

**SIMULACION DE FLUJO DE CALOR EN EL SUELO.
EVALUACION DE METODOS NUMERICOS**

Roberto L. Benech Arnold (1)*; Claudio M. Ghersa (1) y Tomás M. Schlichter (2)

(1) Depto. de Ecología, Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires,
Argentina, Av. San Martín 4453. 1417-Buenos Aires.

(2) Secretaría de Agricultura y Ganadería, Buenos Aires, Argentina.
Paseo Colón 982, 1063-Buenos Aires.

RESUMEN

Se presentan 2 modelos matemáticos que simulan el flujo de calor en una columna de suelo. Ambos modelos difieren en la técnica numérica utilizada para la resolución de la ecuación que describe el flujo de calor en función del tiempo y la profundidad. En el trabajo se evalúan ambas técnicas numéricas, considerándose aspectos relacionados al buen ajuste de los datos generados, así como también aspectos operativos.

La condición de contorno de ambos modelos considera como límite superior del sistema a la superficie del suelo. Se propone un tratamiento matemático para calcular la temperatura en superficie en función de la máxima y la mínima diaria del aire, corregida por la cantidad de radiación que llega al suelo. Los resultados generados con ambos métodos fueron muy similares a los valores medidos en el campo.

Para el uso de la temperatura en superficie, los resultados mostraron que la corrección por cantidad de radiación debe ser utilizada en caso de que se quiera conocer la marcha de la temperatura en superficie en días con baja heliofanía.

Palabras clave: Simulación; Temperatura del suelo; flujo de calor.

**SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN SOIL.
EVALUATION OF NUMERICAL METHODS.**

ABSTRACT

Two mathematical models are presented, which simulate heat transfer in soils. Models differ from each other in the numerical method used to solve the equation that describes heat flux as a function of time and depth. Both techniques are evaluated, considering agreement between simulated and observed data, and also some operative aspects.

Both models consider soil surface as an upper boundary of the system. A mathematical technique is described to calculate soil surface temperature as a function of daily maximum and minimum air temperature. The equation is corrected by using quantity of radiation arriving at the soil surface.

The results obtained with both models showed a good agreement with field measured temperature data.

In the case of soil surface temperature, results showed that the correction by quantity of radiation must be used to know soil surface temperature dynamics as a function of mentioned data, in days with low bright sunshine.

Key words: Simulation; Soil temperature; Heat flux.

INTRODUCCION

La temperatura del suelo es uno de los factores desencadenantes de numerosos procesos biológicos que se producen en el medio edáfico. El conocimiento de la dinámica de la temperatura del suelo, y el impacto que sobre ésta, producen elementos tales como los riegos y las labranzas, otorga grandes ventajas para el desarrollo e implementación de prácticas que tiendan a hacer uso de condiciones óptimas de temperatura en el suelo (Allmaras et al., 1964; Olson y Schoeberl, 1970; Griffith et al., 1973; Willis y Anemiya, 1973; Cruse et al., 1980).

El principal impedimento para el acceso a esta información está relacionado con la gran cantidad de tiempo y material necesario para la obtención de datos horarios y a diferentes profundidades. Es por eso que se han desarrollado modelos de simulación que simplifican el problema, haciendo uso de variables fácilmente medibles o estimables. En este sentido, algunos autores han utilizado el conocimiento teórico existente sobre los principios físicos que determinan el flujo de calor en el suelo (Werenga y De Wit, 1970; Hanks et al., 1971; Gupta et al., 1981, 1982). Sin embargo, la imposibilidad de obtener soluciones analíticas de las ecuaciones que describen el transporte de calor en el suelo, hace que estos modelos sean aplicados únicamente mediante la utilización de computadoras. Esas ecuaciones pueden ser resueltas a través de diferentes métodos de integración numérica.

La falta de información sobre la aplicación de estos modelos en nuestro país, así como la inexistencia de trabajos encausados al desarrollo de modelos similares, motivó la realización del presente trabajo, cuyos principales objetivos son: i) presentar 2 modelos construidos a partir de dos diferentes técnicas numéricas, utilizando el primero de ellos una solución propuesta por Werenga y De Wit (1970), y el otro, una propuesta por Hanks et al. (1971); ii) describir la marcha de la temperatura en la superficie del suelo, a partir de la temperatura máxima y mínima del aire, utilizando para ello, datos obtenidos bajo diferentes regímenes de radiación incidente. Sobre la base de los resultados generados a partir de cada uno de los métodos numéricos empleados, se discute su ajuste con datos observados.

Modelo

Considerando que dentro de una columna de suelo, el transporte de calor se hace principalmente por con-

ducción, se puede analizar el fenómeno, partiendo de los siguientes supuestos (De Vries, 1963):

- el flujo de calor es unidimensional en sentido vertical;
- el medio está en reposo, lo que significa que no existen movimientos de masa en escala macroscópica;
- no se genera calor, ni es convertido en otras formas de energía, como por ejemplo, calor latente de vaporización o solidificación.

