

I. INTRODUCCIÓN	69
II. MATERIAL Y MÉTODOS	72
III. RESULTADOS	72
IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	76
V. AGRADECIMIENTOS	77
VI RESUMEN Y SUMMARY	78
VII BIBLIOGRAFÍA	78

MODELO MACROCLIMATICO DE ESTIMACION DE TEMPERATURAS DEL SUELO

ANGEL RAÚL RODRÍGUEZ *

I. INTRODUCCION

Importancia de las estimaciones de las temperaturas del suelo.

El conocimiento de la temperatura del suelo es de gran significación en agricultura, en particular, en disciplinas como ecología, forestación, patología vegetal y física de suelos.

La temperatura del suelo actúa sobre el crecimiento de las plantas y su distribución geográfica, influyendo asimismo sobre la humedad, aireación, estructura, actividad microbiana y enzimática del suelo, en la descomposición de los residuos orgánicos de los vegetales y en la disponibilidad de nutrientes para los cultivos (Kohnke, 1968).

Es también de gran utilidad para la confección de mapas de temperaturas de suelo. Estos, en comparación con los mapas de temperatura del aire, son extremadamente escasos en la República Argentina. Ellos son muy necesarios en agricultura, ya que pueden contribuir de manera relevante en estudios de distribución geográfica de cultivos, insectos y enfermedades de plantas, como asimismo para determinar la aptitud agrícola de los suelos (C. E. Quellet, 1973).

Las temperaturas invernales de los suelos son importantes en los procesos de desarrollo de los insectos, sin embargo presenta como inconveniente la escasez de sus registros a distintas profundidades (Bonham C. D. y R. E. Fye, 1970).

* Ingeniero Agrónomo, Profesor Titular Interino de la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas y Jefe del Departamento Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba.

La determinación precisa de la época de siembra de varios cultivos depende fundamentalmente de la temperatura del suelo. Esto reviste gran importancia en cereales de cultivo extensivo en nuestro país y más particularmente en cultivos intensivos.

El rendimiento del maíz depende de la temperatura del suelo en el momento de la siembra (Allmarás R. R., Burrows W. C. y Larson W. E., 1964). En Wisconsin, Wang J. Y. 1962, estableció relaciones entre la temperatura media del suelo en los primeros días posteriores a la siembra del maíz y la fecha de maduración del mismo. Con estas relaciones es posible pronosticar con un alto grado de precisión la fecha de maduración, dato éste importante en industrias de conservas y a los efectos de comercialización del grano, entre otros.

La actividad vegetativa de muchas plantas, en particular los árboles frutales, depende de la temperatura del suelo. Es necesario por ejemplo, que la temperatura del suelo alcance y sobrepase los 12°C para que la palmera datilera se desarrolle activamente.

El objetivo del presente trabajo es el de obtener un método que permita estimar la temperatura del suelo, a distintas profundidades, a partir de datos climáticos simples y de fácil disponibilidad en la República Argentina.

Antecedentes:

Numerosos autores han efectuado estimaciones de la temperatura del suelo y/o correlacionado diferentes variables climáticas. Otros, en cambio, han utilizado para tal fin el conocimiento de las propiedades calóricas del suelo. Además hay quienes efectúan dichas estimaciones empleando ambas fuentes de conocimientos.

Estos estudios son abundantes, sobre todo en estimaciones para regiones agrícolas; en cambio existen muy pocos trabajos efectuados en regiones forestales. (Bocock, K. L. y otros, 1977).

Las temperaturas del suelo están estrechamente relacionadas a las temperaturas del aire. (Mueller, O. P., 1970)

Un análisis de regresión lineal provee una buena estimación de las temperaturas medias del suelo en diferentes profundidades empleando la temperatura media diaria del aire como variable independiente (Bonham, C. D. y otros, 1969).

Mueller, O. P. efectuó mediciones de la temperatura del suelo a diferentes profundidades, relacionando éstas con la temperatura del aire. El método de estimación consistió entonces, en el empleo de factores de corrección para la conversión de las temperaturas del aire en temperaturas del suelo.

También, con los datos de temperatura del aire y los correspondientes a nueve profundidades de suelo, Fluker, B. 1958, desarrolló una ecuación general para describir la variación anual de la temperatura observada a cada profundidad.

Bocock, K. L. y otros describen seis métodos de estimación de la temperatura media semanal a 0 y 50 cm de profundidad en bosques caducifolios. Se basaron fundamentalmente en regresión lineal de la temperatura del suelo sobre la temperatura del aire, regresión múltiple de la temperatura del suelo sobre otras variables climáticas y análisis armónico usando sinusoides promedios de temperaturas del aire y del suelo. Este último método suministró estimaciones más precisas y acertadas.

