

APTITUD DEL AGUA CALIENTE PARA SU USO EN AGRICULTURA DE REGADÍO

Josep M. Villar Mir¹ e Israel Carrasco Martín²

Resumen:

En este trabajo se considera el suelo como el sumidero más importante para el calor residual industrial. El agua es el refrigerante más utilizado en las plantas productoras de energía para disipar el exceso de energía calorífica industrial. Esta agua, una vez ha realizado su función y con la temperatura más elevada, puede ser reutilizada en agricultura a través del riego.

Se ha realizado una revisión bibliográfica de las experiencias realizadas en todo el mundo sobre los efectos que puede tener sobre los cultivos y algunas propiedades de los suelos el uso del agua calentada.

Cabe destacar que la mayoría de las experiencias presentan resultados favorables. En general, se ha observado una mayor absorción de nutrientes, disponibilidad de nutrientes por mineralización de la materia orgánica y de los restos vegetales, producción de biomasa, producción y tamaño de hojas, y un adelanto de las cosechas. Además se han descrito otros efectos positivos, como su uso en lucha contra heladas, el control de nemátodos y patógenos del suelo, el aumento de la infiltración y conductividad hidráulica del suelo, el aumento de la solubilidad de algunas sales presentes en el suelo, y la reducción de la lixiviación de nitratos.

Sin embargo, también existen algunas experiencias en las que se indican algunos aspectos negativos del uso del agua calentada: el incremento de algunas enfermedades fúngicas en riego con aspersión, la retención de fósforo en el suelo y un incremento de la falta de oxígeno en la atmósfera del suelo en condiciones de exceso de agua.

Se puede concluir que la aptitud del agua calentada en el proceso de refrigeración no disminuye cuando se reutiliza en agricultura, y que el efecto de un agua calentada afecta poco al régimen térmico del suelo.

Palabras clave: agua calentada, riego, calor residual industrial.

INTRODUCCIÓN

El agua es el refrigerante más utilizado en las plantas productoras de energía para disipar el exceso de energía calorífica. La cantidad de calor que tiene que disiparse depende de la eficiencia de la planta, pero, en general, se estiman eficiencias del orden del 50 %. En las plantas denominadas de biomasa, el calor generado por combustión de residuos vegetales se utiliza para calentar agua y producir vapor. El vapor hace girar las turbinas que, unidas a un generador eléctrico, van a producir la energía eléctrica. Para favorecer la condensación del vapor de agua procedente de la turbina, se utiliza el agua de refrigeración. El agua para refrigeración se puede tomar de distintas fuentes, como por ejemplo un canal de riego. En estos casos, el agua utilizada pa-

ra la refrigeración puede ser devuelta al canal de riego con la temperatura más alta, una vez ha realizado su función. En general, la temperatura del agua que vuelve al canal se incrementa entre 5 y 10 °C. El agua a esta temperatura puede almacenarse en balsas para que se enfríe por evaporación y por transferencia de calor sensible (energía calorífica que pasa directamente a la atmósfera), aunque puede ser utilizada directamente para el riego, o para otros usos. La aplicación directa de agua calentada al suelo se considera una forma alternativa de disipar el aumento de temperatura provocado por lo que se denomina calor residual industrial (Rosenberg et al., 1983). El agua calentada puede usarse para aumentar la temperatura de los suelos, y de esta forma obtener mayores crecimientos y rendimientos de los cultivos (Rykboost et al., 1975a). Co-

Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Universidad de Lleida, España. Av. Rovira Roure, 177. 25198. Lleida. Tel: 973-702019

1. Dr. Ingeniero Agrónomo. villar@rektorat.udl.es. 2. Ingeniero Agrónomo. israel.carrasco@macs.udl.es

Artículo recibido el 30 de agosto de 2000, recibido en forma revisada el 30 de marzo de 2001 y aceptado para su publicación el 20 de junio de 2001.

Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

mo se demuestra más adelante, el cambio en la temperatura del suelo, debido a la aplicación de agua calentada, no es muy elevado y, además, se disipa con facilidad, especialmente en suelos de regadío, aumentando el flujo de calor latente que es, en estos casos, el principal componente del balance de energía. Se podría considerar que los suelos son importantes sumideros para el calor residual industrial.

