5 = Tr \times Q_5 = 0.50 \times 28\,000 = 14\,000.00 \text{ m}^3$$

Siendo el volumen máximo de 16 000.00 m³ y el mínimo de 9 000.00 m³.

8. Relación de inyección en base a los volúmenes de riego y fertilización

Como puede apreciarse, con el ajuste del tiempo de inyección de los fertilizantes disueltos, se logra uniformizar la relación de inyección para cada una de las válvulas.

$$Ri = \frac{VR_i}{Vf_i} = \frac{15\,800}{117.25} = 127.90$$



$$RI_2 = \frac{VR_2}{Vf_2} = \frac{9\,000}{70.25} = 128.10$$

$$RI_3 = \frac{VR_3}{Vf_3} = \frac{12\,500}{97.75} = 127.90$$

$$RI_4 = \frac{VR_4}{Vf_4} = \frac{16\,000}{125.0} = 128.00$$

$$RI_5 = \frac{VR_5}{Vf_5} = \frac{14\,000}{109.25} = 128.10$$

9. Concentración del nitrógeno a la salida del gotero en cada válvula

La concentración del nitrógeno a la salida del gotero para cada una de las válvulas será de 100 mg L⁻¹.

$$CN_1 = \frac{CNT \times Vf_1}{VR_1 - V_1} = \frac{12\,800 \times 117.25}{15\,000} = 100.00 \text{ mg L}^{-1}$$

$$CN_2 = \frac{CNT \times Vf_2}{VR_2 - V_2} = \frac{12\,800 \times 70.25}{9\,000} = 99.90 \text{ mg L}^{-1}$$

$$CN_3 = \frac{CNT \times Vf_3}{VR_3 - V_3} = \frac{12\,800 \times 97.75}{12\,500} = 100.00 \text{ mg L}^{-1}$$

$$CN_4 = \frac{CNT \times Vf_4}{VR_4 - V_4} = \frac{12\,800 \times 125.0}{16\,000} = 100.00 \text{ mg L}^{-1}$$

$$CN_5 = \frac{CNT \times Vf_5}{VR_5 - V_5} = \frac{12\,800 \times 109.25}{14\,000} = 99.90 \text{ mg L}^{-1}$$

10. Peso del nitrógeno aportado al suelo a través de cada gotero

El peso del nitrógeno aportado a través de cada gotero es de 80 mg para los diferentes tiempos de inyección de los fertilizantes.

$$PGF_1 = Qe \times Tf_1 \times ppm_1 = 1.6 \times 0.469 \times 106.7 = 80.06 \text{ mg}$$

$$PGF_2 = Qe \times Tf_2 \times ppm_2 = 1.6 \times 0.281 \times 177.8 = 79.94 \text{ mg}$$

$$PGF_3 = Qe \times Tf_3 \times ppm_3 = 1.6 \times 0.391 \times 128.0 = 80.08 \text{ mg}$$

$$PGF_4 = Qe \times Tf_4 \times ppm_4 = 1.6 \times 0.5 \times 100.0 = 80.00 \text{ mg}$$

$$PGF_5 = Qe \times Tf_5 \times ppm_5 = 1.6 \times 0.437 \times 114.3 = 79.92 \text{ mg}$$



Anexo 7. Cálculo de las ecuaciones ajustadas con el peso de los fertilizantes.

A continuación, se presentan las ecuaciones simplificadas para el cálculo del peso de los fertilizantes para preparar una disolución.

Nitrato de calcio

La información del nitrato de calcio se presenta en la Tabla 74.

Tabla 74. Información técnica del nitrato de calcio (Fernalcal).

Fertilizantes	Nitrato de calcio
Formulación	$5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Pureza	90.00%
Peso molecular	1 080.712 gramos
Aporte nitrógeno	15.5564%
Aporte calcio	18.5433%
Relación ppm	$\text{N} = 0.8389 \times \text{Ca}$

Fuente: Autoría propia.

$$\text{Nitrato de calcio} = 7.1425 \times 10^{-6} \times \text{C Cfg} \times \text{RI} \times \text{V} \quad (\text{A7.1})$$

$$\text{N} = \text{Nitrato de calcio} \times 0.14 \quad (\text{A7.2})$$

$$\text{Ca} = \text{Nitrato de calcio} \times 0.1669 \quad (\text{A7.3})$$

En las ecuaciones, el peso del nitrato de calcio está en kg; RI, es la relación de inyección; V es el volumen en el cual se disolverá el fertilizante y CFG es la concentración deseada del nitrógeno a la salida del gotero (ppm, mg L^{-1}); N, es el peso del nitrógeno (kg) y Ca el peso del calcio (kg).