Otras estimaciones de la temperatura del suelo a diferentes profundidades se efectuaron a partir de datos meteorológicos corregidos por altitud, en regiones de igual o similar latitud y características fisiográficas semejantes. (Vann, J. R. y otros, 1975).

Quellet, C. E., 1973, en Canadá y bajo condiciones de cobertura del suelo con césped corto, estimó las temperaturas medias mensuales del suelo, mediante ecuaciones de regresión múltiple. Relacionó la temperatura del suelo con la temperatura del aire, lluvia y nieve y evapotranspiración potencial, agregando como variable de importancia adicional la temperatura estimada del suelo del mes previo.

Ecuaciones empíricas fueron desarrolladas para calcular las temperaturas del suelo a distintas profundidades utilizando como variables: la temperatura media del suelo, la difusividad térmica, la temperatura media del aire y la amplitud térmica del aire. (Penrod, E. D. y otros, 1960). Además desarrollaron otra ecuación empírica para describir la variación de la temperatura del suelo con el tiempo y la profundidad.

En otros trabajos se estimó la temperatura del suelo, mediante métodos numéricos en función del tiempo y la profundidad del suelo y admitiendo el conocimiento de las propiedades variables de los suelos, o sea efectuando determinaciones de la difusividad térmica de los mismos (Hanks, R. J. y otros, 1971).

Wierenga, P. J. y otros, 1969 y 1970, empleando el conocimiento de las propiedades térmicas del suelo, tales como la conductividad térmica y la difusividad térmica aparente, en función del contenido de agua del suelo, predijo las temperaturas del suelo a diferentes niveles mediante el análisis numérico. Estos mismos autores desarrollaron en otro trabajo un modelo computado para predecir las fluctuaciones de la temperatura en la superficie del suelo, en función de los cambios experimentados en la conductividad térmica aparente a diferentes profundidades.

II. MATERIALES Y METODOS

Se llevó a cabo la estimación de la temperatura del suelo a partir de variables climáticas de fácil disponibilidad sobre observaciones registradas en tres estaciones experimentales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. a) Manfredi (Córdoba), latitud: 31° 49' S, longitud: 63° 46' W y altura sobre el nivel del mar (a.s.n.m.): 292 metros; b) Castelar (Buenos Aires), latitud: 34° 40' S, longitud 58° 39' W y a.s.n.m. de 22 metros, y c) Cerro Azul (Misiones), latitud: 27° 37' S, longitud 55° 26' W y a.s.n.m. de 283 metros.

Los datos empleados correspondieron al período 1970-77 para las tres estaciones, comprendiendo elementos climáticos simples y un índice climático. Los mismos son los siguientes:

- 1 – Temperatura del aire máxima media mensual (abrigo Meteorológico).
- 2 – Temperatura del aire mínima media mensual (abrigo Meteorológico).
- 3 – Temperatura máxima absoluta mensual.
- 4 – Temperatura mínima absoluta mensual.
- 5 – Temperatura del suelo a 5 cm de profundidad.
- 6 – Temperatura del suelo a 10 cm de profundidad.
- 7 – Temperatura del suelo a 20 cm de profundidad.
- 8 – Temperatura del suelo a 50 cm de profundidad.
- 9 – Temperatura del suelo a 100 cm de profundidad.
- 10 – Temperatura del suelo a 20 cm de profundidad (temperatura diferida).
- 11 – Número de días con precipitación.
- 12 – Precipitación mensual en milímetros.
- 13 – Evapotranspiración Potencial mensual (índice climático estimado a partir de la fórmula de Thornthwaite).

Se analizaron todas las variables por medio de una regresión lineal múltiple, la que resultó altamente significativa.

III. RESULTADO

Efectuando los Test de coeficientes de regresión individuales para Manfredi, las variables que resultaron altamente significativas fueron en orden decreciente: la temperatura del aire máxima media mensual, la temperatura del suelo a 10 centímetros de profundidad, la temperatura del aire mínima media mensual y la cantidad de precipitación. Para Castelar, el Test de los coeficientes de regresión individuales, señalaron como

variables más significativas, también en orden decreciente: la temperatura del aire mínima media, la temperatura del aire máxima media y la temperatura del suelo a los 20 centímetros (Temperatura diferida). Para Cerro Azul la regresión lineal múltiple fue altamente significativa, contribuyendo a ello una sola variable: la temperatura del aire máxima media mensual.