Sin embargo, la pérdida de calor sensible desde los campos regados con agua calentada disminuye con la temperatura del aire; por este motivo, la disipación de calor sensible es menor en verano que en invierno, aunque la mayor energía disponible en verano favorece un aumento del flujo de calor latente (evaporación y transpiración).

Para conocer la aptitud de las aguas utilizadas en centrales productoras de energía, para poder ser reutilizadas, se han realizado distintas experiencias. Hay que destacar que muchas de estas experiencias se realizan en la década de los años 70 en países como los Estados Unidos y Rusia (ex-Unión Soviética). En algunos casos, lo que se ha evaluado es el efecto de una temperatura elevada en el agua de riego sobre los cultivos. Los objetivos de estas experiencias han sido diversos, desde el uso de agua calentada para ser aplicada directamente en campo a la realización de experimentos relacionados con la producción de cultivos en invernadero (Carter y Pile, 1982), aprovechando la energía calorífica del agua.

No obstante, la producción científica en este ámbito no parece muy extensa, tal como lo demuestra el escaso número de publicaciones encontradas. Además, los objetivos y las condiciones de las experiencias son muy diferentes. En muchos casos, los ensayos se han realizado en parcelas experimentales, donde el agua se utilizaba para calentar el suelo haciéndola circular a través de tubos enterrados en el suelo. Como se demuestra más adelante, con los cálculos energéticos efectuados, en los estudios para analizar el efecto de una mayor temperatura del suelo en la producción de cultivos se recurre al uso de tubos para obtener una mejor difusión energética, ya que la aplicación directa del agua de riego no permitiría un control exhaustivo del ensayo.

Si se analiza la influencia de la temperatura del agua en la temperatura final de un suelo agrícola, ésta no es tan importante como pudiera pensarse en un principio, debido a las capacidades de

calor del agua y de los componentes del suelo, y a los volúmenes que estamos comparando. Al final del presente trabajo se presentan los cálculos energéticos que permiten analizar y evaluar este efecto.

Wierenga et al. (1971) (citado por Rosenberg et al., 1983) consideran que no hay efectos biológicos negativos en la utilización de agua calentada. Hay que destacar, no obstante, de que los experimentos los realizó con agua a 29 °C.

Si se quiere evaluar la aptitud de un agua para el riego, considerando únicamente la variable temperatura, deberemos fijarnos en su efecto más directo que será en este caso sobre la temperatura del suelo, ya que el agua de riego se mezclará con la matriz del suelo, modificando su temperatura.

La temperatura del suelo afecta al crecimiento de las raíces y también afecta al crecimiento y desarrollo del sistema vegetativo aéreo, sobretodo en las fases iniciales. Además de la temperatura, tenemos otros factores abióticos que afectan al crecimiento de raíces como son el agua, el oxígeno, la disponibilidad de nutrientes, la estructura del suelo y la penetración de la luz (Bowen, 1991; citado por Burke y Upchurch (1995)). En muchas ocasiones, esto dificulta la realización de los experimentos, ya que deben controlarse todos los factores o, por lo menos, éstos no deberían afectar al experimento en cuestión.

Para identificar las diferentes sensibilidades de las especies a la temperatura del suelo, y poder definir una temperatura óptima para el desarrollo de las raíces, se ha utilizado en varias ocasiones la tasa de elongación de raíces. En otros casos la sensibilidad se ha evaluado según la capacidad de germinación de las distintas especies cultivadas. Si se observan los valores de algunas temperaturas óptimas de germinación de cultivos, que se discuten más adelante, como el pepino (*Cucumis sativus* L.): 20-35 °C (Maroto, 1995); la col (*Brassica oleracea* L.): 4,5-38 °C (Maroto, 1995); la remolacha (*Beta vulgaris* L.): 25 °C (Maroto, 1995); las judías verdes (*Phaseolus vulgaris* L.): 25 °C (Association of Official Seed Analysts, 1970); la judía de Lima (*Phaseolus lunatus* L.): 18 °C o superior (Knott, 1955 y Thompson y Kelley, 1957; citados por Rykbost et al., 1975b), se puede considerar que éstas son relativamente altas. Para cultivos como el maíz (*Zea mays* L.) (planta tipo C4), la temperatura óptima de germinación puede ser incluso superior.