Si consideramos un cubo dentro del sistema analizado, con sus caras paralelas al eje vertical de la columna, y sus dos caras perpendiculares a temperaturas θ_1 , la superior y θ_2 la inferior, manteniéndose constantes estas temperaturas, se establecerá un flujo de calor de densidad H ($\text{cal cm}^{-2} \text{seg}^{-1}$) igual a:

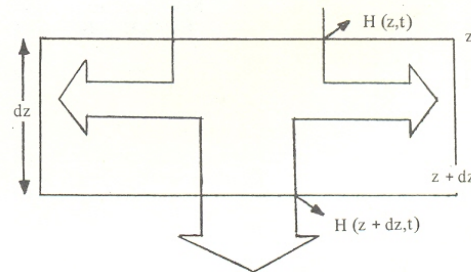
$$H = \frac{\lambda (\theta_2 - \theta_1)}{z} \quad (1)$$

donde z es la longitud de un lado del cubo y λ es la conductividad expresada en $\text{cal seg}^{-1} \text{oC}^{-1} \text{cm}^{-1}$.

Si el espesor z tiende a cero:

$$H = -\lambda \partial \theta / \partial z \quad (2)$$

En el esquema se puede observar como es el flujo que entra y el que sale de un compartimiento horizontal de espesor dz a la profundidad z :



La diferencia $H(z, t) - H(z + dz, t) = (\partial H / \partial z) dz$ (3) o flujo neto, es almacenada en el compartimiento, ocasionando este almacenamiento de calor un cambio

rico volumétrico a la profundidad z y en el tiempo t será igual a:

$$\text{VHTC}(z, t) = \text{VHTC}(z, 0) + \int_t^{t+\Delta t} H_{\text{neto}}(z) * dt \quad (10)$$

La temperatura para cada compartimiento en el tiempo t será:

$$\Theta(z, t) = \text{VHTC}(z, t) / \Delta z * \text{CAPVC} \quad (11)$$

donde CAPVC es la capacidad calórica volumétrica. La ecuación (10) puede integrarse con un método sencillo como el de Euler, o algún otro método más sofisticado como el RKS o el Milne. El programa para este modelo puede ser escrito en CSMP, lenguaje que permite la utilización de cualquiera de los métodos de integración mencionados (IBM, 1972).

El modelo 2 resuelve la ecuación (7) desarrollando un sistema de ecuaciones de forma:

$$\frac{\Theta(z, t) - \Theta(z, t-1)}{\Delta t} = \frac{[\Theta(z-1, t) - \Theta(z, t)] * a_{z-1/2, j}}{\Delta z^2} - \frac{[\Theta(z, t) - \Theta(z+1, t)] * a_{z+1/2, j}}{\Delta z^2} \quad (12)$$

A partir de la ecuación (12) se puede despejar el valor de $\Theta(z, t)$.

El sistema tendrá tantas ecuaciones e incógnitas como profundidades a las que se desea conocer la temperatura. La computadora tendrá que resolver este sistema 24 veces para conocer la marcha horaria de la temperatura en un día.

La condición de contorno que ambos modelos consideran para resolver la ecuación son la superficie de la columna de suelo, y una profundidad a la cual se supone que el flujo de calor hacia afuera de ese compartimiento es igual a 0. Las condiciones iniciales del sistema están dadas por la temperatura inicial de cada compartimiento.

La temperatura en la superficie del suelo se calcula

a partir de la temperatura del aire para ambos modelos (Gupta et al., 1981), utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\Theta(0, t) = \Theta(a, t) + (\Theta_{sx} - \Theta_{ax}) * \sin\left(2 \frac{\pi}{P_1} t x\right) \quad (13)$$

para el período del día en que la temperatura del suelo es mayor que la temperatura del aire, y:

$$\Theta(0, t) = \Theta(a, t) + (\Theta_{sn} - \Theta_{an}) * \sin\left(2 \frac{\pi}{P_2} t x\right) \quad (14)$$

para el período del día en que la temperatura del suelo es menor que la temperatura del aire, donde:

$\Theta(0, T)$ = temperatura en la sup. del suelo en el tiempo t
 $\Theta(a, t)$ = temperatura del aire en el tiempo t
 Θ_{sx} = temperatura máxima en la sup. del suelo
 Θ_{sn} = temperatura mínima en la sup. del suelo
 Θ_{ax} = temperatura máxima del aire
 Θ_{an} = temperatura mínima del aire

P_1 y P_2 es dos veces el tiempo que la temperatura del suelo permanece por encima y por debajo de la del aire respectivamente; tx es el tiempo t (horas) menos el tiempo en el que se cruzaron por última vez las curvas que describen la marcha de la temperatura del suelo y del aire. Los autores que proponen esta metodología consideraron que durante la mitad del día, la temperatura del suelo permanece por debajo de la del aire, y durante la otra mitad, por encima. Este supuesto conduce a errores importantes, por lo que en este trabajo se consideró que la temperatura del suelo permanece durante mayor cantidad de horas por debajo de la temperatura del aire que por encima de la misma. Las temperaturas máximas y mínimas del suelo (Θ_{sx} y Θ_{sn}) se estiman a partir de relaciones con las temperaturas máximas y mínimas del aire obtenidas bajo diferentes regímenes de radiación.

