

## ESTIMACION DE LA TEMPERATURA DEL SUELO UTILIZANDO ELEMENTOS METEOROLOGICOS SIMPLES Y ANALISIS ARMONICO(\*)

R. A. del BARRIO y A. TROHA (\*\*)

Recibido: 7-10-87

Aceptado: 12- 2-88

### RESUMEN

*Se realizó la estimación de la temperatura media decádica del suelo en las estaciones agrometeorológicas del INTA de Corrientes, Balcarce y Anguil, para un período de registro de 5 años en cada una de ellas, mediante la utilización del análisis armónico utilizando datos de temperatura máxima media decádica del aire medida en abrigo meteorológico.*

*Se determinó hasta la cuarta armónica para ambas variables. A partir de dicho nivel se pierde toda significación.*

*Posteriormente se realizó un análisis de regresión entre los desvíos de la temperatura media decádica del suelo observada y la calculada por análisis armónico y los desvíos de la temperatura máxima media decádica del aire observada y su armónica fundamental respectiva, obteniéndose así una función matemática para la estimación de la temperatura media decádica del suelo a 10 cm de profundidad.*

### SOIL TEMPERATURES ESTIMATION THROUGH SIMPLE METEOROLOGICAL ELEMENTS AND HARMONIC ANALYSIS

### SUMMARY

*Decadic soil mean temperatures are estimated by means of harmonic analysis using as input data the maximum mean temperature of the air for the same period of time, as measured in the meteorological shelter. The estimation, based on data from the INTA's agrometeorological stations in Corrientes, Balcarce and Anguil, is applied up to the fourth harmonic; the contribution by the subsequent harmonic have no real significance.*

*The application of regression analysis on the sets of desviations between the decadic mean values of the observed soil temperatures and the evaluated ones, and those between the decadic mean values of the observed maximum air temperatures and the basic harmonic of the computed decadic maximum air temperatures, enabled the definition of a mathematic function for the estimation of the decadic soil temperature at 10 cm depth.*

\* Trabajo presentado en el seminario sobre métodos estadísticos para análisis cíclico y estacional. XV Coloquio de la Sociedad Argentina de Estadística. Mar del Plata 31 de agosto al 2 de setiembre de 1987.

\*\*Centro de Investigaciones Biometeorológicas (CIBIOM- CONICET)  
Serrano 665 (1414) Buenos Aires. - Argentina -

## INTRODUCCION

La temperatura del suelo es un elemento de gran importancia en estudios agrometeorológicos ya que además de ser determinante de la capacidad germinativa de la semilla durante el subperíodo siembra-emergencia de la planta, su influencia perdura a lo largo de todo el ciclo del vegetal, especialmente por su relación directa a fenómenos de crecimiento y desarrollo radical.

Sin embargo, la temperatura edáfica no está incluida en las observaciones de rutina de las estaciones climatológicas, sino que en la Argentina se la mide únicamente en estaciones agrometeorológicas pertenecientes al INTA. Esto conlleva como resultante tener una red de datos absolutamente insuficiente para una caracterización regional de este parámetro.

Por ello, varios investigadores han intentado desarrollar métodos de estimación de dicha variable basados en elementos meteorológicos que conforman las observaciones de rutina en estaciones climatológicas. (Oullet, 1973; Boccock et al., 1977; Meikle y Treadway, 1979; Meikle y Gilchrist, 1983; Cochrane y Baker, 1985), entre otros.

En el presente trabajo se desarrolló un método de estimación de la temperatura del suelo a partir de valores de temperatura máxima del aire (ambas correspondientes a promedios de 10 días-decádicas), para las estaciones agrometeorológicas del INTA de Corrientes (Corrientes), Balcarce (Buenos Aires) y Anguil (La Pampa), mediante la utilización de técnicas de análisis armónico (Conrad y Pollack, 1950; Krishnan y Kushwaha, 1972), combinadas posteriormente con análisis regresivos simples.