El crecimiento de raíces puede verse limitado tanto por temperaturas bajas como por temperaturas altas, dependiendo de la especie. Es importante destacar que, en general, la temperatura óptima para el crecimiento de las raíces es inferior a la temperatura óptima para el crecimiento de la parte aérea. A continuación, se indican las temperaturas óptimas, según distintos autores y citado por Marschner (1995), para el trigo (*Triticum aestivum* L.) (25 °C) y para la patata (*Solanum tuberosum* L.) (15-25 °C). Marschner (1995), también indica que hay grandes diferencias entre variedades, y que la información disponible sobre el efecto de elevadas temperaturas sobre el crecimiento de raíces es muy escasa. Esta observación es importante porque el manejo de las variedades adecuadas al ambiente debe ser un criterio agronómico a tener en cuenta.

En el presente trabajo, se recogen las experiencias en el uso de agua calentada para la agricultura, y publicadas, en revistas científicas, en los últimos 30 años. Se han utilizado las bases de datos Agrícola y CAB Abstracts.

EXPERIENCIAS CON RESULTADOS POSITIVOS

En este apartado, se recogen algunas experiencias realizadas con agua calentada. En todas ellas, se presentan resultados favorables y conclusiones positivas al analizar el efecto del agua calentada sobre la producción de los diferentes cultivos. En general, se ha observado una mayor absorción de nutrientes por parte de los cultivos, una mayor disponibilidad de nutrientes por mineralización de la materia orgánica y de los restos vegetales, una mayor producción de biomasa (materia seca), una mayor producción y tamaño de hojas, mayores rendimientos, y un adelanto de las cosechas. En general hay que considerar todos estos efectos como positivos. En cualquier caso, habrá que considerarlos como efectos potenciales. Su influencia real en una zona determinada dependerá del tipo y características de los suelos, de la especie y variedad cultivada, de la temperatura final del agua de riego, e incluso de aspectos como las características del mercado (ventaja o no de un potencial adelanto de la cosecha).

Absorción de nutrientes

El riego se utiliza para, entre otros posibles objetivos, maximizar los rendimientos de los cultivos, anulando los efectos, muy diversos, del estrés

hídrico. Uno de los efectos que produce el riego es la disminución de temperatura del suelo, afectando al sistema radicular (Burke y Upchurch, 1995). La temperatura del suelo y del agua de riego también afecta a la absorción de nutrientes. En una experiencia con arroz en Pakistán, se comparaba la absorción de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y zinc (Zn) con dos tratamientos de temperatura. Un tratamiento era de baja temperatura (temperatura del suelo a 16,5-20 °C y temperatura del agua de riego a 20-24 °C). El otro tratamiento era de mayor temperatura (temperatura del suelo a 24,5-27 °C y temperatura del agua de riego a 26,5-29 °C). Los autores (Zia et al., 1994), observaron que la absorción de estos nutrientes disminuía significativamente con el tratamiento de baja temperatura. Los autores concluyen que una temperatura más elevada del suelo y del agua de riego, hasta 29 °C en su experiencia, favorece la absorción de nutrientes.

Hay que destacar que las reacciones químicas del suelo son muy dependientes de la temperatura ($Q_{10} \approx 2$; Q_{10} es el cambio en el ritmo de las reacciones impuesto por un cambio de 10 °C de temperatura). En experiencias con raíces de maíz (Bravo y Uribe, 1981; citado por Marschner, 1995), la absorción de los iones P y K aumentaba con la temperatura. En el caso del fósforo, los valores más altos se producen a temperaturas próximas a 40 °C y, en el caso del potasio, a temperaturas próximas a 30 °C. Tisdale et al. (1985), también citan experiencias de absorción de potasio que se ve favorecido por un incremento de la temperatura del suelo.

La mineralización de la materia orgánica del suelo y de los restos de las plantas cultivadas se verá estimulada por el aumento de temperatura, ya que hay una influencia directa sobre la actividad biológica en general. La actividad biológica se verá afectada en distinto grado según el óptimo de temperatura de cada proceso (Tisdale et al., 1985).