La temperatura del aire puede ser calculada en forma horaria a partir de máximas y mínimas diarias utilizando la metodología propuesta por Gupta et al. (1982)

MATERIALES Y METODOS

El primer grupo de mediciones de temperatura se

de temperatura por unidad de tiempo igual al contenido calórico volumétrico, $C (\partial\theta/\partial t) dz$ (4), donde C es la capacidad calórica volumétrica ($\text{cal cm}^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Igualando (3) y (4):

$$-\partial H/\partial z = C\partial\theta/\partial t \quad (5)$$

Reemplazando por (2):

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\lambda \partial\theta}{\partial z} \right] = C \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (6)$$

Dividiendo ambos términos por C:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{a\partial^2\theta}{\partial z^2} \quad (7)$$

donde "a" es la difusividad térmica igual a λ/C . Si se integra la ecuación (7), se obtiene la temperatura para cualquier valor de t y de z, siempre que z sea distinto de 0. Esta expresión constituye una ecuación diferencial parcial no lineal, cuya solución analítica resulta virtualmente imposible de obtener, considerando las condiciones de contorno del sistema (Hall y Day, 1977). Es por eso que se hace necesario la aplicación de métodos de integración numérica.

Para la construcción de los modelos que se presentan en este trabajo, se concibió al sistema como una columna de suelo dividida en N compartimientos de tamaño finito (DCOM). Además, estos compartimientos se agrupan en otros mayores (SUBCOM), a lo largo de los cuales las propiedades térmicas del suelo permanecen constantes (Fig. 1).

A partir de aquí el Modelo 1 (Wierenga y De Wit, 1970), expresa en forma de ecuación de diferencias las ecuaciones diferenciales 2 y 3:

$$H(z, t) = \frac{(\theta(z, t) - \theta(z-1, t)) \lambda}{\Delta z} \quad (8)$$

donde Δz es la distancia entre puntos medios de 2 com-

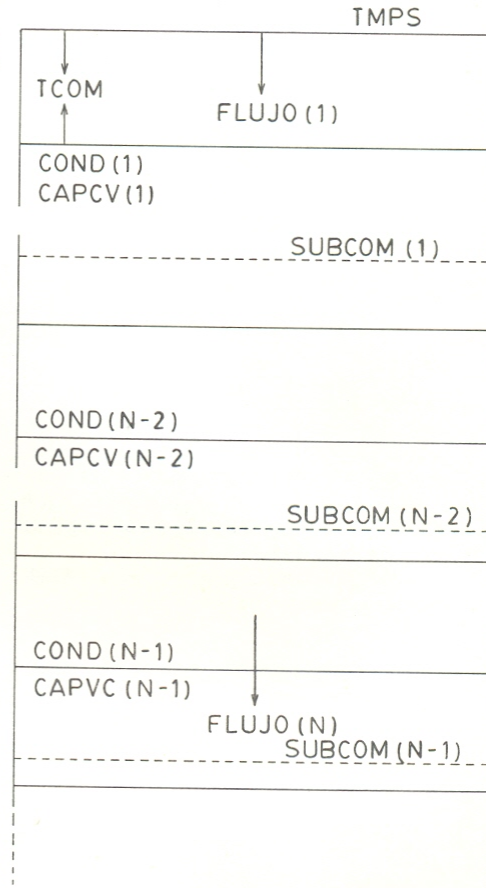


Figura 1. Diagrama del sistema utilizado para simular flujo de calor en una columna de suelo heterogénea.

partimientos adyacentes (cm) e igual a la altura de cada compartimiento, y t el tiempo:

$$\frac{H \text{ neto } (z, t)}{\Delta t} = H(z) - H(z+1) \quad (9)$$

Partiendo de un valor inicial de contenido calórico para cada compartimiento, y utilizando los valores calculados por (8) y (9), se llega a que el contenido caló-

TABLA 1. Parámetros físicos y químicos pertenecientes al suelo estudiado.

PROFUND.	DENS. APARENT.	DENS. PARTIC.	MAT. ORG.	MAT. INORG.	POROSID.
0-10 cm	0.91 g/cm ³	2,65 g/cm ³	0.347 cm ³ /cm ³	0.3087 cm ³ /cm ³	0.6566 cm ³ /cm ³
10-40 cm	1.18 g/cm ³	2.65 g/cm ³	0.03168 cm ³ /cm ³	0.482 cm ³ /cm ³	0.5136 cm ³ /cm ³
40-60 cm	1.20 g/cm ³	2.65 g/cm ³	0.0197 cm ³ /cm ³	0.948 cm ³ /cm ³	0.501 cm ³ /cm ³

realizó sobre un Argialbol típico ubicado en el predio de la Universidad de Luján, Luján, Pcia. de Buenos Aires, durante los meses de Setiembre y Octubre de 1983. Sobre la base de la información obtenida a partir de la descripción del perfil, se extrajeron muestras de suelo a las siguientes profundidades: 0-10 cm., 10-40 cm. y 40-60 cm. De cada muestra se determinó el contenido de materia orgánica (Walkley y Black) y la densidad aparente (método del cilindro), obteniéndose por diferencia la cantidad de materiales inorgánicos.

