

Estimación de la temperatura de suelo desde datos satelitales AVHRR-NOAA aplicando algoritmos de split window

J.C. Parra^a, J.A. Sobrino^b, P.S. Acevedo^a y L.J. Morales^c

^aDepartamento de Ciencias Físicas, Universidad de La Frontera
Casilla 54-D, Temuco, Chile.

^bDepartamento de Termodinámica, Universidad de Valencia,
46100 Burjassot, Valencia, España.

^cDepartamento de Física, Universidad Tecnológica Metropolitana,
Casilla 9845, Santiago, Chile.

Recibido el 30 de 01 de 2006; aceptado el 26 de 04 de 2006

Se aplican cuatro algoritmos, basados en la técnica de split-window, para estimar la temperatura de suelo a partir de los datos proporcionados por el sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), a bordo de la serie de satélites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Estos algoritmos consideran correcciones por emisividad de las diferentes superficies del terreno y atmosférica. Se utilizaron catorce imágenes AVHRR-NOAA correspondientes a los meses de octubre de 2003 y enero de 2004. En paralelo se realizaron mediciones de temperatura de suelo en la estación agrometeorológica de Carillanca, Región de La Araucanía, Chile (38°41' S; 72°25' W). De todos los algoritmos utilizados, los mejores resultados corresponden al modelo propuesto por Sobrino y Raussoni (2000), con una media y desviación estándar de la diferencia entre la temperatura de suelo medida *in situ* y la estimada por dicho algoritmo, de - 0.06 y 2.11K, respectivamente.

Descriptor: Superficie; satélite; correcciones atmosféricas; emisividad.

Four algorithms based on the technique of split-window, to estimate the land surface temperature starting from the data provided by the sensor Advanced Very High Resolution radiometer (AVHRR), on board the series of satellites of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), are carried out. These algorithms consider corrections for atmospheric characteristics and emissivity of the different surfaces of the land. Fourteen images AVHRR-NOAA corresponding to the months of October of 2003, and January of 2004 were used. Simultaneously, measurements of soil temperature in the Carillanca hydro-meteorological station were collected in the Region of La Araucanía, Chile (38°41' S; 72°25' W). Of all the used algorithms, the best results correspond to the model proposed by Sobrino and Raussoni (2000), with a media and standard deviation corresponding to the difference among the temperature of floor measure *in situ* and the estimated for this algorithm, of -0.06 and 2.11K, respectively.

Keywords: Surface; satellite; atmospheric corrections; emissivity.

PACS: 07.07.Df; 07.87.+v; 95.40.+s

1. Introducción

La temperatura de suelo se constituye en uno de los parámetros más relevantes en la estimación de diversas variables de interés ambiental, tales como la evapotranspiración, inercia térmica, entre otras [1-3]. En la práctica, la estimación de la temperatura de suelo es llevada a cabo mediante termómetros o termistores con la problemática asociada de un alto costo económico si se quieren cubrir extensas áreas geográficas. La solución a estos inconvenientes surge en la década de los años cincuenta con el desarrollo de la tecnología infrarroja y con su posterior utilización a bordo de satélites artificiales; desde el primero de ellos, el Television Infrared Operation Satellite (TIROS), hasta los actuales satélites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y Land Satellite (LANDSAT), que permiten el acceso de información de la superficie de la tierra a escala sinóptica.

No obstante, uno de los mayores problemas que plantea la medida de la temperatura de suelo desde satélites es la acción combinada de las perturbaciones debidas al efecto atmosférico y la variabilidad en las emisividades de las diferentes coberturas de suelo [4]. En particular, en la ventana

del infrarrojo termal (8-13 μm), la perturbación atmosférica es debida casi por entero al contenido de vapor de agua en la atmósfera [5]. Por lo tanto, una adecuada estimación de la temperatura de suelo desde datos aportados por satélites, requiere corregir los efectos antes mencionados.

Entre las técnicas disponibles que abordan el problema de la corrección atmosférica y de emisividad, destaca el método de split-window que combina los datos obtenidos simultáneamente por dos canales espectrales en la misma ventana de transmisión atmosférica [6]. La base de esta técnica, contenida en la ecuación de transferencia radiativa, radica en el hecho que la atenuación atmosférica que experimenta la radiancia emitida por la superficie terrestre, es proporcional a la diferencia entre las radiancias medidas desde satélite y realizadas simultáneamente en dos canales térmicos distintos [7].

Para superficies homogéneas y de escasa rugosidad, la técnica de split-window ha sido ampliamente divulgada para estimar la temperatura de la superficie del mar [8-10] y de suelo [11-14] a partir de la información que aportan los satélites de la serie NOAA.

Los satélites NOAA describen una órbita heliosincrónica, casi polar, situada a una altitud entre 830-870 km, con un

periodo orbital de 101 minutos. Uno de sus sensores a bordo es el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) que tiene un ángulo de visión de 110.8 grados, y genera una franja de barrido de 3000 km de ancho, lo que equivale en el ecuador a 27.2° de longitud. La resolución espacial del píxel es de 1 km × 1 km en el nadir. En la Tabla I, se muestran los intervalos espectrales del sensor AVHRR con sus aplicaciones temáticas.