## MATERIALES Y METODOS

Los datos necesarios corresponden a registros diarios de temperatura del suelo tomados con geotermómetros es-

tándar con el bulbo ubicado a 10 cm de profundidad, promediados a nivel decádico por considerarse que es un lapso apropiado para la planificación de las tareas agrícolas.

En un estudio previo sobre el tema (Troha et al., 1987), se analizaron las temperaturas medias decádicas del suelo en relación a elementos meteorológicos tales como: temperatura máxima, mínima y media, tensión de vapor, déficit de saturación, punto de rocío y humedad relativa del aire, evaporación de tanque, lluvia, velocidad del viento, heliofanía relativa y radiación global mediante un análisis "stepwise" para selección de variables de modelos regresivos, con el fin de obtener aquellas con incidencia significativa en la explicación del elemento analizado. La temperatura máxima del aire tomada en forma exclusiva contribuía con algo más del 90% a la variabilidad observada en la temperatura del suelo.

Si bien la temperatura media decádica del aire contribuía en forma aún mayor que la temperatura máxima media decádica, se eligió esta última para el estudio por ser más fácil de obtener y no presenta inconvenientes en su determinación.

A partir de dichos resultados, se desarrolló el siguiente método de estimación de la temperatura media decádica del suelo a 10 cm de profundidad, a partir de valores de temperatura máxima media decádica del aire para las tres estaciones señaladas, mediante la utilización de técnicas de análisis armónico. Este constituye un tipo especial de análisis de Fourier en el cual una onda recorre un intervalo finito de tiempo representado por un número particular de datos puntuales  $N$  (en este caso  $N=36$  décadas por año) y descripta por  $N/2$  curvas seno y/o coseno superpuestas.

A partir de la fórmula general conocida para una variable "y" que presenta fluctuaciones cíclicas:

$$y = a_0 + a_1 \text{sen}(x+A_1) + a_2 \text{sen}(2x+A_2) + \dots + a_k \text{seno}(kx+A_k)$$

donde:

$a_0$  = media aritmética de las observaciones

$a_1, a_2, \dots, a_k$  = amplitudes (rangos medios) de las ondas superpuestas

$A_1, A_2, \dots, A_k$  = ángulos de fase

$x = iz$  = ángulo de tiempo

$i = 0, 1, 2, \dots$

$z = 360^\circ / \text{Longitud del período investigado (P)}$

Para este trabajo  $P = 36$  décadas/año.

Posteriormente puede determinarse que:

$$y = a_0 + a_1 \text{sen } x \cos A_1 + a_2 \text{sen } 2x \cos A_2 + \dots + a_1 \cos x \text{sen } A_1 + a_2 \cos 2x \text{sen } A_2 + \dots$$

que tienen la forma de las series de Fourier. Al sustituirse:

$$p_1 = a_1 \text{sen } A_1 \quad p_2 = a_2 \text{sen } A_2$$

$$q_1 = a_1 \cos A_1 \quad q_2 = a_2 \cos A_2, \dots$$

luego:

$$y = a_0 + p_1 \cos x + p_2 \cos 2x + \dots + q_1 \text{sen } x + q_2 \text{sen } 2x + \dots$$

Ahora, determinando a  $u_0, u_1, \dots, u_1, \dots, u_{n-1}$  como las desviaciones de los valores observados con respecto a la media aritmética  $a_0$ , si estas cantidades se introducen dentro de la ecuación en lugar de "y", y si los "x"

son substituidos por los valores correspondientes  $x = iz$ , donde  $i = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$ , entonces se consiguen "n" ecuaciones a partir de las cuales se pueden calcular las constantes  $p_1, q_1, p_2, q_2, \dots$  (Conrad y Pollack, 1950).