Posteriormente se efectuó un análisis de correlación de las variables dependientes, observándose que éstas presentan una altísima correlación con la variable temperatura del aire máxima media y dado que esta variable es la que más contribuyó a la regresión, se decidió realizar un análisis de regresión a dos variables tomando como variable dependiente la variable en estudio, es decir, la temperatura del suelo a 20 cm de profundidad y como variable independiente la temperatura del aire máxima media.

Los análisis individuales son los siguientes:

MANFREDI

Variable	Media	D.S.	C.C.	C.R.	Error Std. del C.R.	Valor T Calculado
Variable independ.	23,01944	5,03124	0,9574	0,98072	0,04684	20,93726
Variable Depend.	18,45277	5,31362				
Ordenada al origen:	-4,1229					
Valor R ²	: 0,86230					
Error Standard	: 1,98577					

Análisis de Variancia de la Regresión:

F. de V.	G.L.	S. de C.	C. M.	F.
Atribuible a regresión	1	1728,62738	1728,62738	438,36901
Desv. regresión	70	276,03209	3,94331	
Total	71	2004,65947		

La recta de regresión resultante para Manfredi es:

$$y_i = -4,1229 + 0,98072 X.$$

CASTELAR

Variable	Media	D.S.	C.C.	C.R.	Error Std. del C.R.	Valor T Calculado
Variable Independ.	22,21428	5,30253	0,94820	0,89478	0,03310	27,03142

Variable

Depend. 17,14404 5,00376

Ordenada al origen: -2,73291

Valor R² : 0,89910

Error Standard : 1,59908

Análisis de Variancia de la Regresión:

F. de V.	G.L.	S. de C.	C. M.	F.
Atribuible				
a Regresión	1	1868,44713	1868,44713	730,69781
Desv. Regresión	82	209,67992	2,55707	
Total	83	2078,12706		

La recta de regresión resultante para Castelar es:

$$Y_i = -2,73291 + 0,089478 X_i$$

CERRO AZUL

Variable	Media	D.S.	C.C.	C.R.	Error Std. del C.R.	Valor T Calculado
----------	-------	------	------	------	---------------------	-------------------

Variable

Independ. 25,73809 3,92857 0,095740 0,99540 0,03315 30,02389

Variable

Depend. 21,13214 4,08453

Ordenada al origen: -4,48779

Valor R² : 0,91661

Error Standard : 1,18661

Análisis de Variancia de la Regresión:

F. de V.	G.L.	S. de C.	C. M.	F.
Atribuible a				
Regresión	1	1269,26319	1269,26319	901,43398
Desv. Regresión	82	115,46001	1,40804	
Total	83	1384,72321		

La recta de regresión resultante para Cerro Azul es:

$$Y_i = -4,48779 + 0,9954 X_i$$

A continuación se efectuó una comparación entre las tres rectas de regresión. Como primera medida se efectuó un Test de Bartlett de igualdad de varianzas y el mismo fue aceptado al 10% de significación.

Seguidamente se efectuó un Test de paralelismo de las rectas de regresión individuales, o sea se planteó la hipótesis:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$$

La misma fue corroborada a través de un Test F comparando la variación entre las pendientes b_1 , b_2 y b_3 y la variación dentro de los conjuntos. La hipótesis planteada fue aceptada a un nivel de significación del 5%.

Luego se procedió a testar la igualdad de las tres líneas de regresión paralelas calculando la línea de regresión para los puntos medios (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) y testando su linealidad. La hipótesis de linealidad fue testada por medio de un Test F comparando la variación alrededor de las líneas de regresión para las medias y la variación dentro de los conjuntos. Aceptada la hipótesis de linealidad a un nivel de significación del 5%, se procedió a comparar la pendiente de la línea de regresión para los puntos medios con la pendiente promedio ponderada de las tres líneas de regresión individuales. Como éstas no difirieron significativamente, puede considerarse a las tres líneas de regresión empíricas como estimaciones de la misma línea de regresión teórica. Debido a ello se calculó esta línea de regresión única estimada que fue:

$$y = -6,6967 + 1,0819 x$$

Las conclusiones obtenidas pueden resumirse en el siguiente cuadro de Análisis de la Varianza:

F.deV.	S. de C.	G.L.	C.M.	F obs.	F 5%
Entre \hat{b} y \bar{b}	1,3455	1	1,3455	0,5421	3,84
Alrededor de las líneas de regresión para las medias.	7,2869	1	7,2869	2,8385	3,84
Entre las pendientes b_1 , b_2 y b_3	0,1417	2	0,07085	0,0276	3,0
Entre las observaciones alrededor de las 3 líneas de regresión individuales.	600,7248	234	2,5672		

donde \hat{b} : pendiente de la línea de regresión para los puntos medios y
 \bar{b} : pendiente promedio ponderada de las tres líneas de regresión individuales.