Crecimiento y rendimiento de los cultivos

Se han realizado experimentos con agua caliente para estudiar el efecto de la temperatura del suelo en la ontogenia de los cultivos. Bollero et al. (1996) han estudiado el efecto de la temperatura del suelo en la ontogenia del cultivo de maíz, en un experimento de dos años, y en una zona donde las temperaturas de primavera dificultan el desarrollo temprano del maíz. La temperatura del suelo, en esta experiencia, se mantenía 5 °C por encima de la temperatura del suelo ambiente. Los resultados fueron de un rendimiento significativamente mayor en

los tratamientos con agua caliente, con un aumento de 0,14 Mg/ha-1C-1. Los mismos autores indican el efecto beneficioso del aumento de la temperatura del suelo, especialmente en primavera, cuando se utilizan técnicas de cultivo de conservación del suelo (cultivo mínimo o reducido y no cultivo).

Tal como se ha indicado con anterioridad, el calor residual presente en el agua (25-40 °C) procedente de las centrales generadoras de energía se ha propuesto para calentar los suelos. Rykboost et al. (1975a,b) condujeron experimentos para determinar el efecto del calentamiento de los suelos en las tasas de crecimiento y en el rendimiento de varios cultivos extensivos, entre ellos el maíz, y varios cultivos hortícolas como las judías verdes, la judía de Lima, el tomate (*Lycopersicon lycopersicum* (L.) Farwell), el brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck), el pimiento (*Capsicum annuum* L.) y la fresa (*Fragaria virginiana* Duchesne), en Oregón, cerca de Corvallis (EE.UU.). Estos experimentos, también, están recogidos en el libro de Rosenberg et al. (1983). Los resultados obtenidos fueron de un incremento en el rendimiento en grano del maíz del 28 %. En el caso de los cultivos hortícolas, los incrementos de rendimiento obtenidos fueron de menor a mayor los siguientes: judías, 19 %; tomate, 31 %; fresa, 35 %; pimiento, 41 %; judía de Lima, 61 %; brócoli, 113 %. En el caso del tomate, los suelos calentados artificialmente estimularon el crecimiento vegetativo, produciendo plantas más grandes y en consecuencia más frutos por unidad de superficie de suelo. El calentamiento del suelo no afectó al ritmo de maduración del fruto, excepto en la fase inicial de recogida del fruto, ya que el porcentaje de frutos recolectados en la fase inicial fue superior en el suelo calentado artificialmente respecto al total de frutos recolectados. En el caso del brócoli, el calentamiento artificial del suelo produjo plantas más grandes, y con más inflorescencias por unidad de suelo; incluso se observó una mayor uniformidad en el producto. Como conclusiones, estos autores indican que el calentamiento del suelo aumentó el crecimiento de todos los cultivos evaluados.

Ensayos realizados en la Estación de Energía Nuclear de Kursk (localidad rusa cercana a la frontera con Ucrania), para evaluar la influencia del riego de cultivos hortícolas con agua caliente (a 30 °C), dieron resultados muy positivos (Uskov y Martyanov, 1989). Los resultados obtenidos fueron de un aumento en la producción de los distintos cultivos hortícolas evaluados. A continuación se indican los incrementos de producción obtenidos en

el ensayo y expresados en porcentaje: pepino, 47 %; col, 29 %; remolacha (*Beta vulgaris* L.), 60 %; remolacha azucarera (*Beta vulgaris saccharifera* L.), 48 %. Otros resultados de interés fueron que el suelo se calentaba antes en primavera y el crecimiento se prolongaba en otoño. La maduración de los cultivos se adelantaba, e incluso, fue posible una segunda cosecha.

Acutis et al. (1992) estudiaron el efecto de la temperatura del agua de riego en la producción de arroz (*Oryza sativa* L.). Durante dos años compararon el agua de riego del río Po a su temperatura natural, con el agua procedente de una estación de energía nuclear que tenía de promedio una temperatura 8,7 °C más alta. En resumen, se concluye que los rendimientos fueron un 7,15% más altos con el agua calentada. Acutis (1993) presenta un análisis del crecimiento en el que demuestra, para la experiencia correspondiente al año 1987-88, que el uso del agua calentada proporcionó una mayor acumulación de biomasa, una mayor tasa de crecimiento absoluto del cultivo ("Crop Growth Rate", CGR), y un mayor índice de área foliar ("Leaf Area Index", LAI).