Estos resultados (Tabla 1), conjuntamente con mediciones del contenido volumétrico de agua, fueron utilizados para estimar la Conductividad Térmica Aparente y la Capacidad Calórica Volumétrica.

La Conductividad Térmica Aparente fue estimada usando la ecuación de De Vries (1963):

$$\lambda = \sum_{i=0}^n k_i * x_i * \lambda_i / \sum_{i=0}^n k_i * x_i \quad (15)$$

donde x_i es la fracción volumétrica de cada componente (Materia Orgánica, Materiales Inorgánicos y Agua), λ_i su conductividad térmica, n es el número de componentes, y k_i es un factor que depende de la forma y la orientación de los gránulos de suelo y de la relación entre las conductividades de los componentes. Los valores de conductividad térmica así obtenidos se consideraron constantes a lo largo de cada día.

La capacidad calórica volumétrica de cada estrato se calculó a partir de los mismos parámetros utilizando la ecuación (De Vries, 1963):

$$C = X_m C_m + X_w C_w + X_o C_o \quad (16)$$

donde C_m , C_w y C_o son las capacidades calóricas volumétricas de los materiales inorgánicos, del agua y de la materia orgánica, respectivamente, y X_m , X_w y X_o son las fracciones volumétricas de cada componente.

Las temperaturas máxima y mínima del suelo (θ_{sx} y θ_{sn}) que se utilizan en las ecuaciones (13) y (14), se obtuvieron a partir de las temperaturas máximas y mínimas del aire. Para ello se midió la temperatura de la superficie del suelo durante setiembre, octubre y noviembre de 1985, en la Fac. de Agronomía (UBA), bajo 4 regímenes de radiación logrados a partir de la utilización de filtros neutros, que dejaban pasar 100%, 50%, 33% y 16% de la radiación respectivamente. De esta manera y mediante análisis de regresión se construyeron curvas que relacionan la temperatura máxima del suelo con la máxima del aire, como así también las mínimas, bajo diferentes grados de cobertura. Se llevó a cabo un segundo grupo de mediciones de temperatura, en la Facultad de Agronomía (UBA), esta vez en columnas de suelo regadas diariamente, y enterradas en el suelo, bajo diferentes coberturas, mediante la utilización de la metodología descripta. Esta segunda serie se realizó durante Febrero de 1986.

En la primera serie de ensayos se midió temperatura a 0 cm., 10 cm., 20 cm., 40 cm. y 60 cm., y en la segunda serie a 0 cm., 3 cm., 6 cm. y 10 cm. En ambos casos se utilizaron sensores LM 335Z (National Semiconductor) conectados a un registrador de 6 canales Hartmann & Braun AR/G 35-7e Arucomp 100, al cual le fue adaptado un intensificador de frecuencia.

RESULTADOS

Las curvas ajustadas entre las temperaturas máximas y mínimas del aire y del suelo, bajo diferentes

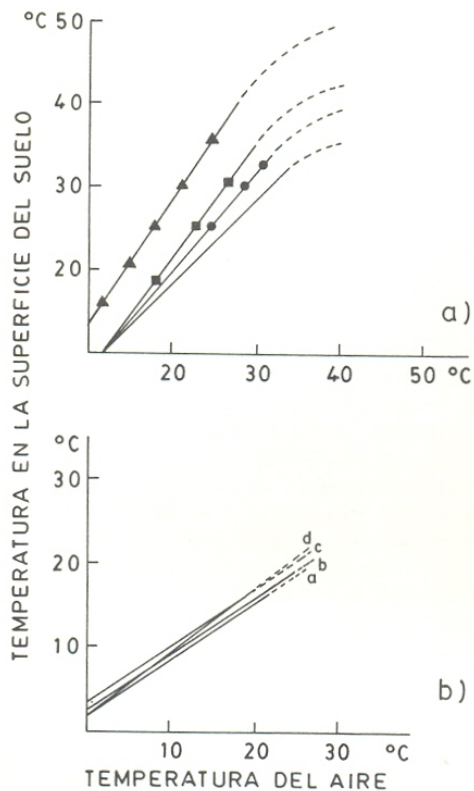


Figura 2. Relación entre temperatura máxima diaria del aire y temperatura máxima diaria en la superficie del suelo (a), y entre temperatura mínima diaria del aire y temperatura mínima en la superficie del suelo (b).
(a) ▲—▲ suelo desnudo; (b) ■—■ 50% rad.; (c) ●—● 35% rad.; (d) ——— 16% rad.