Si el número de observaciones es mayor que el de constantes, como en este caso, se aplica el método de mínimos cuadrados para el cálculo de dichas constantes, dando por resultado:

$$p_k = (2/n) (u_0 \cos 0^\circ + u_1 \cos kz + u_2 \cos 2kz + \dots + u_{n-1} \text{sen } (n-1)kz)$$

$$q_k = (2/n) (u_0 \text{sen } 0^\circ + u_1 \text{sen } kz + u_2 \text{sen } 2kz + \dots + u_{n-1} \text{sen } (n-1)kz)$$

De acuerdo a las definiciones de  $p_k$  y  $q_k$ ,

$$p_k / q_k = \tan A_k \quad \text{y} \quad p_k / \text{sen } A_k = a_k$$

y, por lo tanto:

$$p_k^2 + q_k^2 = a_k^2 \quad \text{ó} \quad a_k = (p_k^2 + q_k^2)^{1/2}$$

A partir de esta metodología se calcularon para ambas variables (temperaturas del suelo y máxima del aire), las cuatro primeras armónicas para un registro de cinco años.

Posteriormente, se realizó un análisis de regresión entre los desvíos de la temperatura media decádica del suelo observada y la calculada por análisis armónico y los desvíos de la temperatura máxima media decádica del aire observada y su armónica fundamental.

Estos últimos fueron introducidos como variable independiente en la ecuación de regresión correspondiente, obteniéndose una desviación estimada de la temperatura media decádica del suelo, la cual fue adicionada a la ar-

Cuadro N° 1: Valores de amplitud de onda ( $a_k$ ), ángulos de fase ( $A_k$ ) y constantes  $p(k)$  y  $q(k)$  para la temperatura media decádica del suelo ( $t_s$ ) y la temperatura máxima media decádica del aire ( $t_{ma}$ ) en las tres localidades analizadas.

	CORRIENTES		ANGUIL		BALCARCE	
	$t_s$	$t_{ma}$	$t_s$	$t_{ma}$	$t_s$	$t_{ma}$
$a_1$	6,739	5,913	9,229	7,993	7,196	6,942
$a_2$	0,547	0,954	1,047	1,627	0,369	0,523
$a_3$	0,235	0,448	0,401	0,654	0,205	0,457
$a_4$	0,219	0,332	0,223	0,564	0,142	0,302
$A_1$	74,176	79,812	78,330	82,454	71,487	76,917
$A_2$	300,764	312,723	338,491	342,974	16,312	14,663
$A_3$	34,559	120,415	92,098	127,639	349,632	105,161
$A_4$	325,077	345,295	273,277	254,697	109,067	88,296
$p_1$	6,483	5,820	9,038	7,924	6,824	6,762
$q_1$	1,837	1,046	1,867	1,049	2,285	1,571
$p_2$	-0,470	-0,701	-0,384	-0,476	0,104	0,132
$q_2$	0,280	0,647	0,974	1,556	0,354	0,506
$p_3$	0,133	0,386	0,401	0,518	-0,037	0,041
$q_3$	0,194	-0,227	-0,015	-0,399	0,202	-0,119
$p_4$	-0,126	-0,084	-0,223	-0,544	0,135	0,302
$q_4$	0,179	0,321	0,013	-0,149	-0,046	0,009

mónica fundamental respectiva para obtener el resultado estimado de dicha variable.

Los valores estimados de temperatura media decádica del suelo así obtenidos fueron comparados con los observados correspondientes mediante una regresión lineal simple, tanto para los datos utilizados en este análisis (cinco años), denominados a partir de aquí "décadas internas", como para un año cualquiera elegido al azar que no

intervino previamente, denominado "décadas externas".

Para determinar estadísticamente el grado de significación que tienen las diferencias entre los valores de la ordenada al origen con respecto a cero y del coeficiente angular con respecto a uno, se calcularon los errores estándar de  $a$  y de  $b$ , respectivamente, procediéndose a realizar los test de hipótesis nula ( $a = 0$ ,  $b = 1$ ), para las décadas internas y externas de las tres localidades estudiadas.

**Cuadro N° 2:** Resultados del análisis de regresión obtenido entre valores estimados y observados de temperatura media decádica del suelo tanto para décadas internas como externas.