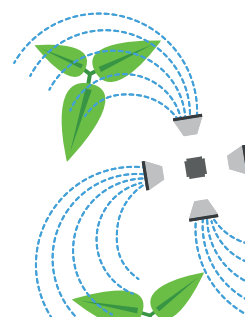
Ejemplo, si RI = 150, V = 250 litros, el peso del nitrato de calcio para obtener una concentración del nitrógeno a la salida del gotero de 100 ppm sería de:

$$\text{Nitrato de calcio} = 7.1425 \times 10^{-6} \times 100 \times 150 \times 250 = 26.78 \text{ kg}$$

$$\text{N} = 26.78 \times 0.14 = 3.75 \text{ kg}$$

$$\text{Ca} = 26.78 \times 0.1669 = 4.469 \text{ kg}$$

Se requiere disolver 26.78 kg de nitrato de calcio en un volumen de 250 litros, para que la concentración del nitrógeno a la salida del gotero sea de 100 ppm, siendo la concentración del calcio de 119.2 ppm; el peso del nitrógeno total aportado es de 3.75 kg y calcio de 4.469 kg.



Nitrato de amonio

La información del nitrato de amonio se presenta en la Tabla 75.

Tabla 75. Información técnica del nitrato de amonio.

Fertilizantes	Nitrato de calcio
Formulación	$\text{NO}_3(\text{NH}_4)$
Pureza	98.00%
Peso molecular	80.052 gramos
Aporte nitrógeno	35.00%

Fuente: Autoría propia.

$$\text{Nitrato de amonio} = 2.9154 \times 10^{-6} \times \text{Cfg} \times \text{RI} \times \text{V} \quad (\text{A7.4})$$

$$\text{N} = \text{Nitrato de amonio} \times 0.343 \quad (\text{A7.5})$$

En la Ecuación A4.4, el peso del nitrato de amonio está en kg.

Ejemplo, si RI = 150, V = 250 litros, el peso del nitrato de amonio para obtener una concentración del nitrógeno a la salida del gotero de 100 ppm sería de:

$$\text{Nitrato de amonio} = 2.9154 \times 10^{-6} \times 100 \times 150 \times 250 = 10.93 \text{ kg}$$

$$\text{N} = 10.93 \times 0.343 = 3.749 \text{ kg}$$

Se requiere disolver 10.93 kg de nitrato de calcio en un volumen de 250 litros, para que la concentración del nitrógeno a la salida del gotero sea de 100 ppm; el peso del nitrógeno total aportado es de 3.749 kg.

Fosfato mono amónico

La información del fosfato mono amónico se presenta en la Tabla 76.

Tabla 76. Información técnica del fosfato mono amónico.

Fertilizantes	Nitrato de calcio
Formulación	$(\text{NH}_4) \text{H}_2\text{PO}_4$
Pureza	98.00%
Peso molecular	115.028 gramos
Aporte nitrógeno	26.92%
Aporte fósforo	12.19%
Relación ppm	$\text{N} = 2.2094 \times \text{P}$

Fuente: Autoría propia.



$$\text{Fosfato mono amónico} = 3.7905 \times 10^{-6} \times \text{Cfg} \times \text{RI} \times \text{V} \quad (\text{A7.6})$$

$$\text{N} = \text{Fosfato mono amónico} \times 0.2638 \quad (\text{A7.7})$$

$$\text{P} = \text{Fosfato mono amónico} \times 0.1195 \quad (\text{A7.8})$$

En las ecuaciones, el peso del fosfato mono amónico está en kg.

Ejemplo, si RI = 150, V = 250 litros, el peso del fosfato mono amónico para obtener una concentración del nitrógeno a la salida del gotero de 100 ppm sería de:

$$\text{Fosfato mono amónico} = 3.7905 \times 10^{-6} \times 100 \times 150 \times 250 = 14.21 \text{ kg}$$

$$\text{N} = 14.21 \times 0.2638 = 3.7486 \text{ kg}$$

$$\text{P} = 14.21 \times 0.1195 = 1.698 \text{ kg}$$

Se requiere disolver 14.21 kg de fosfato mono amónico en un volumen de 250 litros, para que la concentración del nitrógeno a la salida del gotero sea de 100 ppm, siendo la concentración del fósforo de 45.26 ppm; el peso del nitrógeno total aportado es de 3.7486 kg y fósforo de 1.698 kg.

Fosfato mono potásico

La información del fosfato mono potásico se presenta en la Tabla 77.

Tabla 77. Información técnica del fosfato mono potásico.

Fertilizantes	Nitrato de calcio
Formulación	KH_2PO_4
Pureza	100.00%
Peso molecular	136.10 gramos
Aporte potasio	28.60%
Aporte fósforo	22.70%
Relación ppm	$\text{K} = 1.26 \times \text{P}$

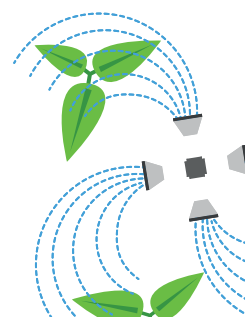
Fuente: Autoría propia.

$$\text{Fosfato mono potásico} = 4.4 \times 10^{-6} \times \text{Cfg} \times \text{RI} \times \text{V} \quad (\text{A7.9})$$

$$\text{K} = \text{Fosfato mono potásico} \times 0.286 \quad (\text{A7.10})$$

$$\text{P} = \text{Fosfato mono potásico} \times 0.227 \quad (\text{A7.11})$$

En las ecuaciones, el peso del fosfato mono potásico está en kg.