grados de cobertura, se presentan en la Fig. 2. A partir de estas curvas pudieron obtenerse los datos de temperaturas máxima y mínima del suelo (θ_{sx} y θ_{sn}) que se utilizaron en las ecuaciones (13) y (14). En la Fig. 3 se presenta el resultado de la simulación y las mediciones de temperatura a 10 y 20 cm. Se observa que ambos tratamientos numéricos realizaron una buena estimación de la dinámica de la temperatura a 10 cm. de profundidad, y a que las desviaciones con respecto a los valores observados en ningún caso fueron superiores a 1°C. Ambos modelos coincidieron en cuanto al sentido de las desviaciones de los valores calculados con respecto a los medidos, observándose una pequeña so-

breestimación de los valores mínimos del ciclo, y un descenso más brusco de los valores calculados una vez que habían alcanzado un valor máximo. A 20 cm. de profundidad, ambos modelos mostraron un comportamiento diferente.

Los valores calculados con el modelo 2 (Hanks et al., 1971) mostraron un excelente ajuste con las temperaturas observadas, mientras que los calculados con el modelo 1 (Wierenga y De Wit, 1970) se apartaron un tanto de las temperaturas medidas en determinados momentos del ciclo.

La Fig. 4 (a) muestra la dinámica de la temperatura medida en la superficie del suelo sin cobertura, y los valores generados por las ecuaciones (13) y (14). El ajuste fue muy satisfactorio cuando las temperaturas fueron medidas durante días con cielo despejado (Fig. 4a), pero los valores calculados durante un día nublado fueron superiores a los medidos (Fig. 4b). Esta sobreestimación pudo ser corregida cuando se tomó en cuenta la cantidad relativa de radiación que llegó al suelo (Fig. 4b).

La marcha de la temperatura a 2, 4, 6 y 8 cm., según valores calculados por ambos modelos se muestra en la Fig. 5.

En la Fig. 6 se muestran los valores máximos y mínimos medios de temperatura sobre 15 días de medición a diferentes profundidades, con suelo descubierto y con presencia de cobertura. En este caso, donde el suelo fue mantenido permanentemente a capacidad de campo, ambos modelos generaron valores que ajustaron satisfactoriamente con los datos observados.

DISCUSION

El ajuste entre los valores generados por las ecuaciones (13) y (14), y los observados, fue considerablemente bueno. A ello contribuyó probablemente la modificación realizada sobre el número de horas del día en que la temperatura del suelo es mayor que la del aire, con respecto a lo propuesto originalmente por Gupta et al. (1981). Sin embargo, cuando se intentó simular la marcha de la temperatura en superficie durante un día nublado, existió una importante sobreestimación en los valores calculados. Ello se originó en la utilización de curvas que mostraron una relación temperatura aire-temperatura del suelo, obtenida a partir