Una experiencia interesante con cultivos hortícolas es la de Schiavi et al. (1990). Utilizando el agua residual de una planta de energía termoeléctrica, se calentó el suelo para realizar un experimento con espárragos (*Asparagus officinalis* L.) en campo abierto y bajo túnel. Los cultivares utilizados fueron Darbonne-4 y Minerva. En el tratamiento con agua caliente, se adelantó el ciclo unos 20 días, y se obtuvo un rendimiento medio de 1,1 t ha⁻¹ en condiciones de campo abierto.

Lavado de sales y nitratos

La solubilidad de algunas sales presentes en el suelo aumenta con la temperatura (Porta et al., 1999); principalmente, los sulfatos. Por ejemplo, el sulfato sódico, que es una sal que se presenta con frecuencia en suelos salinos, y que tiene una solubilidad de 50 g L⁻¹ a 0 °C, se incrementa hasta 300 gL⁻¹ a 30 °C. En este sentido el lavado de sales sería más eficiente con una agua calentada y, por tanto, sería beneficioso para la agricultura de regadío, ya que permitiría tener la zona de crecimiento radicular libre de sales.

En una experiencia realizada en Japón (Kanda y Suga, 1998) con lisímetros, para evaluar la temperatura del suelo en el lavado de nitratos, se observó que, en el tratamiento con temperatura del suelo

más alta, disminuía la cantidad de agua de lavado y se absorbía mayor cantidad de nitrógeno, debido a una mayor evapotranspiración. Consecuentemente, la concentración de nitratos en el agua de drenaje era menor en el tratamiento de mayor temperatura.

Protección contra heladas

El Dr. Evans, investigador del Centro de Investigación Agrícola en Prosser, WA, EE.UU., ha ensayado un método de protección contra heladas basado en las aplicaciones de agua caliente (Warner, 1997). La aplicación del agua se realizaba con sistemas de riego por aspersión, por debajo de la cubierta de los árboles frutales. El agua utilizada tenía una temperatura de 65 °C. Para alcanzar esta temperatura, el agua se calentaba artificialmente. En el caso de utilizar aguas de refrigeración, procedente de alguna planta productora de energía, la cantidad de energía necesaria para llevar el agua a los 65 °C sería mucho menor. El riego con aspersores bajo la cubierta vegetal, y con agua caliente, se ha utilizado en árboles frutales y en viña. Para la protección contra heladas, incluso, se han utilizado aguas calentadas a temperaturas de 15,5 °C; la cantidad de energía que libera el agua al enfriarse es muy elevada. Parece evidente que, contra mayor sea la temperatura del agua, menor será la cantidad de agua necesaria, para obtener el mismo grado de protección. El aumento de la temperatura del aire puede llegar a ser de 6 °C.

Control de nemátodos y patógenos del suelo

El agua muy caliente (220-230 °F (105-110 °C)) se ha utilizado en el control de nemátodos (Noling, 1999). Únicamente, se pretende destacar la posibilidad de combinar agua caliente con el uso de plásticos para mejorar la realización de solarizaciones con el fin de desinfectar los suelos. Esta práctica tiene interés en zonas con una agricultura dedicada a la producción de horticultura intensiva.

Aunque no se indican valores para la temperatura del agua, Lodha (1995) sugiere el uso de agua de riego en verano, en zona muy áridas y por su elevada temperatura, para controlar o reducir poblaciones de patógenos en los suelos; concretamente, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cumini* y *Macrophomina phaseolina*.

Infiltración y conductividad hidráulica

Un efecto positivo del aumento de la temperatura del agua es que se reduce su viscosidad (Tabla

1). Duke (1992) evaluó la influencia de la temperatura del agua sobre el aumento de la conductividad hidráulica y la infiltración en riego por surcos. Una temperatura del agua de 22 °C (medida con un termómetro de infrarrojos) provocaba un aumento de la conductividad hidráulica en un 70 %. Los ensayos se realizaron con cultivos de cebolla (*Allium cepa* L.) y de maíz. Este efecto puede ser de gran interés en regadíos con problemas de infiltración.