En el presente trabajo se aplican distintos algoritmos de split-window para estimar y validar la temperatura de suelo a partir de datos proporcionados por el sensor AVHRR-NOAA.

2. Metodología

2.1. Medición de temperatura de suelo *in situ*

Como parte del Proyecto de Investigación DIDUFRO N° 120320, desarrollado por los autores, se cuenta con información de temperatura de suelo medida en la Estación Agrometeorológica Carillanca, Región de La Araucanía (38°41' S; 72°25' W; 200 m.s.n.m), Chile (Fig. 1), para los meses de octubre 2003 y enero 2004.

TABLA I. Bandas espectrales del sensor AVHRR-NOAA

Banda	Intervalo espectral (μm)	Aplicaciones temáticas
1	0.58-0.68	Seguimiento de nubes, nieve y capa de hielo
2	0.72-1.1	Discriminación de superficies de aguas y vegetación, Aplicaciones agrícolas
3	3.55-3.93	Temperatura superficial del mar, volcanes e incendios forestales
4	10.3-11.3	Temperatura del mar, humedad del suelo
5	11.5-12.5	Temperatura del mar, humedad del suelo

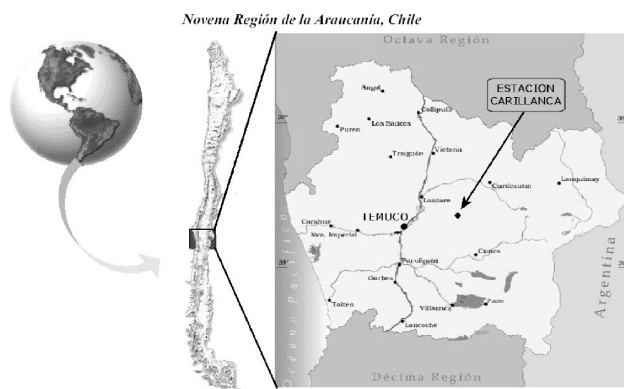


FIGURA 1. Mapa de ubicación de la Estación Agrometeorológica Carillanca, Región de la Araucanía, Chile.

La Estación Agrometeorológica Carillanca está ubicada en una zona caracterizada por un clima mediterráneo frío, en que la temperatura media anual es de 10°C, con una máxima media del mes más cálido (enero) de 21.5°C y una mínima media del mes más frío (julio) de 2.3°C [15]. El sector se caracteriza por poseer topografía plana y pendientes de 0-25 %. La fisiografía corresponde a la depresión intermedia, en posición de terrazas aluviales recientes. Los suelos son derivados de cenizas volcánicas modernas (andisoles), pertenecientes a la serie de suelos Vilcún. [16]

Las mediciones de la temperatura de suelo, a intervalos temporales de una hora, se realizaron utilizando un termistor calibrado en el intervalo -10 a 50°C, con un error cuadrático medio de 0.06°C. El sensor se enterró a un centímetro de profundidad.

2.2. Obtención y selección de imágenes NOAA

Se utilizaron imágenes correspondientes al satélite NOAA 16 en sus bandas espectrales del visible e infrarrojo térmico, obtenidas gratuitamente del Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS). La base de datos de imágenes en formato LAC (Local Area Coverage), nivel 1B, se escogió coincidente con las fechas de las mediciones de terreno (octubre 2003 y enero 2004).

A objeto de evitar la perturbación generada por la nubosidad, se realizó una selección rigurosa de las imágenes considerando solamente aquellos días en que el área de estudio se presenta libre de nubosidad. De un total de 62 imágenes revisadas, y debido a que algunas presentaron defectos en la recepción de la información, se seleccionaron 14 imágenes (Tabla II) las que se sometieron a un proceso de georeferenciación (Proyección geográfica Latitud/Longitud, Datum

TABLA II. Fechas de selección, horas de paso y ángulo de observación del satélite NOAA 16.

Fecha	Hora de paso (GMT)	Ángulo de observación (°)
10/10/2003	18:36	49
14/10/2003	19:32	12
22/10/2003	19:42	24
26/10/2003	18:57	34
27/10/2003	18:45	42
28/10/2003	18:34	49
03/01/2004	19:20	10
04/01/2004	19:08	24
05/01/2004	18:57	36
11/01/2004	19:30	4
13/01/2004	19:07	27
14/01/2004	18:55	37
20/01/2004	19:28	1
30/01/2004	19:15	19