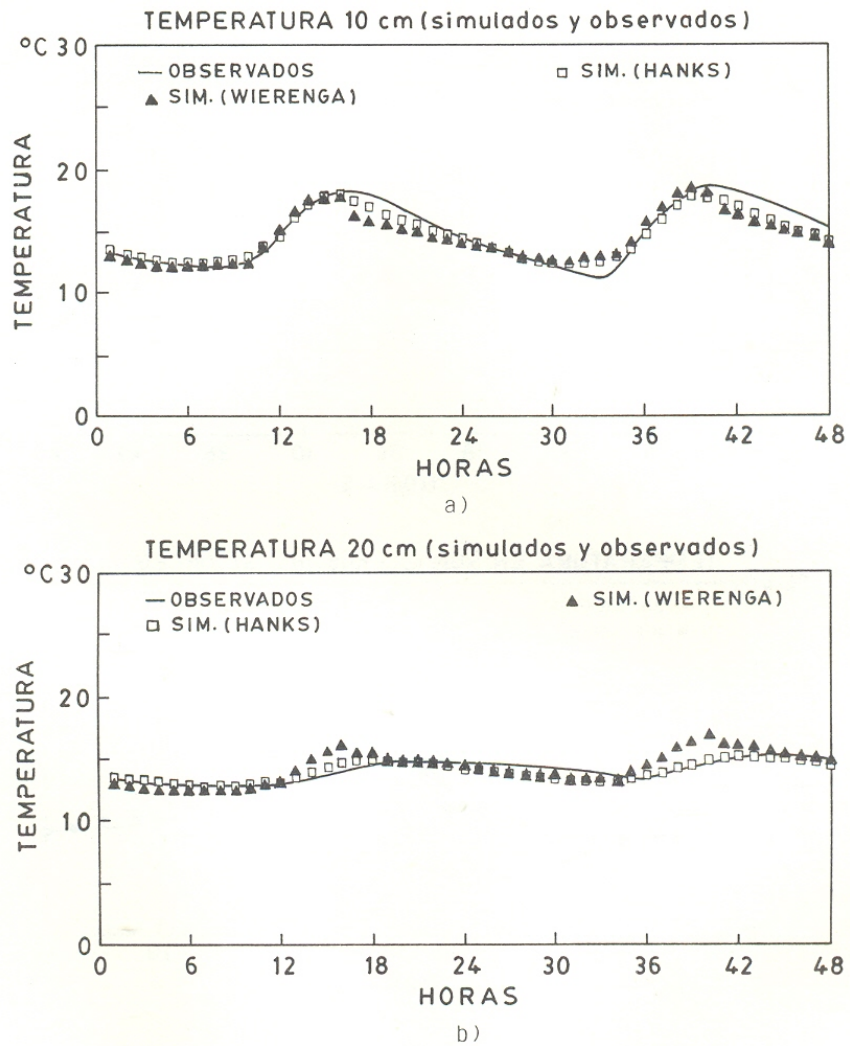


Figura 3. Temperaturas observadas y simuladas con ambas técnicas numéricas (□ Hanks et al.; ▲ Wierenga y De Wit) a 10 cm. (a) y 20 cm. (b).

de una serie de días con alta carga de radiación. La utilización de curvas obtenidas a menores cargas radiantes, permitió un ajuste satisfactorio (Fig. 4b).

Otro autor (Buchan, 1982) predice la temperatura en la superficie del suelo a partir de la integración de todos los flujos que la determinan, radiación incluida.

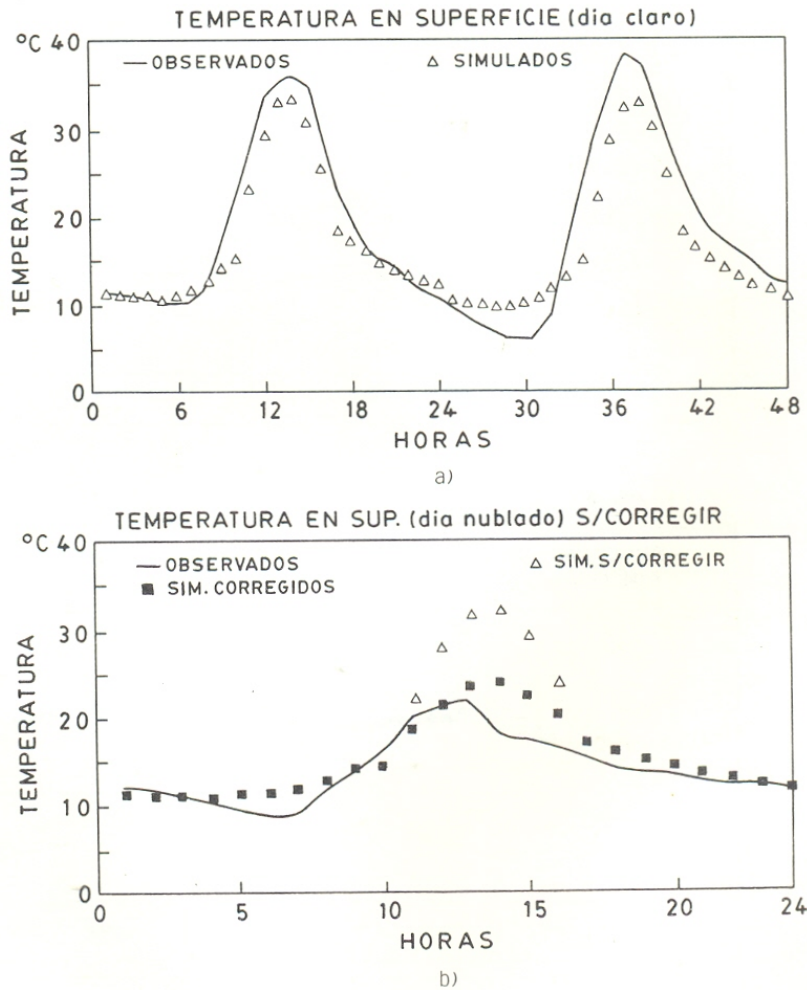


Figura 4. Temperaturas observadas y simuladas en la superficie del suelo para un día claro (a); (b) ídem para un día nublado: Δ sin corrección por radiación; ■ corregido por radiación.

Si bien la utilización de esta metodología constituye una descripción física más rigurosa del fenómeno, consideramos que la predicción de la temperatura en su-

perficie a partir de variables tan fácilmente obtenibles, como son la temperatura máxima y mínima diaria del aire, es suficientemente adecuada.