	CORRIENTES		ANGUIL		BALCARCE	
	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.
$R^2$	0,975	0,943	0,974	0,976	0,972	0,943
R	0,987**	0,971**	0,987**	0,993**	0,986**	0,971**
a	-0,053	0,012	-0,080	-0,170	-0,085	-0,957
b	1,002	0,986	0,097	1,018	1,006	1,073
$S_{yx}$	0,806	1,330	1,094	1,220	0,879	1,330

**Cuadro N° 3:** Test de hipótesis nula ( $a = 0$  y  $b = 1$ ) entre los valores estimados y observados de temperatura media decádica del suelo para décadas internas y externas y para los niveles de significación de  $x = 0,05$  (\*) y  $x = 0,01$  (\*\*). (o) diferencias no significativas.

	CORRIENTES		ANGUIL		BALCARCE	
	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.
$S_a$	0,287	1,000	0,254	0,600	0,204	0,780
$S_b$	0,012	0,004	0,014	0,030	0,013	0,050
$Z_a$	0,181(o)	0,012(o)	0,315(o)	0,283(o)	0,417(o)	1,230(o)
$Z_b$	0,167(o)	0,350(o)	0,214(o)	0,667(o)	0,462(o)	1,400(o)

### RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro N° 1 pueden observarse los valores correspondientes a la amplitud de onda, ángulos de fase y constantes  $p_k$  y  $q_k$  de las tres localidades estudiadas.

La convergencia de las series resultantes fue muy buena a partir del segundo término, pero el cálculo se realizó hasta el cuarto término de la armónica donde la relación  $a_4/a_1$  fue menor o igual a 0,07. Además, mediante la aplicación del criterio de Brunt, luego del cuarto término la varianza de los datos explicada por el ajuste

armónico era mayor o igual al 99% en todos los casos estudiados, por lo que se descartó el cálculo de términos superiores.

En el Cuadro N° 2 se exponen, para cada localidad, los resultados del análisis de regresión entre los valores estimados y observados de la temperatura media decádica del suelo, tanto para décadas internas como externas. Los coeficiente de correlación respectivos fueron altamente significativos. Los errores estándar de estimación fluctuaron entre 0,8 y 1,1 para las décadas internas, aumentando alrededor de 1,3 para las décadas externas.