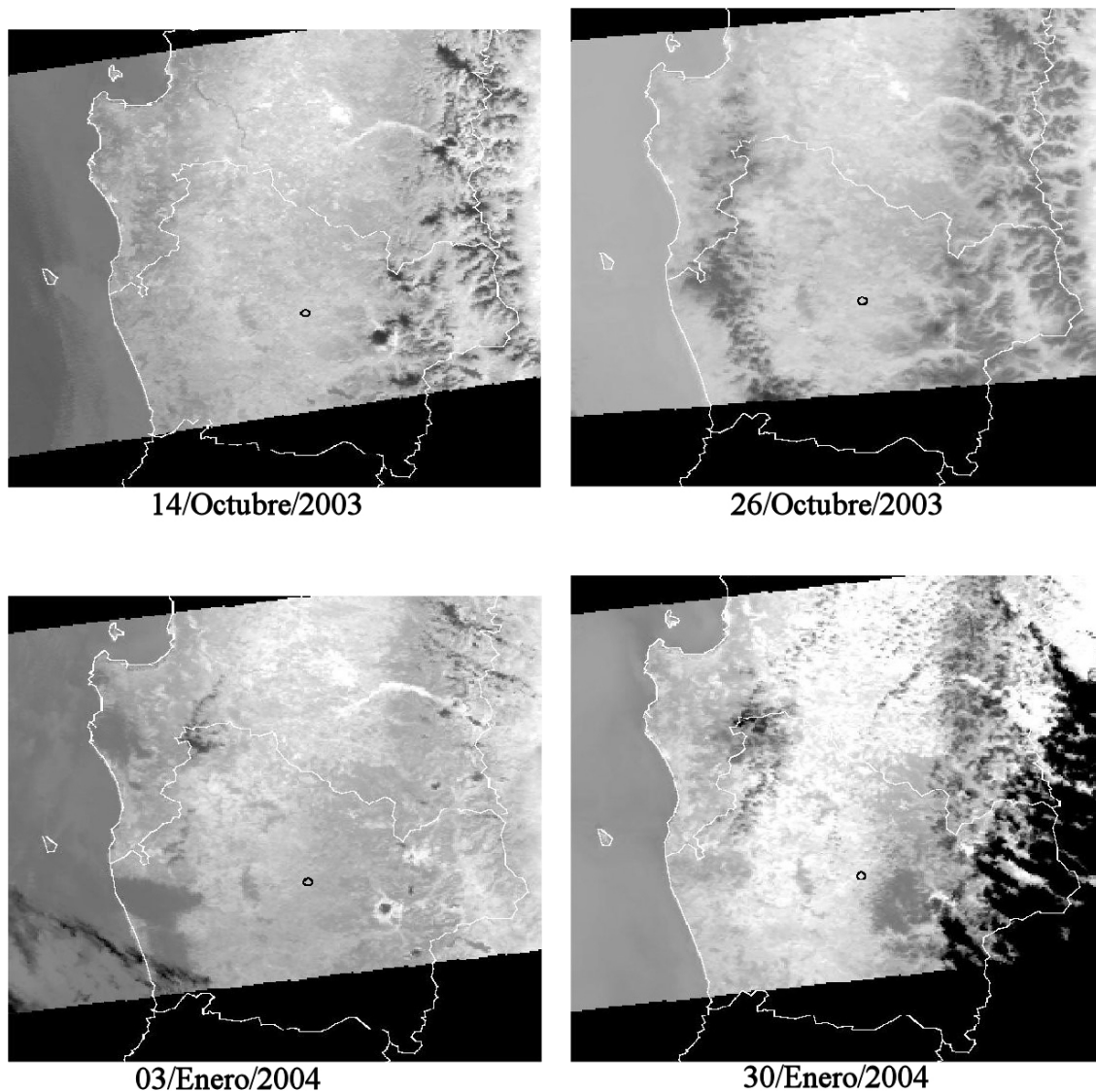


FIGURA 2. Ejemplo de imágenes seleccionadas del satélite NOAA. Se indica con un círculo negro la ubicación de la Estación Agrometeorológica Carillanca. Sobre cada imagen se ha superpuesto un contorno, que delimita geográficamente la Región de la Araucanía, Chile.

SAD 69 Chile). Adicionalmente, para cada una de ellas se identificó el píxel en donde se ubica la Estación Agrometeorológica Carillanca. Algunas de las imágenes seleccionadas con sus respectivas fechas, se ilustra en la Fig. 2.

2.3. Implementación de algoritmos

Los algoritmos de split-window aplicados en el presente trabajo son los sugeridos por: Price, 1984 [11]; Uliveri *et al.*, 1992 [12]; Sobrino *et al.*, 1993 a [13]; Sobrino y Raussoni, 2000 [14]. Las expresiones matemáticas de los mismos se ilustran en Tabla III.

Según Sobrino [17] todos estos algoritmos han sido desarrollados para distintos tipos de atmósferas y con la ayuda de modelos de transferencia radiativa (Tabla IV).

La implementación de los distintos algoritmos supone contar con la siguiente información: temperaturas de brillo

en las bandas 4 y 5, emisividad media, variación espectral de la emisividad, y el contenido de vapor de agua. Todas estas variables están asociadas al píxel (en la imagen satelital) en donde se ubica la Estación Agrometeorológica Carillanca.

2.3.1. Temperaturas de brillo

La obtención de las temperaturas de brillo en las bandas 4 y 5 del AVHRR fue realizada con la utilización del módulo Calibrate Data del programa ENVI en su versión 4.0.

2.3.2. Emisividad media y variación espectral

La emisividad media y su variación espectral, se estimaron por aplicación del método de umbrales [14]. Este método utiliza el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para clasificar los píxeles de acuerdo al porcentaje de cobertura de la vegetación. Los criterios para los valores umbrales usados

TABLA III. Algoritmos de Split-Window. T_s temperatura de suelo estimada (K); T_4, T_5 temperaturas de brillo (K) en las bandas 4 (10.3-11.3 μm) y 5 (11.5-12.5 μm) del sensor AVHRR-NOAA; ε_4 emisividad en la banda 4; ε emisividad media [$\varepsilon = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5)/2$]; $\Delta\varepsilon$ variación espectral ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$); W contenido de vapor de agua (g cm^{-2}).

