



Sondas de CE de flujo en un equipo automático de fertirrigación, destinadas a la lectura del agua clara (sin fertilizantes) y a la lectura de CE de la solución nutritiva de salida

## Fertirrigación

# Fundamentos teóricos de la conductividad eléctrica

*Se define teóricamente algunos de los parámetros de la aplicabilidad de la conductividad eléctrica CE a equipos automáticos de fertirrigación*

**Antonio L. Alarcón Vera**

*Dpto. Química Agrícola, Geología y Edafología,  
Universidad de Murcia*

El término fertirrigación es ya de uso cotidiano entre las personas vinculadas a la agricultura intensiva, y sobre su concepto, que engloba la nutrición hídrica y mineral de los cultivos, se concentra buena parte de los avances técnicos y tecnológicos que sustentan la revolución que en la actualidad está aconteciendo en la agricultura española, y que consiste en la aplicación a gran escala de la electrónica y la informática a los sistemas de cultivo.

La técnica de la fertirrigación involucra el empleo de determinados parámetros físico-químicos, la mayor parte de ellos conocidos intuitivamente por parte de la gente que los maneja, pero que muy pocos conocen de manera exhaustiva.

Bajo mi punto de vista, resulta interesante que los técnicos que desarrollan su labor en este campo, conozcan los fundamentos teóricos de estos parámetros para que después puedan realizar una más correcta aplicación e interpretación práctica de los mismos.

En este artículo y en otros sucesivos, se pretende definir teóricamente algunos de los referidos parámetros tales como conductividad eléctrica y pH, así como encuadrar su significado agronómico en el sistema suelo/sustrato-planta y su aplicación práctica en la agricultura intensiva.

### Conductividad eléctrica

En general, el flujo de electricidad a través de un conductor es debido a un transporte de electrones. Según la forma de llevarse a cabo este transporte, los conductores eléctricos pueden ser de dos tipos: conductores metálicos o electrónicos y conductores iónicos o electrolíticos.

A este segundo tipo pertenecen las disoluciones acuosas. En ellas la conducción de electricidad al aplicar un campo eléctrico se debe al movimiento de los iones en disolución, los cuales transfieren los electrones a la superficie de los electrodos para completar el paso de corriente.

La conductividad eléctrica (CE) de una disolución puede definirse como la aptitud de ésta para transmitir la corriente eléctrica, y dependerá, además del voltaje aplicado, del tipo, número, carga

y movilidad de los iones presentes y de la viscosidad del medio en el que éstos han de moverse. En nuestro caso, este medio es agua, y puesto que su viscosidad disminuye con la temperatura, la facilidad de transporte iónico o conductividad aumentará a medida que se eleva la temperatura.

Según la ley de Ohm, cuando se mantiene una diferencia de potencial (E), entre dos puntos de un conductor, por éste circula una corriente eléctrica directamente proporcional al voltaje aplicado (E) e inversamente proporcional a la resistencia del conductor (R).  $I=E/R$

En disoluciones acuosas, la resistencia es directamente proporcional a la distancia entre electrodos (l) e inversamente proporcional a su área (A):  $R= \rho \cdot l/A$

Donde  $\rho$  se denomina resistividad específica, con unidades  $\Omega \cdot \text{cm}$ , siendo su inversa ( $1/\rho$ ), la llamada conductividad específica ( $\kappa$ ), con unidades  $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  o mho/cm (mho, viene de ohm, unidad de resistencia, escrito al revés).

En términos agronómicos, cuando medimos la CE de un agua de riego, una disolución fertilizante, un extracto acuoso de un suelo, etc., determinamos la conductividad específica ( $\kappa$ ) de dicha disolución. Actualmente se emplea la unidad del SI, siemens (S), equivalente a mho; y para trabajar con números más manejables se emplean submúltiplos:

$$1 \text{ mS/cm} = 1 \text{ dS/m} = 1000 \text{ (S/cm)} = 1 \text{ mmho/cm}$$

Como la CE varía según la temperatura de medida, debe ir siempre acompañada de la temperatura a la que se efectúa la medición, 20°C según la norma AFNOR o 25°C según la norma CEE (CE a 25°C  $\cup$  1.112 x CE a 20°C). Cuando la medida no se realiza a esta temperatura y el conductímetro no posee compensación automática de la misma, se usan unos factores de conversión que existen tabulados para cualquier temperatura.

La conductividad específica de una solución de electrolitos, que es el caso que nos atañe, depende de la concentración de las especies iónicas presentes. Kohlrausch, definió la conductividad equivalente ( $\Lambda$ ) como:

$$\Lambda = \kappa/c^* = \kappa \cdot (1000/c)$$

Donde  $c^*$  es la concentración en equivalentes por  $\text{cm}^3$ , y  $c$  es la concentra-

ción en equivalentes por litro (N). La conductividad equivalente es pues, la conductividad generada por cada meq/l existente en disolución de una especie dada.

La conductividad de una solución es igual a la suma de las conductividades de cada tipo de ión presente. Para una sola sal disuelta, la conductividad equivalente se puede expresar como:  $\Lambda = \lambda_+ + \lambda_-$  donde  $\lambda_+$  es la conductividad equivalente del catión y  $\lambda_-$  la del anión. Así pues, teóricamente sería muy sencillo predecir la CE de una solución conociendo su composición iónica, ya que  $\lambda_+$  y  $\lambda_-$  son constantes que dependen del tipo de ión en cuestión. Para mezclas,  $\Lambda$  debería ser igual a la suma de todas las conductividades equivalentes de cationes y aniones, pero la conductividad equivalente de sales o iones disminuye con el aumento de concentración.