Tabla 1. Variación de la viscosidad del agua con la temperatura (Campbell, 1985)

Temperatura del agua en °C	Viscosidad del agua en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
0	$1,79 \cdot 10^{-6}$
4	$1,57 \cdot 10^{-6}$
10	$1,31 \cdot 10^{-6}$
20	$1,01 \cdot 10^{-6}$
30	$0,80 \cdot 10^{-6}$
40	$0,66 \cdot 10^{-6}$

EFFECTOS NEGATIVOS

Se han descrito algunos efectos negativos en el uso de agua caliente, en el caso de riegos a presión, relacionados con el desarrollo de enfermedades. En riegos por aspersión, algunas enfermedades pueden verse favorecidas por un incremento de la temperatura del agua. En estos casos, el tiempo necesario para que se produzca una infección disminuye y, por tanto, aumenta el riesgo. El trabajo de Grove y Boal (1991) así lo demuestra para el caso del manzano (cv. Golden Delicious) y del peral (cv. Barlett) con *Phytophthora cactorum*, en un estudio realizado inoculando los frutos con una suspensión de zoosporas de *P. cactorum*.

En un estudio realizado por Scherm y Yang (1996), para estudiar como afectaban distintos factores ambientales al desarrollo de la enfermedad causada por *Fusarium solani* en soja (*Glycine max* (L.) Merr.), obtuvieron los siguientes resultados: la temperatura del suelo influía en el desarrollo de síntomas en las raíces a bajas temperaturas (15 °C), mientras que los síntomas foliares eran más graves a temperaturas del suelo intermedias (22-24 °C). Hay que indicar que, en el desarrollo de esta enfermedad, tenía una gran influencia el régimen de humedad del suelo.

La falta de oxígeno en el suelo por un exceso de agua se ve agravada con un aumento de la temperatura (Marschner, 1995). Sin embargo, este efecto hay que considerarlo cuando hay sales presentes en el suelo. Un correcto manejo del agua de riego y de los suelos, debería evitar este problema.

Un aumento de la temperatura del suelo aumenta la retención de fósforo por parte del suelo (Tisdale et al., 1985), por lo que sería conveniente observar si el fósforo extraído por el método Olsen sufre alguna variación. Sin embargo hay que recordar que el aumento previsto de la temperatura del suelo se reduce a 1-2 °C por riego.

CONCLUSIONES

La aplicación directa del agua de riego al suelo con agua calentada se considera una vía alternativa para disipar el calor residual industrial. El cambio en la temperatura del suelo, debido a la aplicación de agua calentada, es pequeño y puede considerarse bastante transitorio. De hecho, el suelo se considera un importante sumidero para el calor residual industrial.

La aptitud del agua para el riego, desde un punto de vista cualitativo, se puede considerar que no disminuye. La mayoría de experiencias realizadas en cultivos, para evaluar el efecto de un incremento en la temperatura del agua riego, han mostrado resultados positivos, tanto en el desarrollo de sus raíces, como en su desarrollo y en su rendimiento.

En el caso de cultivos sensibles, habrá que realizar un mayor control de posibles enfermedades, aunque el riesgo depende del sistema de riego. En el caso de riegos de superficie, el riesgo de infección es mucho menor. En el caso de utilizar agua calentada, se hace necesario un control y seguimiento de las temperaturas del suelo, así como un seguimiento del ciclo y crecimiento de los cultivos para evaluar posibles efectos que, como se indica en el presente estudio, son en la mayoría de los casos positivos.