Autores	Abreviación	Algoritmo split-window
Price (1984)	P	$T_s = [T_4 + 3.33(T_4 - T_5)] \left[\frac{5.5 - \varepsilon_4}{4.5} \right] + 0.75T_5\Delta\varepsilon$
Uliveri <i>et al.</i> (1992)	U	$T_s = T_4 + 1.8(T_4 - T_5) + 48(1 - \varepsilon) - 75\Delta\varepsilon$
Sobrino <i>et al.</i> (1993a)	S	$T_s = T_4 + [1.06 + 0.46(T_4 - T_5)](T_4 - T_5) + 53(1 - \varepsilon_4) - 53\Delta\varepsilon$
Sobrino y Raussoni (2000)	S-R	$T_s = T_4 + [1.4 + 0.32(T_4 - T_5)](T_4 - T_5) + 0.83 + (57 - 5W)(1 - \varepsilon) - (161 - 30W)\Delta\varepsilon$

TABLA IV. Condiciones atmosféricas y modelo de transferencia radiativa utilizado en el desarrollo de los algoritmos - (?) indica que en el trabajo original no se incluye la información correspondiente.

Algoritmo	Modelo de Transferencia	Atmósferas
P	?	?
U	Desarrollado en su laboratorio	$W = 0.4$ a 3 g cm^{-2}
S	Lowtran 7	$W = 0.69$ a 3.32 g cm^{-2}
S-R	Lowtran 7	$W = 0.15$ a 6.7 g cm^{-2}

para el NDVI se basan en la respuesta de éste índice frente a distintas coberturas de suelo y vegetación. En el caso de píxeles solamente con vegetación el $\text{NDVI} > 0.5$; con suelo desnudo el $\text{NDVI} < 0.2$; o mezcla de ambos $0.2 \leq \text{NDVI} \leq 0.5$. De esta manera, según se trate de un tipo de píxel o de otro, se utilizan distintas formas para calcular la emisividad media y su variación espectral. Los valores de NDVI fueron calculados a partir de la expresión propuesta por Rouse *et al.* [18]:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{irc} - \rho_v}{\rho_v + \rho_{irc}}, \quad (1)$$

donde ρ_v y ρ_{irc} son las reflectividades (adimensional) en los canales del visible e infrarrojo cercano, respectivamente.

Previo a la aplicación de los criterios de umbrales, especificados anteriormente, se procedió a realizar una corrección atmosférica sobre los valores de NDVI. Para esto, se aplicó la metodología desarrollada por Durán y Acevedo [19] que asume una caracterización de las propiedades físicas y radiativas de los aerosoles, la modelización de la radiación global y la reflectividad de diferentes coberturas de suelo. En el caso particular del sensor AVHRR-NOAA, los factores de las correcciones atmosféricas para los tres rangos umbrales (Tabla V) se obtienen a partir de los resultados presentados por Durán y Acevedo [20].

Los criterios de umbrales utilizados, según [14] son:

- a) Píxeles mixtos ($0.2 \leq \text{NDVI} \leq 0.5$): estos píxeles se consideran compuestos por superficies heterogéneas y rugosas, que son las más habituales de encontrar. En

TABLA V. Correcciones atmosféricas promedios para diferentes intervalo de NDVI.

Sensor satelital	NDVI		
	< 0.2	[0.2 - 0.5]	> 0.5
AVHRR	2.389	1.356	1.143

este caso la emisividad se obtiene al considerar la superficie compuesta por una mezcla de suelo desnudo y vegetación. Bajo esta premisa, los algoritmos de cálculo para ε y $\Delta\varepsilon$ son

$$\varepsilon = 0.971 + 0.018P, \quad (2)$$

$$\Delta\varepsilon = 0.00(1 - P), \quad (3)$$

donde el término P , representa la proporción de vegetación [21], obtenido por la ecuación

$$P = \left[\frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{mín}}}{\text{NDVI}_{\text{máx}} - \text{NDVI}_{\text{mín}}} \right]^2, \quad (4)$$

donde $\text{NDVI}_{\text{mín}} = 0.2$ y $\text{NDVI}_{\text{máx}} = 0.5$.

- b) Píxeles con suelo desnudo ($\text{NDVI} < 0.2$): Para este tipo de condición, la proporción de vegetación (P) es igual a cero, por lo que en estos casos, ε y $\Delta\varepsilon$ se expresan como una combinación lineal de la reflectividad en el ancho de banda correspondiente a la región del visible (ρ_v):

$$\varepsilon = 0.980 - 0.042 \rho_v, \quad (5)$$

$$\Delta\varepsilon = -0.003 - 0.029\rho_v. \quad (6)$$

- c) Píxeles sólo con vegetación ($\text{NDVI} > 0.5$): En este caso, como los píxeles están cubiertos completamente con vegetación, P es igual a la unidad. Como la vegetación presenta variaciones espectrales mínimas dentro del rango 8 - 13 μm , se pueden asignar a estos píxeles un valor de emisividad media constante para todo el ancho de banda, con un valor típico de