Del cuadro precedente surge la aceptación, a un nivel de significación del 5 % de las hipótesis de paralelismo, linealidad y coincidencia de las tres líneas de regresión individuales.

Finalmente y con el objeto de verificar si este comportamiento de las variables en estudio podía hacerse extensivo a una mayor área geográfica del territorio nacional, se obtuvieron nuevas rectas de regresión correspondientes a ANGUIL, La Pampa, latitud: 36° 30' S; longitud: 63° 59' W, altura sobre el nivel del mar 165 m; LA CONSULTA, Mendoza, latitud: 33° 44' S, longitud: 68° 07' W, altura sobre el nivel del mar 940 m; ALTO VALLE DEL RIO NEGRO, Río Negro, latitud: 39° 01' S, longitud: 67° 10' W, altura sobre el nivel del mar 242 m.; LAS BREÑAS, Chaco, latitud: 27° 05' S, longitud 65° 06' W, altura sobre el nivel del mar 101 m; CONCEPCION DEL URUGUAY, Entre Ríos, latitud 32° 28' S, longitud: 56° 20' W, altura sobre el nivel del mar 25 m y EL COLORADO, Formosa, latitud: 26° 18' S, longitud: 39° 23' W, altura sobre el nivel del mar 78 m.

Con las rectas de regresión correspondientes a Anguil, Alto Valle del Río Negro y La Consulta se efectuó un test de Barlett de igualdad de varianzas, el que fue rechazado al 5 % de significación.

Por último, las rectas de regresión correspondientes a Las Breñas, Concepción del Uruguay y El Colorado, se compararon con las de Manfredi, Castelar y Cerro Azul, siguiendo la misma metodología empleada precedentemente. Efectuados el Test de Bartlett y las hipótesis de paralelismo, linealidad y coincidencia se aceptan los mismos al 5 % de significación.

En consecuencia, surge como recta de regresión común para todas las localidades analizadas en último término la siguiente:

$$y = -5,8713 + 1,0412 x$$

IV. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Se utilizaron en total nueve localidades argentinas, con la finalidad de determinar las relaciones existentes entre la temperatura del suelo con diferentes variables climáticas y con el objetivo final de establecer una expresión matemática que permitirá efectuar estimaciones de la temperatura del suelo a partir de una o algunas de esas variables climáticas.

Se comprobó que la mayoría de las variables analizadas están significativamente intercorrelacionadas.

La difusividad térmica del suelo fue dejada de lado, como elemento interesante para efectuar pronósticos de temperaturas del suelo, debido a que la mayoría de las estaciones agrometeorológicas de nuestro país carecen de este tipo de registros.

Las ecuaciones de transferencia de calor pueden ser usadas en la predicción de la temperatura del suelo, sólo si el perfil del suelo es homogéneo y sus propiedades físicas son constantes con el tiempo y la profundidad (Fluker). Estas condiciones en la práctica nunca existen en los campos dedicados al cultivo. (Bonham y Fye).

Un análisis final fue realizado con el objeto de determinar y explicar la aplicabilidad del modelo obtenido a la extensa área de cultivo de la República Argentina.

Con tal fin se emplearon diferentes índices fitoclimáticos que expresan el grado de aridez y/o humedad de las distintas localidades estudiadas, tales como el índice de pluviosidad de Lang, el índice de aridez de Martone, el índice termopluviométrico de Dantin-Revenga, el índice hídrico de Thornthwaite y la Clasificación de Köppen. (World Meteorological Organization, 1975).

Los resultados del análisis efectuado con los diferentes índices fitoclimáticos, indican que el modelo obtenido es de aplicación únicamente en condiciones de climas subhúmedos y húmedos, no así en condiciones de aridez y semiaridez, pudiendo afirmar que los resultados obtenidos pueden ser explicados satisfactoriamente.

Se puede esperar alguna influencia en las estimaciones de la temperatura del suelo, si un lugar dado presenta un micro ambiente (micro clima que difiere sustancialmente de las condiciones bajo las cuales la temperatura del suelo fue estimada en este estudio.

Este procedimiento empleado para estimar la temperatura del suelo a 20 cm de profundidad es también válido para la estimación a otras profundidades.

Concluyendo, este modelo resulta adecuado para estimar las temperaturas medias mensuales del suelo a 20 cm de profundidad, en aquellas localidades que se encuentren ubicadas en la región subhúmeda y húmeda de la República Argentina.