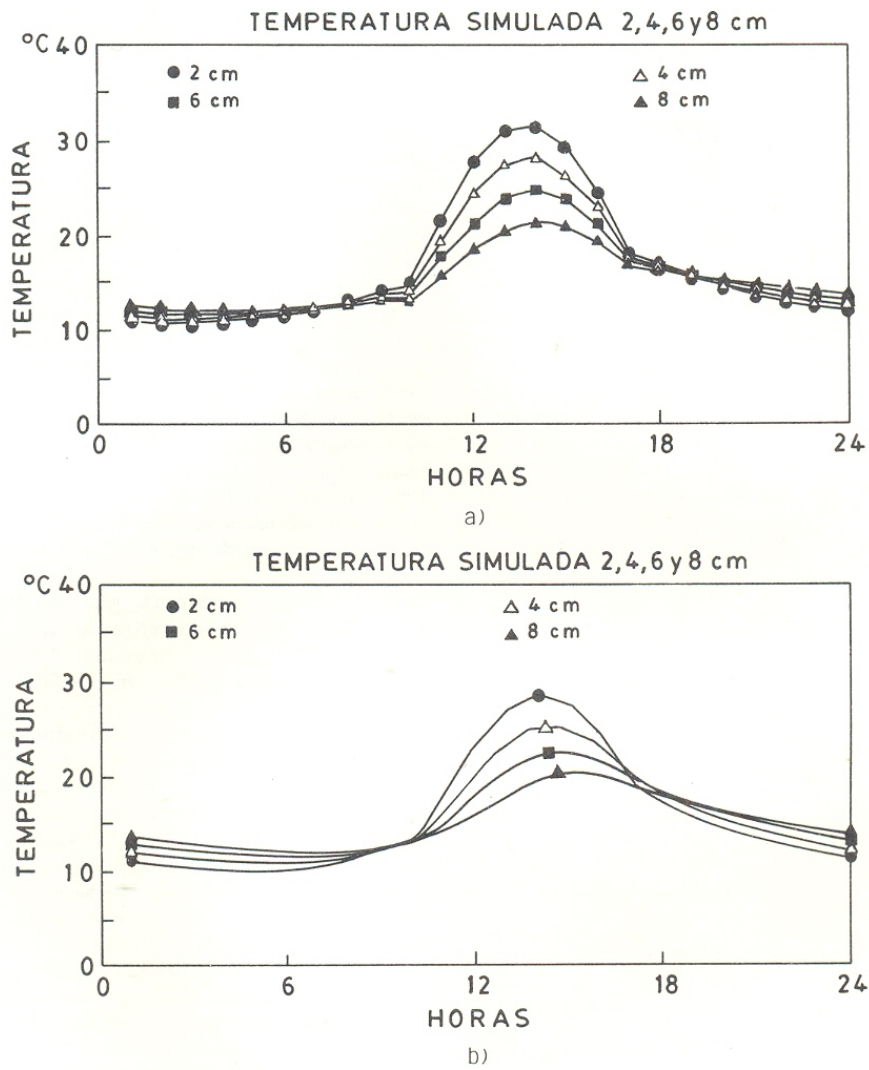


Figura 5. Marcha de la temperatura a 2, 4, 6 y 8 cm. de profundidad simuladas mediante el modelo 1 (a) y el modelo 2 (b).

Los resultados obtenidos resolviendo la ecuación (7) con las dos técnicas numéricas evaluadas, mostraron diferente grado de ajuste con los datos observados,

según el estado hídrico del suelo. En setiembre de 1983, las mediciones de temperatura se efectuaron en un suelo que presentaba valores extremadamente bajos de

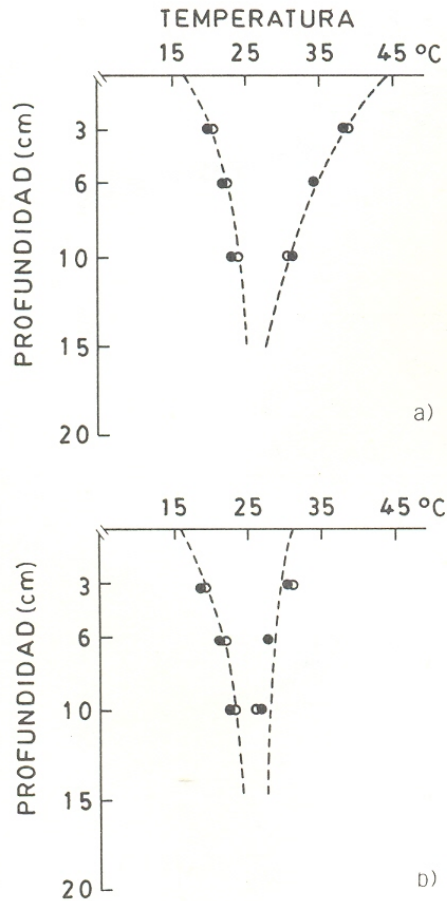


Figura 6. Máximas y mínimas diarias promediadas durante 15 días: . . . observadas y simuladas con ambas técnicas ○ (Hanks et al.) y ● (Wierenga y De Wit). (a) Suelo descubierto y (b) suelo cubierto.

contenido hídrico en los primeros 8 cm. del perfil. Estos valores se ajustaron satisfactoriamente con los calculados para 10 cm. de profundidad mediante ambas técnicas numéricas. En el caso de los calculados para 20 cm., el ajuste fue muy bueno con la técnica de Hanks et al., sufriendo desviaciones los obtenidos a partir de la de Wierenga y De Wit. Esta diferencia en el comportamiento de ambos modelos podría estar relacionada con la diferente sensibilidad que cada uno de ellos presenta a los cambios diarios en la conductividad aparente que ocurren en los suelos secos, que si no son tomados en cuenta, determinan ajustes poco satisfactorios entre temperaturas calculadas y medidas (Wierenga y De Wit, 1970; Hanks et al., 1971).