REFERENCIAS

- ACUTIS, M., CAVALLERO, A., and CASAROTTI, D. (1992). Effetti della temperatura dell'acqua di irrigazione su una coltura di riso (*Oryza sativa* L.). *Riv. di Agronomia* 26(4), 655-662.
- ACUTIS, M. (1993). Analisi della crescita di cultivar di riso (*Oryza sativa* L.) della subs. *japonica* sottoposte a differenti regimi termici dell'acqua di irrigazione. *Riv. di Agronomia* 27(4), 273-281.
- BOLLERO, G.A., BULLOCK, D.G., and HOLLINGER S.E. (1996). Soil temperature and planting date effects on corn yield, leaf area, and plant development. *Agron. J.* 88, 385-390.
- BOWEN, G.D. (1991). Soil temperature, root growth, and plant function. P.309-330. In: Y. Waisel et al. (eds.), *Plant Roots: The Hidden Half*, 309-330. Marcel Dekker, New York.
- BRAVO, F.P. and URIBE, E.G. (1981). Temperature dependence of the concentration kinetics of absorption of phosphate and potassium in corn roots. *Plant Physiol.* 67, 815-819.
- BURKE, J.J. and UPCHURCH D.R. (1995). Cotton rooting patterns in relation to soil temperatures and the thermal kinetic window. *Agron. J.* 87, 1210-1216.
- CAMPBELL G.S. (1985). *Soil Physics with Basic. Transport Models for Soil-Plant Systems*. Elsevier, New York.
- CARTER, J. and PILE, R.S. (1982). Using heat from power plant condenser cooling water for greenhouse tomato production. *HortSci.* 17(1), 74-76.
- DUKE, H.R. (1992). Water temperature fluctuations and effect on irrigation infiltration. *Trans. ASAE* 35, 193-199.
- GROVE, G.G. and BOAL, R.J. (1991). Influence of temperature and wetness duration on infection of immature apple and pear fruit by *Phytophthora cactorum*. *Phytopathol., American Phytopathology Society* 81, 1465-1471.
- HANKS, R.J. (1992). *Applied Soil Physics. Soil Water and Temperature Applications*. 2nd edition. Springer Verlag, New York.
- KANDA, K. and SUGA, Y. (1998). Effect of irrigation intensity and soil temperature on the nitrate concentration in leaching water from upland soils. *Japon J. of Soil Sci. and Plant Nutr.* 69(3), 249-255.
- KNOTT, J.E. (1955). *Vegetable Growing*. Lea and Febiger, Philadelphia.
- LODHA, S. (1995). Soil solarization, summer irrigation and amendments for the control of *Fusarium oxysporum* F. sp. *cumini* and *Macrophomina phaseolina* in arid soils. *Crop Prot.* 14 (3), 215-219.
- MAROTO, J.V. (1995). *Horticultura herbácea especial*. 4ª edición. Mundi Prensa, Madrid.
- MARSCHNER, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd edition. Academic Press, London.
- NOLING, J.W. (1999). Use of hot water for nematode control: A research summary. University of Florida. Disponible en <http://www.ars.usda.org/is/np/mba/april96/noling.htm>
- PORTA, J, LÓPEZ-ACEVEDO, M. y ROQUERO, C. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 2ª edición. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- ROSENBERG, N.J., BLAD B.L., and VERMA S.B. (1983). *Microclimate. The Biological Environment*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- RYKBOST, K.A., BOERSMA, L., MACK, H.J., and SCHMISSEUR W.E.. (1975a). Yield response to soil warming: Agronomic crops. *Agron. J.* 67, 733-738.
- RYKBOST, K.A., BOERSMA, L., MACK, H.J., and SCHMISSEUR, W.E. (1975b). Yield response to soil warming: Vegetable crops. *Agron. J.* 67, 738-743.

- SCHIAVI, M., ROTINO, G.L., and CASAROTTI, D. (1990). Effects of waste water from electric power plant on the earliness and yield of asparagus. *Acta Hort. Wageningen ISHS* 271, 235-242.
- SCHERM, H., and YANG, X.B. (1996). Development of sudden death syndrome of soybean in relation to soil temperature and soil water matric potential. *Phytopathol.* 86(6), 642-649.
- THOMPSON, H.C. and KELLEY, W.C. (1957). *Vegetable Crops*. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
- TISDALE, S.L., NELSON, W.L., and BEATON, J.D. (1985). *Soil Fertility and Fertilizers*. 4th edition. Macmillan Pub. Co., New York.
- USKOV, A.I. and MARTYANOV, V.I. (1989). Use of warm water irrigation in growing vegetables outdoors. *Soviet Agric. Sci.* 6, 25-29.
- WARNER G. (1997). Hot water could protect trees from cold damage. Disponible en <http://www.goodfruit.com/archive/Feb15-97/current.html>
- WIERENGA, P.J., HAGAN, R.M. and GREGORY, E.J. (1971). Effects of irrigation water temperature on soil temperature. *Agron. J.* 63, 33-36.
- ZIA, M.S., SALIM, M., ASLAM, M., GILL, M.A. and RAHMATULLAH. (1994). Effect of low temperature of irrigation water on rice growth and nutrient uptake. *J. Agron. and Crop Sci.* 173(1), 22-31.