V. AGRADECIMIENTOS

A la profesora adjunta Estadística Nidia Blanch de Bongiovani, de la Cátedra de Estadística de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de

la Universidad Nacional de Córdoba, por las valiosas sugerencias en el tratamiento estadístico.

VI. RESUMEN Y SUMMARY

Se ha desarrollado un modelo macroclimático con el objeto de estimar las temperaturas del suelo en condiciones de cobertura vegetal más o menos uniforme.

El modelo comprende ecuaciones de regresión múltiple para cada mes y para cada profundidad de suelo (5, 10, 20, 50 y 100 cm). Los datos empleados se obtuvieron de registros publicados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Las variables climáticas utilizadas son: temperatura del aire, precipitación, número de días con precipitación por año y un índice climático: la evapotranspiración potencial.

Se obtuvo una ecuación final, que permite estimar la temperatura media mensual del suelo a 20 cm de profundidad a partir de la temperatura máxima media mensual del aire, la que resulta muy aceptable para condiciones de climas subhúmedos y húmedos, no así para climas áridos y semiáridos de Argentina.

SUMMARY

It has been developed a macroclimatic model to estimate the soil temperature under more or less uniform conditions of vegetal cover.

This model includes multiple regression equation for each month and for each soil depth (5, 10, 20, 50 and 100 cm). The used information has been obtained from the public register by the National Institute of Agropecuarian Technology. The climatic variables used are: air temperature, rainfall, number of days with year rainfall and climatic index: potential evapotranspiration.

It was obtained a final equation, allowing estimate the monthly average temperature of soil at 20 cm depth departing from the maximum monthly average temperature of air, resulting very acceptable for subhumid and humid climate, but not for semiarid and arid climate of Argentine.

VII. BIBLIOGRAFIA

- 1 — ALLMARAS, R. R., W. C. BURROWS, and W. E. LARSON, 1964. Early growth of corn as affected by soil temperature. *Proceedings, Soil Science of America*. 28:271-275.
- 2 — BOCOCK, K. L., J. N. R. JEFFERS, D. K. LINDLEY, J. K. ADAMSON and C. A. GILL. 1977. Estimating woodland soil temperature from air temperature and other climatic variables. *Agricultural Meteorology* 18(5):351-72.
- 3 — BONHAM, C. D. and R. E. FYE. 1970. Estimation of wintertime soil temperatures. *J. Econ. Entomol.*, 63:1051-5 .
- 4 — FLUKER, B. J. 1958. Soil temperatures. *Soil Sci.* 86:35-46.
- 5 — HANKS, R. J., D. D. AUSTIN and W. T. ONDRECHEN. 1971. Soil temperature estimation by a numerical method. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 35:665-67.
- 6 — JOURNAL OF THE ROYAL STATISTICAL SOCIETY. *Applied Statistics*. 1973. 22:579-84.
- 7 — KOHNKE, Helmut. 1968. *Soil Physics*. Mc Graw. Hill Book Company.
- 8 — MUELLER, O. P. 1970. Soil temperature regimes on a forested area of the Northern Rockies. *Soil Sci.* 109:40-47.
- 9 — QUELLET, C. E. 1973 a. Macroclimatic model for estimating monthly soil temperatures under short-grass cover in Canada. *Can. J. Soil Sci.* 53:263-71.

- 10 — PENROD, E. D., J. M. ELLIOT and W. K. BROWN. 1960. Soil temperatures (1952-1956) at Lexington, Kentucky. *Soil Sci.* 90:275-83.
- 11 — THORNTON, C. W. y J. R. MATHER. 1957. Instrucciones y tablas para el cómputo de la evapotranspiración potencial y el Balance Hídrico. Instituto Tecnológico de Drexel, Pub. de Climatología. Vol. X N° 3.
- 12 — VANN, J. R. and M. G. CLINE. 1975. Estimating the mean annual soil temperature of areas correlated as the same soil series where both elevation and latitude vary. *J. Soil Wat. Cons.* 30:85-87.
- 13 — WANG, J. Y. 1962. Crop forecast without weather prediction. *Crop and Soils* 14:7-9.
- 14 — WIERENGA, P. J., D. R. NIELSEN and R. M. HAGAN. 1969. Thermal properties of soil base upon field and laboratory measurements. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 33:354-60.
- 15 — WIERENGA, P. J. and C. T. WIT. 1970. Simulation of heat transfer in soil. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 34:845-48.
- 16 — WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Drought and Agriculture. Technical Note N: 138. 1975.