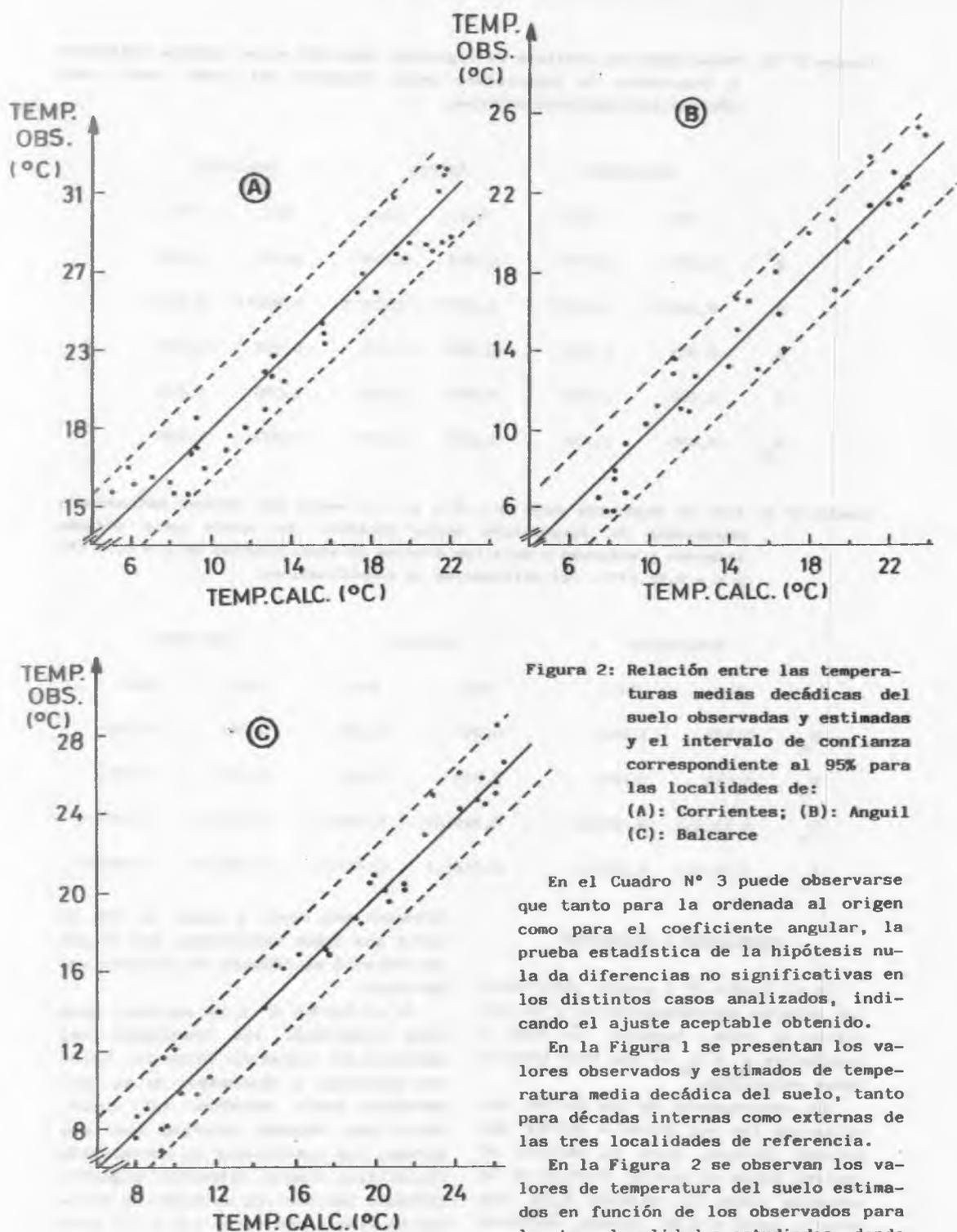


Figura 2: Relación entre las temperaturas medias decádicas del suelo observadas y estimadas y el intervalo de confianza correspondiente al 95% para las localidades de:  
(A): Corrientes; (B): Anguil  
(C): Balcarce

En el Cuadro N° 3 puede observarse que tanto para la ordenada al origen como para el coeficiente angular, la prueba estadística de la hipótesis nula da diferencias no significativas en los distintos casos analizados, indicando el ajuste aceptable obtenido.

En la Figura 1 se presentan los valores observados y estimados de temperatura media decádica del suelo, tanto para décadas internas como externas de las tres localidades de referencia.

En la Figura 2 se observan los valores de temperatura del suelo estimados en función de los observados para las tres localidades estudiadas, donde se advierte el buen ajuste logrado al encuadrarse los resultados obtenidos en el intervalo de confianza del 95%.