Este fenómeno está directamente relacionado con las fuerzas interiónicas presentes en la solución. Un catión siempre tendrá más aniones en su vecindad que los que le corresponderían por pura distribución de probabilidades; esta atmósfera iónica tiende a frenar la movilidad del ión. Además se comprueba que el descenso de conductividad equivalente con la concentración es mucho más acusado cuando la carga de los iones es mayor. Por esta razón, aguas de riego salobres, donde el componente aniónico principal son los sulfatos unidos a calcio y/o magnesio (todos ellos iones divalentes), presentan CE mucho más bajas de lo esperado a tenor de la cantidad de sales totales disueltas.

Para soluciones más diluidas, la atmósfera iónica empieza a debilitarse, y a dilución infinita las fuerzas interiónicas no influyen sobre la movilidad de los iones, alcanzando la conductividad equivalente su máximo valor:  $\Lambda^\circ = \lambda_+^\circ + \lambda_-^\circ$  siendo  $\Lambda^\circ$  la conductividad equivalente



Distintos tipos de conductímetros o sondas para la medida de la CE

**Cuadro 1:**  
**Conductancias equivalentes iónicas a dilución infinita (mS/cm por cada meq/l) en disoluciones acuosas a 25 °C para los iones más usuales en agronomía**

| Cationes                     | $\lambda^\circ$ | Aniones                                     | $\lambda^\circ$ |
|------------------------------|-----------------|---|-----------------|
| H <sup>+</sup>               | 349.7           | OH <sup>-</sup>                             | 198.0           |
| Na <sup>+</sup>              | 50.1            | Cl <sup>-</sup>                             | 76.3            |
| K <sup>+</sup>               | 73.5            | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                | 71.4            |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 73.5            | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>               | 44.5            |
| Mg <sup>+2</sup>             | 53.0            | CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>               | 69.3            |
| Ca <sup>+2</sup>             | 59.5            | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>               | 80.0            |
|                              |                 | HPO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>              | 33              |
|                              |                 | H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | 33              |

Fuente: Handbook of Chemistry and Physics. David R. Lide, Editor in Chief. 73rd Edition. 1992-1993.

**Cuadro 2:**  
**Diferencia de CE (mS/cm a 25°C) real y teórica sin considerar las fuerzas interiónicas, para cuatro aguas de riego de diferente composición**

| Iones (meq/l)                 | Agua 1 | Agua 2 | Agua 3 | Agua 4 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Ca+2                          | 1.55   | 5.50   | 6.17   | 31.60  |
| Mg+2                          | 0.07   | 4.72   | 9.97   | 24.82  |
| Na+                           | 1.04   | 4.12   | 42.99  | 10.34  |
| K+                            | 0.34   | 0.13   | 1.59   | 0.32   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 1.34   | 2.76   | 4.62   | 8.64   |
| Cl <sup>-</sup>               | 0.83   | 4.18   | 46.90  | 10.46  |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 0.82   | 7.58   | 9.30   | 48.28  |
| CE teórica                    | 362    | 1842   | 7694   | 9057   |
| CE real                       | 323    | 1310   | 5960   | 4360   |

te del electrolito a dilución infinita;  $\lambda_+^\circ$ , la conductividad equivalente a dilución infinita debida al catión y  $\lambda_-^\circ$  la debida al anión.

El cuadro 1 muestra las conductancias equivalentes iónicas a dilución infinita en disoluciones acuosas a 25°C para los iones más usuales en agronomía, expresados en  $\mu\text{S/cm}$  por cada meq/l.

En el cuadro 2 se puede comprobar la diferencia entre la CE real y la teórica (en  $\mu\text{S/cm}$  a 25°C) si no existieran fuerzas interiónicas en el seno de la disolución para cuatro tipos distintos de aguas de riego.

Se puede comprobar como la CE real se aleja de la teórica a medida que hay mayor cantidad de iones en disolución y conforme predominan los divalentes sobre los monovalentes. Asimismo queda claro que, usado directamente, éste no es un buen método para el cálculo de la CE final de una mezcla fertilizante que a veces se hace necesario conocer de antemano. En trabajos sucesivos se verá qué métodos existen para este propósito y cual de ellos es el más preciso.

El aparato necesario para hacer medidas de conductividad es, generalmente, barato y simple. Por esta razón, las medidas de conductividad encuentran gran aceptación en la industria, como una herramienta analítica y también en laboratorios y en proceso de control. Instrumentos compactos y relativamente baratos son equipados con células especiales que leen directamente la conductividad específica, o la traducen a ppm de sales.

Existen tipos de sensores de inserción, flujo y sumersión, que trabajan en sistemas automatizados en continuo para controlar flujos de agua tratada en desmineralizadores, aguas de calderas, circuitos de refrigeración, contaminaciones en ríos y lagos, ósmosis inversa y operaciones similares. Una de ellas son las máquinas de fertirrigación que trabajan a CE final o por incrementos de CE, que han proliferado enormemente en todas las zonas hortícolas de España y que se han hecho imprescindibles en cualquier explotación agraria que pretenda una fertirrigación razonable y eficaz de sus cultivos.