Los valores obtenidos para 2, 4, 6 y 8 cm. con ambos modelos mostraron algunas diferencias entre ellos.

En el caso del experimento realizado en Febrero de 1986, las columnas de suelo fueron regadas diariamente. Los valores obtenidos con ambas técnicas numéricas, consideradas como promedios de máximas y mínimas durante 15 días, mostraron un ajuste excelente. Esto estaría relacionado con el mayor contenido hídrico del suelo, asegurándose de esta manera, valores relativamente constantes de conductividad aparente en todo perfil.

El buen ajuste obtenido con la simulación de cobertura vegetal muestra a la interceptación de radiación por parte del canopeo, como lo que produce el efecto más importante sobre la temperatura en superficie.

Los modelos construídos a partir de ambas técnicas numéricas constituyen una buena herramienta para conocer la dinámica de la temperatura de un suelo, siempre que se conozcan algunos parámetros físicos de relativamente fácil estimación. Consideramos que estos modelos construídos a partir de la aplicación de los principios físicos que determinan el flujo de calor en el suelo, poseen mucho mayor versatilidad que aquellos construídos sobre la base de largas series de datos meteorológicos (Hasfurther y Burman, 1974; Toy et al., 1978; Cruse et al., 1980). Estos últimos pierden versatilidad, en tanto son utilizados únicamente en las localidades de las cuales provienen esas series de datos.

Desde un punto de vista exclusivamente operativo, consideramos necesario aclarar que la técnica propuesta por Hanks y colaboradores puede ser implementada con una computadora personal, utilizando cualquier lenguaje de programación. En cambio, la técnica propuesta por Wierenga y De Wit es solamente utilizable si se programa en CSMP o en algún otro lenguaje de simulación.

REFERENCIAS

- Allmaras, R.R., W.C. Burrows y E.W. Larson, 1964. Early growth of corn as affected by soil temperature. *Soil Sci. Am. Proc.* 28: 271-275.
- Buchan, G.D., 1982. Predicting bare soil temperature. I. Theory and models for the multi-day mean diurnal variation. *Journal of Soil Science.* 33: 185-197.
- Buchan, G.D., 1982. Predicting bare soil temperature. II. Experimental testing of multi-day models. *Journal of Soil Science.* 33: 199-209.
- Cruse, R.M., D.R. Linden, J.K. Radke y W.E. Larson, 1980. A model to predict tillage effects on soil temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 378-383.
- De Vries, D.A., 1963. Thermal properties of soils. p. 210-235. En W.R. Van Wijk (ed.) *Physics of Plant environment.* North Holland, Amsterdam. 382 pp.
- Griffith, D.R., J.V. Mannering, H.M. Galloway, S.D. Parson y C.B. Richey, 1973. Effect of eight tillage-planting system on soil temperature, percent stand, plant growth, and yield of corn on five Indiana soils. *Agron. J.* 65: 321-326.
- Gupta, S.C., J.K. Radke y W.E. Larson, 1981. Predicting temperatures of bare and residue covered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 405-412.
- Gupta, S.C., J.K. Radke y W.E. Larson, 1982. Predicting temperature of bare and residue covered soils from daily maximum and minimum air temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 372-376.
- Hall, C.A.S. y J. Day, 1977. *Ecosystem modelling in Theory and Practice.* John Wiley & Sons, Inc. New York, 684 pp.
- Hanks, R.J., D.D. Austin y W.T. Ondrechen, 1971. Soil temperature estimation by a numerical method. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 665-667.
- Hasfurther, V.R. y R.D. Burman, 1974. Soil temperature modelling using air temperature as a driving mechanism. *Trans. ASAE* 17: 78-81.
- IBM, 1972. continuous System Modelling Program III (CSMP III). Program reference manual. Program number 5734. X59, IBM, Ontario, Canadá.
- Olson, T.C. y L.S. Schoeberl, 1970. Corn yields, soil temperature and water use with four tillage methods in the western Corn Belt. *Agron. J.* 62: 229-232.
- Toy, T.J., A.J. Kuhaida, Jr. y B.E. Munson, 1978. The prediction of mean monthly soil temperature. *Soil Sci.* 129: 96-104.
- Van Wijk, W.R. y D.A. De Vries, 1963. Periodic temperature variations in an homogeneous soil. p. 102-143. En: Van Wijk, (ed.) *Physic of Plant Environment.* North Holland, Amsterdam. 382 pp.
- Wierenga, W.R. y C.T. De Wit, 1970. Simulation of heat transfer in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 845-848.
- Willis, W.O. y M. Amemiya, 1973. Tillage management principles: soil temperature effects. p. 22-42. En: *Conservating tillage.* Proc. of the National Tillage Conf., 28-30, March 1973. Des Moines, Iowa. Soil Conserv. Soc. Am.