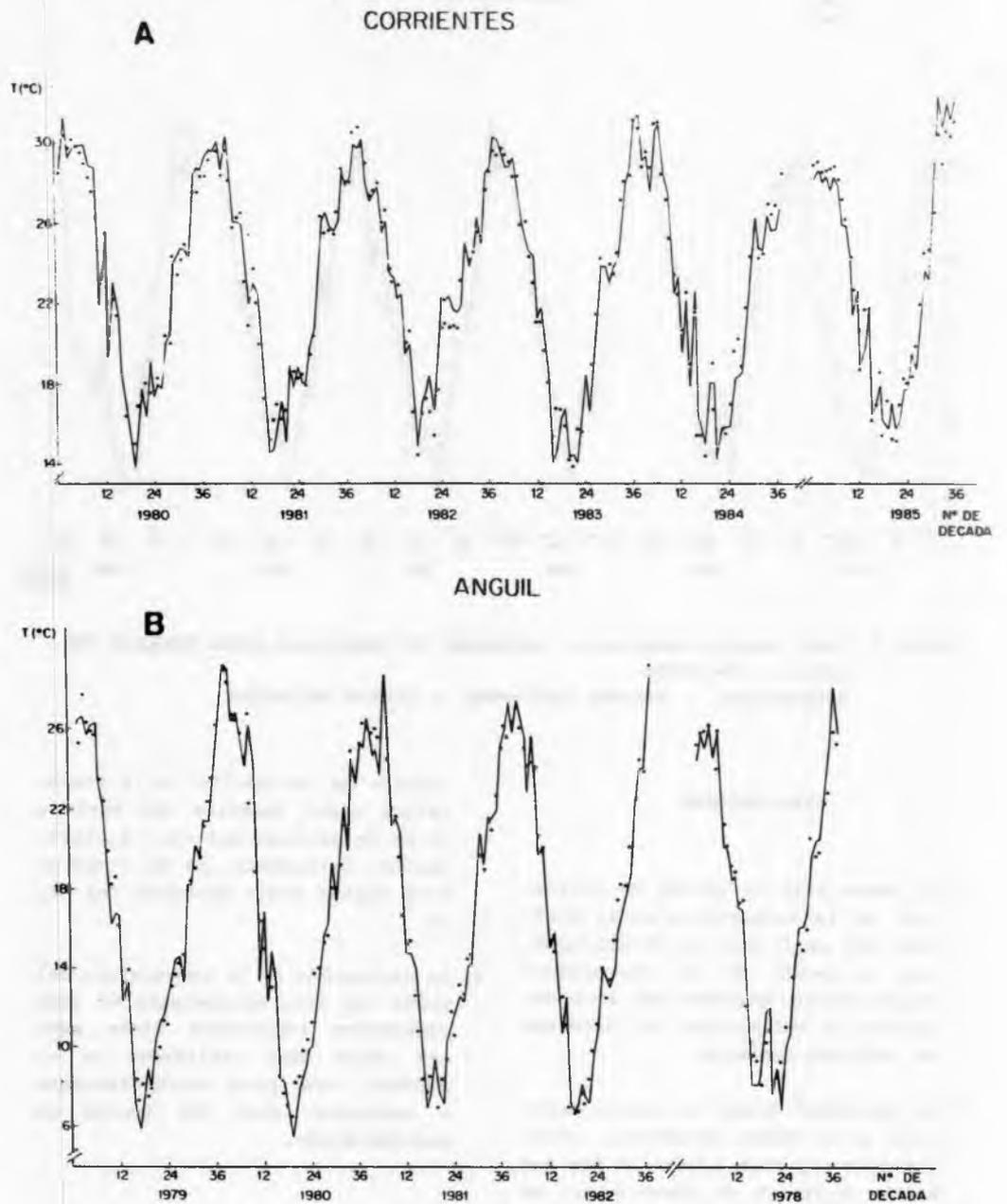


Figura 1: Valores observados y estimados de temperatura media decádica del suelo.  
 A: Corrientes B: Anguil  
 Referencias: - Valores observados • Valores estimados