$$\varepsilon = 0.99, \quad (7)$$

$$\Delta\varepsilon = 0. \quad (8)$$

2.3.3. Vapor de agua

El contenido de vapor de agua atmosférico, W, puede ser calculado a partir de la densidad del vapor de agua obtenido de radiosondeos. No obstante, la complicación que supone disponer de esta información que sea coincidente con la fecha y hora de pasada del satélite reduce la operabilidad del método. Una solución es recurrir a bases de datos históricas generadas por organismos de meteorología, como la proporcionada por el proyecto conjunto entre la National Center for Environment Prediction (NCEP) y la National Center for Atmospheric Research (NCAR) cuyo propósito es generar diversos análisis del estado de la atmósfera usando datos disponibles, tanto históricos (desde 1948) como actuales [22,23]. A partir de los datos reportados por NCEP y NCAR, y de un análisis de tipologías o de cluster, Morales *et al.* [24] encuentran para el Cono Sur de América la variabilidad espacio-temporal de W en media mensual. Para el área de estudio en la Fig. 3 se presenta la variabilidad de W en función del mes.

3. Resultados y discusión

En la Tabla VI se ilustran por fecha la emisividad media (ϵ) y su variación espectral ($\Delta\epsilon$); temperaturas de brillo en las bandas 4 y 5 del sensor AVHRR (T_4 , T_5); temperatura de suelo medida in situ (T_{in}); y temperatura de suelo estimada (T_s), para los distintos algoritmos de split-window aplicados.

En la Fig. 4, se ilustran las series temporales correspondientes a las temperaturas de brillo en las bandas 4 y 5. En todo momento las temperaturas de brillo de la banda 4 (T_4) aparecen subestimadas respecto a sus similares de la banda 5 (T_5), esto se puede atribuir a un mecanismo diferente

de absorción del vapor de agua en dichas bandas espectrales (10.3-11.3 μm y 11.5-12.5 μm).

En la Fig. 5 se presentan las diferencias entre la temperatura de suelo medida *in situ* y la temperatura de brillo en las bandas 4 y 5.

Según se advierte en la Fig. 5, las temperaturas de brillo en las bandas 4 y 5 aparecen subestimadas respecto de las temperaturas de suelo medidas in situ, obteniéndose diferencias de hasta 21°K. Lo anterior deja de manifiesto el efecto introducido al omitir la emisividad del suelo y el contenido de vapor de agua atmosférico en la temperatura de brillo.

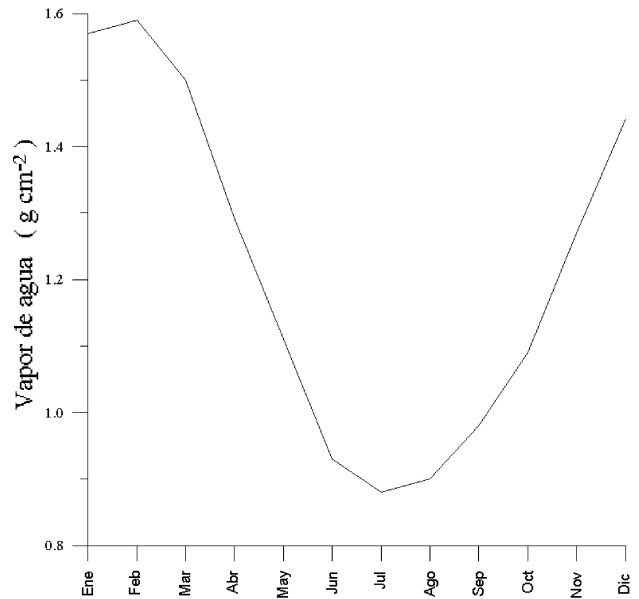


FIGURA 3. Valores medios mensuales de W (g cm⁻²) para el área de estudio.

TABLA VI. Emisividad media (ϵ); variación espectral ($\Delta\epsilon$); temperatura de brillo en la banda 4 (T_4) y 5 (T_5) del sensor AVHRR; temperatura de suelo medida in situ (T_{in}), y la temperatura de suelo estimada (T_s) para los diferentes algoritmos aplicados. La temperatura de suelo medida in situ presenta un error cuadrático medio de 0.06°C.

Fecha	ϵ	$\Delta\epsilon$	T_4 (K)	T_5 (K)	T_{in} (K)	T_s P (K)	T_s U (K)	T_s S (K)	T_s S-R (K)
10/10/2003	0.98	0.0002	288.8	287.1	293.9	295.8	292.8	293.0	293.9
14/10/2003	0.99	0.0000	296.6	295.4	296.9	301.3	299.2	299.1	300.1
22/10/2003	0.99	0.0000	292.2	290.6	300.3	298.2	295.6	295.6	296.6
26/10/2003	0.99	0.0000	288.3	287.2	294.3	292.6	290.8	290.6	291.6
27/10/2003	0.99	0.0000	291.1	288.9	295.0	299.1	295.5	296.2	297.1
28/10/2003	0.99	0.0000	291.6	289.1	300.2	300.6	296.6	297.7	298.4
03/01/2004	0.99	0.0000	295.2	294.0	298.9	299.9	297.8	297.7	298.7
04/01/2004	0.99	0.0000	283.4	278.1	299.4	301.7	293.4	302.5	301.1
05/01/2004	0.98	0.0023	292.2	289.7	300.9	302.4	297.5	298.7	299.3
11/01/2004	0.99	0.0000	294.4	292.3	300.6	302.1	298.7	299.2	300.1
13/01/2004	0.99	0.0000	299.1	297.1	305.8	306.4	303.2	303.6	304.5
14/01/2004	0.98	0.0015	301.2	298.6	307.2	311.6	306.7	308.1	308.6
20/01/2004	0.97	0.0048	293.1	289.6	302.1	308.0	300.5	303.9	303.7
30/01/2004	0.98	0.0016	297.7	295.8	300.4	305.8	302.0	302.4	303.1