ANEJO: Cálculos energéticos

A modo de ejemplo se presenta el cálculo estimado del incremento de temperatura del suelo al aplicar agua calentada. Se ha supuesto un suelo a 18 °C y un agua a 30 °C, y que hay una cesión de energía del agua al suelo equivalente a 10 °C.

El calor específico del agua es de 4.19 MJm⁻³K⁻¹. Para estimar el calor específico de un suelo (C_v) se puede utilizar el modelo simplificado siguiente (Hanks, 1992).

$$C_v = 0.84\rho_b + 4.19\theta_v \quad (\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1})$$

Donde

ρ_b es la densidad aparente del suelo (Mgm⁻³) y θ_v es el contenido de agua en volumen (m³m⁻³)

Por ejemplo, para un suelo húmedo a 18 °C que tiene un ρ_b de 0.23 y una θ_v de 1.4 Mg m⁻³, la capacidad de calor del suelo se puede estimar como

$$C_v = 0.84\rho_b + 4.19\theta_v = 0.84 \cdot 1.4 + 4.19 \cdot 0.23 = 2.14 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1}.$$

La cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura del suelo hasta 20 °C (desde los 18 °C iniciales) por unidad de superficie hasta una profundidad de 1 m es:

$$Q = 2.14 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1} \cdot 1 \text{ m}^3 \cdot 2 \text{ K} = 4.28 \text{ MJ}$$

para un volumen de 1 m³.

Si suponemos un riego de 80 mm (800 m³ha⁻¹), la energía que contiene el agua por cada grado de temperatura que disminuirá y por unidad de superficie de suelo donde se aplicará (1 m²) es la siguiente:

$$4.19 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1} \cdot 0.08 \text{ m}^3 = 0.335 \text{ MJK}^{-1}$$

A partir de estos datos podemos ver que si se mezcla un suelo a 18°C con un agua a 30°C, la energía que libera el agua al pasar de 30 °C a 20 °C es de 3.35MJ (inferior a la energía necesaria para que el suelo aumente 2 °C, ya que necesitaría 4.28 MJ). Por consiguiente, el suelo aumentaría su temperatura por encima de los 18 °C, quedando en este ejemplo por debajo de los 20 °C.

Evidentemente este ejemplo es muy poco real, ya que el patrón de distribución de la energía, nunca sería uniforme en una profundidad de 100 cm. Para continuar con estos cálculos, podemos considerar una situación más real, que podría ser el considerar una distribución energética del siguiente tipo:

Tabla 2. Modelo teórico de reparto energético de un riego de 80 mm que cede 3,35 MJ al disminuir la temperatura del agua 10 °C.

Profundidad del suelo	Distribución de la energía del agua en el perfil del suelo	Reparto de 3.35 MJ de energía (de acuerdo con la distribución propuesta)	Capacidad de calor de cada capa de suelo (MJK ⁻¹)	Incremento teórico de la temperatura ¹ (°C)
0-5 cm	40 %	1,34 MJ	0,107	12,5
5-10 cm	30 %	1,005 MJ	0,107	9,39
10-20 cm	15 %	0,5025 MJ	0,214	2,34
20-30 cm	10 %	0,335 MJ	0,214	1,56
30-40 cm	4 %	0,014 MJ	0,214	0,065
40-50 cm	1 %	0,00335 MJ	0,214	0,0156
50- 100 cm	0 %	0 MJ	-	-

¹ Suponiendo que no hay ninguna otra transferencia de energía