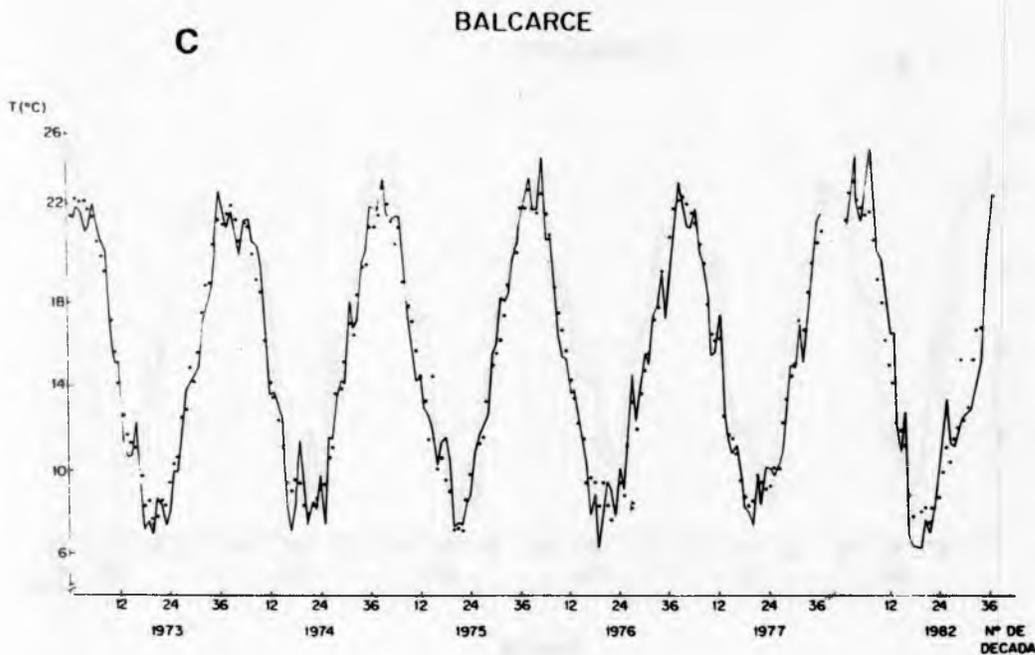


Figura 1: Cont. Valores observados y estimados de temperatura media decádica del suelo. C. Balcarce

Referencias: - Valores observados • Valores estimados

### CONCLUSIONES

1. Se desarrolló un método de estimación de la temperatura media decádica del suelo a 10 cm de profundidad a partir de la temperatura máxima media decádica del aire mediante la utilización de técnicas de análisis armónico.
2. Se determinó hasta la cuarta armónica para ambas variables, obteniéndose muy buen ajuste en los dos casos. A partir de dicho nivel se pierde toda significación.
3. Mediante un análisis de regresión entre los desvíos de ambas variables observadas, con respecto a las calculadas por la armónica fundamental respectiva, se obtuvo una función de estimación de la temperatura media decádica del suelo a 10 cm de profundidad con la utilización, únicamente, de la temperatura máxima media decádica del aire.
4. La estimación de la temperatura del suelo con esta metodología ha dado excelentes resultados tanto para los cinco años utilizados en el estudio, como para extrapolaciones a cualquier otro año tomado en consideración.

### AGRADECIMIENTO

Los autores dejan constancia de su agradecimiento a la Srta. Karin Peters por la labor de apoyo brindada en el presente trabajo.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) BOCOCK, K.L.; J.N.R. JEFFERS; D.K. LINDLEY; K.K. ADAMSON and C.A.GILL, 1977. Estimating woodland soil temperature from air temperature and other climatic variables. *Agric. Met.*, 18:351-372.
- 2) COCHRANE, J. and C. R. BAKER, 1985. Annual and diurnal variations in soil temperatures at Kew, Great Britain. *Agric. and Forest Met.*, 34:235-240.
- 3) CONRAD, V. and L.W. POLLACK, 1950. *Methods in Climatology*. Second Edition. Harvard University Press, Cambridge, Mass., 459 pp.
- 4) KRISHNAN, A. and S.KUSHWAHA, 1972. Analysis of soil temperatures in the arid zone of India by Fourier Techniques. *Agric. Met.*, 10:55-64.
- 5) MEIKLE, R.W. and T.R. TREADWAY, 1979. A mathematical method for estimating soil temperature. *Soil Sci.*, 128:226-242.
- 6) MEIKLE, R.W. and A.J. GILCHRIST, 1983. A mathematical method for estimation of soil temperatures in England and Scotland. *Agric. Met.*, 20:221-225
- 7) OULLET, C.E., 1973. Estimation of monthly soil temperatures from climatic data. *Agromet. Res. and Service. Tech. Bull.* 82. Dep. of Agric. Canadá.
- 8) TROHA, A; R. RODRIGUEZ y R.A. del BARRIO, 1987. Estimación de la temperatura del suelo en base a elementos meteorológicos simples. Un estudio comparativo de modelos de análisis armónico y regresión lineal múltiple. Presentado en el II Congreso Interamericano y V Congreso Argentino de Meteorología. Bs. As. Noviembre de 1987.