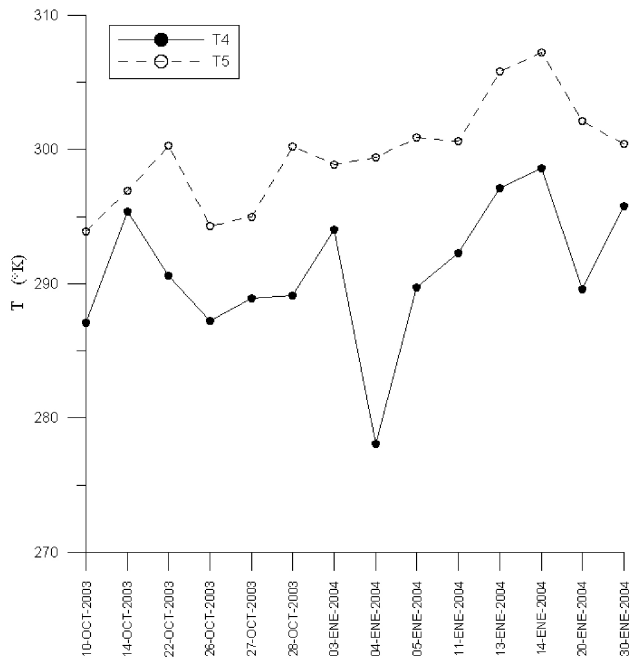


FIGURA 4. Series de tiempo correspondiente a las temperaturas de brillo en los canales espectrales 4 (T_4) y 5 (T_5).

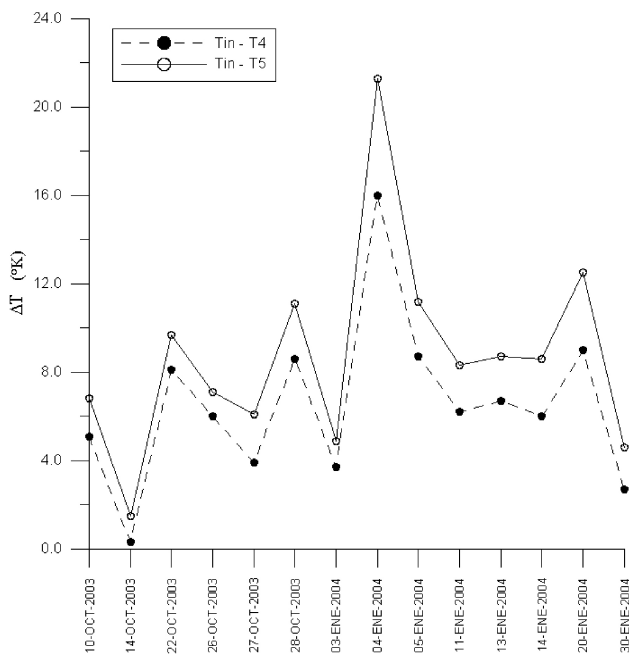


FIGURA 5. Diferencias entre la temperatura de suelo medida in situ (T_{in}) y la de brillo en las bandas 4 (T_4) y 5 (T_5).

Al aplicar los algoritmos de split-window, se observa una disminución en la diferencia entre la temperatura de suelo medida in situ y la estimada por los algoritmos. En este caso, las diferencias se encuentran acotadas en $\pm 6^\circ\text{K}$ (Fig. 6).

En la Tabla VII, se ilustra un cuadro resumen, con la media (μ) y la desviación estándar (σ) de la diferencia entre la temperatura de suelo medida in situ, T_{in} , y las temperaturas de brillo T_4 , T_5 y la temperatura estimada por los distintos algoritmos, T_s .

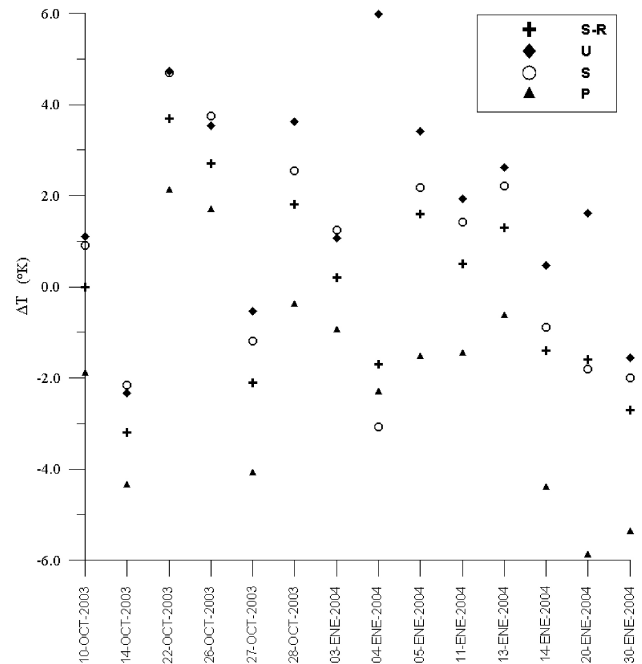


FIGURA 6. Diferencias entre la temperatura de suelo medida in situ y la estimada por aplicación de los distintos algoritmos: Price (P), Ulivieri (U), Sobrino (S) y Sobrino-Raussoni (S-R).