Ejemplo, si RI = 150, V = 250 litros, el peso del fosfato mono potásico para obtener una concentración del fósforo a la salida del gotero de 20 ppm sería de:

$$\text{Fosfato mono potásico} = 4.4 \times 10^{-6} \times 20 \times 150 \times 250 = 33 \text{ kg}$$

$$K = 33.0 \times 0.286 = 9.44 \text{ kg}$$

$$P = 33 \times 0.227 = 7.49 \text{ kg}$$

Se requiere disolver 33.0 kg de fosfato mono potásico en un volumen de 250 litros, para que la concentración del fósforo a la salida del gotero sea de 20 ppm, siendo la concentración del potasio de 25.20 ppm; el peso del fósforo aportado es de 7.49 kg y de potasio de 9.44 kg.

Sulfato de potasio

La información del sulfato de potasio se presenta en la Tabla 78.

Tabla 78. Información técnica del sulfato de potasio.

Fertilizantes	Nitrato de calcio
Formulación	K ₂ SO ₄
Pureza	92.60%
Peso molecular	174.26 gramos
Aporte potasio	44.87%
Aporte azufre	18.40%
Relación ppm	K = 2.4386 x S

Fuente: Autoría propia.

$$\text{Sulfato de potasio} = 2.4086 \times 10^{-6} \times \text{Cfg} \times \text{RI} \times \text{V} \quad (\text{A7.12})$$

$$K = \text{Sulfato de potasio} \times 0.4155 \quad (\text{A7.13})$$

$$S = \text{Sulfato de potasio} \times 0.170 \quad (\text{A7.14})$$

El peso del sulfato de potasio, en las ecuaciones, está en kg.

Ejemplo, si RI = 150, V = 250 litros, el peso del sulfato de potasio para obtener una concentración del potasio a la salida del gotero de 50 ppm sería de:

$$\text{Sulfato de potasio} = 2.4068 \times 10^{-6} \times 50 \times 150 \times 250 = 4.51 \text{ kg}$$

$$K = 4.51 \times 0.4155 = 1.874 \text{ kg}$$

$$S = 4.51 \times 0.170 = 0.767 \text{ kg}$$

Se requiere disolver 4.51 kg de sulfato de potasio en un volumen de 250 litros, para que la concentración del potasio a la salida del gotero sea de 50 ppm, siendo la concentración del potasio de 20.50 ppm; el peso del potasio total aportado es de 1.874 kg y azufre de 0.767 kg.



Nitrato de potasio

La información del nitrato de potasio se presenta en la Tabla 79.

Tabla 79. Información técnica del nitrato de potasio (Fernitrok).

Fertilizantes	Nitrato de calcio
Formulación	13.5-0-45
Pureza	100.00%
Peso molecular	45.00%
Aporte nitrógeno	37.36%
Aporte fósforo	13.50%
Relación ppm	$K = 2.7674 \times N$

Fuente: Autoría propia.

$$\text{Nitrato de potasio} = 7.4074 \times 10^{-6} \times \text{Cfg} \times \text{RI} \times \text{V} \quad (\text{A7.15})$$

$$N = \text{Nitrato de potasio} \times 0.135 \quad (\text{A7.16})$$

$$K = \text{Nitrato de potasio} \times 0.3736 \quad (\text{A7.17})$$

En la Ecuación A8.15, el peso del nitrato de potasio está en kg.

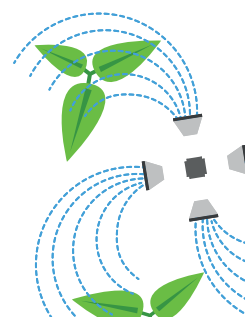
Ejemplo, si RI = 150, V = 250 litros, el peso del nitrato de potasio para obtener una concentración del nitrógeno a la salida del gotero de 100 ppm sería de:

$$\text{Nitrato de potasio} = 7.4074 \times 10^{-6} \times 100 \times 150 \times 250 = 27.78 \text{ kg}$$

$$N = 27.78 \times 0.135 = 3.75 \text{ kg}$$

$$K = 27.78 \times 0.3736 = 10.38 \text{ kg}$$

Se requiere disolver 27.78 kg de nitrato de potasio en un volumen de 250 litros, para que la concentración del nitrógeno a la salida del gotero sea de 100 ppm; el peso del nitrógeno total aportado es de 3.75 kg y del potasio de 10.38 kg.



ISBN: 978-9942-22-626-6



**Instituto Nacional de
Investigaciones Agropecuarias**



@iniapec



@iniapecuador



@iniapecuador

www.iniap.gob.ec