TABLA VII. Media (μ) y desviación estándar (σ) de la diferencia entre la temperatura de suelo medida in situ (T_{in}), y las temperaturas de brillo en las bandas 4 y 5 (T_4 , T_5), y la temperatura estimada (T_s) por los diferentes algoritmos.

$\Delta T(\text{K})$	$\mu(\text{K})$	$\sigma(\text{K})$
$T_{in} - T_4$	6.50	3.70
$T_{in} - T_5$	8.74	4.66
$T_{in} - T_s (\text{P})$	-2.11	2.46
$T_{in} - T_s (\text{U})$	1.83	2.36
$T_{in} - T_s (\text{S})$	0.56	2.41
$T_{in} - T_s (\text{S-R})$	-0.06	2.11

La representación gráfica de la diferencia entre la temperatura de suelo medida in situ y la estimada por aplicación de los distintos algoritmos, además de la media y desviación estándar, se ilustra en la Fig. 7.

Al aplicar los distintos algoritmos de split-window, se destaca una importante reducción lograda en los valores de la media (μK). Los mejores resultados son los obtenidos con el de Sobrino y Raussoni, algoritmo que considera una mayor variabilidad de condiciones atmosféricas ($W = 0.15$ a 6.7 g cm^{-2}), así como la dependencia explícita que tiene con el vapor de agua. Esta dependencia es del orden de 0.5K .

4. Conclusiones

Las temperaturas de brillo obtenidas a partir del sensor AVHRR-NOAA presentan valores menores a los obtenidos

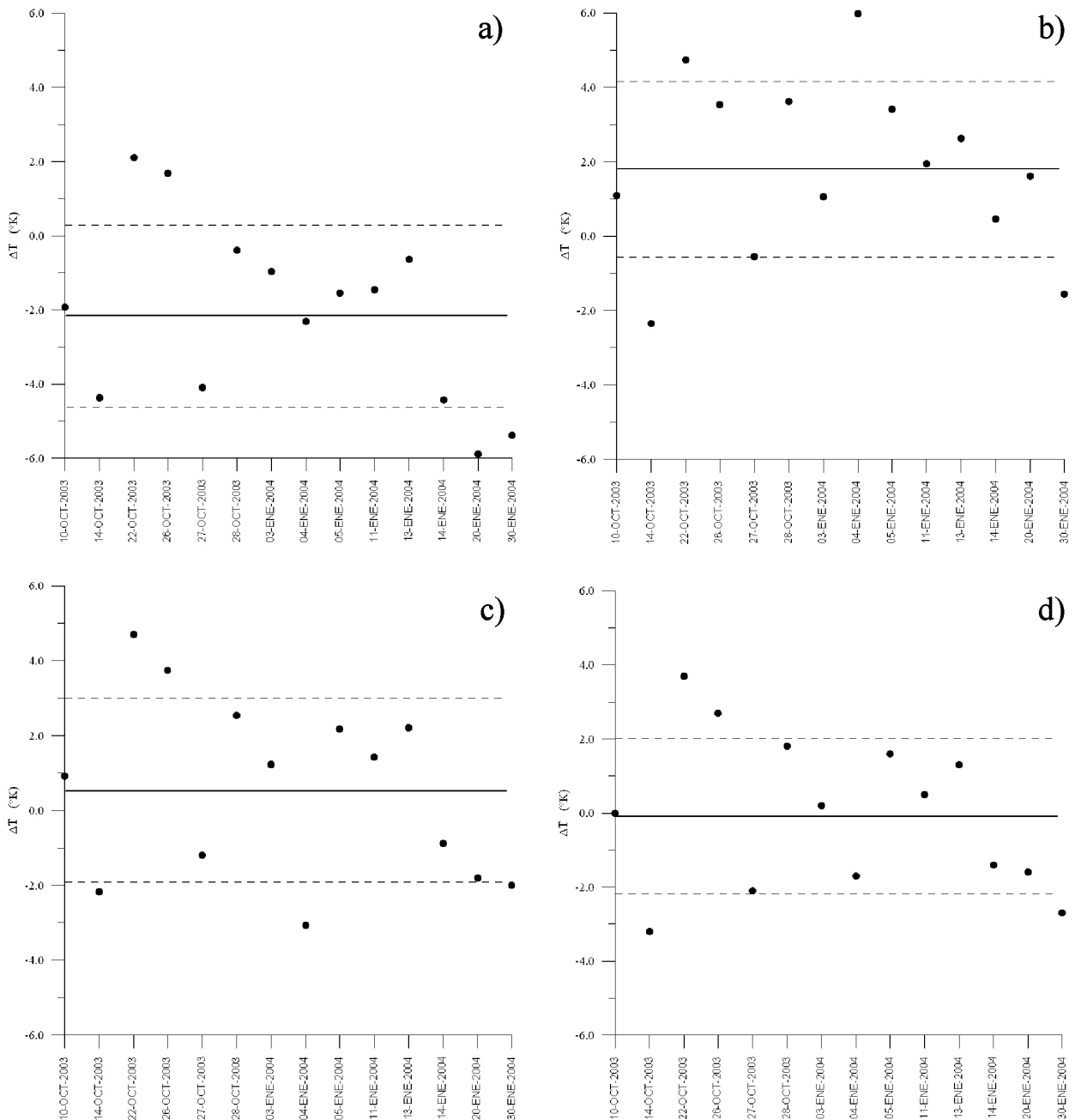


FIGURA 7. Diferencias entre la temperatura de suelo medida in situ y la estimada por aplicación de los distintos algoritmos: (a) Price; (b) Olivieri; (c) Sobrino; (d) Sobrino – Raussoni. La línea continua indica la media, en tanto, la segmentada la desviación estándar.

con mediciones en terreno. La media de la diferencia entre las temperaturas de suelo medidas in situ y las de brillo para las bandas 4 y 5, son de 6.50 y 8.74K respectivamente.

Con el propósito de reducir dichas diferencias, se han aplicado diferentes algoritmos que basados en la técnica de split-window, permiten estimar la temperatura de suelo considerando correcciones por emisividad y atmosférica. Los resultados obtenidos muestran que la aplicación de dichos algoritmos reducen de manera significativa la media de la diferencia entre la temperatura de suelo medida *in situ* y la estimada, con valores menores o igual a 2.11K.

De los cuatro algoritmos aplicados, el propuesto por Sobrino y Raussoni (S-R) presenta los valores menores para la

media y desviación estándar ($\mu=0.06K$ y $\sigma=2.11K$) de la diferencia entre la temperatura de suelo medida in situ y la temperatura calculada. Lo anterior, debido a la introducción del parámetro W en el algoritmo de Sobrino y Raussoni.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero prestado por el Proyecto DIDUFRO N° 120320, Dirección de Investigación y Desarrollo, Universidad de La Frontera (Chile). Al mismo tiempo, agradecer al Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS) por acceder gratuitamente a las imágenes NOAA-16.

1. J.A. Sobrino y M.H. El Kharraz, *J. Geophys. Res.* **104** (1991a) 9445.
2. J.A. Sobrino y M.H. El Kharraz, *J. Geophys. Res.* **104** (1991b) 9455.
3. C.M. Di Bella, C.M. Rebella y J.M. Paruelo, *Int. J. Remote Sens.* **21** (2000) 791
4. L. Morales y J.C. Parra, *Rev. Mex. Fís.* **48** (2002) 119.
5. C. Coll, V. Caselles y J.A.Sobrino, *Rev. Española de Física* (1991) 25
6. J.A. Sobrino *et al.*, *Int. J. Remote Sens.* **25** (2004) 215.
7. L. Mc. Millin, *J. Geophys. Res.* **36**, (1975) 5113.
8. P. Deschamps, T. Phulpin, *Bound. Layer Met.* **18** (1980) 131
9. E.P. Mc Clain, W.G. Pichel y C.C. Walton, *J. Geophys. Res.* **C6** (1985) 11587.
10. J.A. Sobrino, Z-L Li y M.P.Stoll, *IEEE Trans. and Geosc. and Remote Sens.* **31** (1993) 946.
11. J.C. Price, *J.Geophys. Res.* **89** (1984) 7231.
12. C. Olivieri, M. Castronuovo, R. Francioni y A. Cardillo, *Adv. Space Res.* **14** (1992) 59.
13. J.A. Sobrino, V. Caselles y C. Coll, *II Nuevo Cimento* **16** (1993a) 219.
14. J.A. Sobrino y N. Raussoni, *Int. J. Remote Sens.* **21** (2000) 353.
15. S.A. Novoa y C.S. Villaseca, *Mapa Agroclimático de Chile*, (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, 1989).
16. T.J. Tosso, *Suelos volcánicos de Chile*, (Ministerio de Agricultura, Santiago, 1985).
17. J.A. Sobrino, *Teledetección* (Universitat València, 2000).
18. J. Rouse, R. Haas, W. Shell, J.A. Deering y J.C. Harlan, (NASA/GSFC, MA, USA, 1974).
19. P. Durán y P. Acevedo, *Rev. Mex. Fís.* **48** (2002) 116.
20. P. Durán y P. Acevedo, XI Simposio Latinoamericano sobre Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial - SELPER, Santiago, Chile, 22-26 Noviembre (2004).
21. T. Carlson y D. Ripley, *Remote Sens. Environ.* **62** (1997) 241.
22. E. Kalnay *et. al.*, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **77** (1996) 437.
23. R. Kistler *et al.*, *Bull. Meteor. Soc.* **82** (2001) 247.
24. L. Morales, J.C. Parra y J.A. Sobrino, *Proc. Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Valencia, España (2002) 698.