

INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA DEL AIRE INCORPORANDO IMÁGENES AVHRR

M. IBÁÑEZ y J.I. ROSELL

m.ibanez@macs.udl.es

Dept. Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida, Av. Rovira Roure 177, E25198 Lleida

RESUMEN: Las imágenes de satélite se han combinado con datos de superficie en muchas aplicaciones pero en pocas ocasiones se han incorporado en las técnicas de interpolación espacial de temperatura del aire. Las dificultades para localizar las estaciones meteorológicas en imágenes AVHRR-NOAA y para determinar la temperatura radiativa de superficie con una precisión razonable justifican este hecho. La estimación de la temperatura media y máxima diaria del aire a escala regional y en tiempo real es requerida habitualmente para aplicaciones operativas en hidrología y meteorología. No hay evidencia de que ningún método de interpolación disponible sea superior al resto cuando se dispone de escasas estaciones en superficie. Incluso el uso de las técnicas de krigeado no está justificado en estas condiciones. Este trabajo estudia la viabilidad de siete métodos sencillos comparándolos a través de un test de validación cruzada. Se proponen dos nuevas alternativas que incorporan la información proveniente imágenes del sensor AVHRR. Una de estas propuestas, el método del 'gradiente AVHRR y el inverso de la distancia' da un error medio de 1°C para la temperatura media diaria y 1.3°C para la temperatura máxima. En la zona de relieve montañoso estudiada este método es el que aporta mejores resultados.

Palabras clave: Interpolación espacial, temperatura del aire, AVHRR.

ABSTRACT: Synergy of satellite and ground-based data has long been used for different purposes but it is rarely used to improve spatial interpolation techniques of air temperature data. The difficulties locating one specific meteorological station in an AVHRR image and obtaining surface temperature with a reasonable precision are some arguments for its rare use. Spatial estimation of daily mean and maximum temperatures is frequently required for operational applications in hydrology and meteorology. There is little evidence that any interpolation method is optimum even kriging methods, which are well-proven techniques, are not justified when only few meteorological stations are available. This paper studies the performance of seven simple methods of interpolation based on the root mean square errors from cross validation tests. Two new alternatives which used AVHRR images are proposed. One of the methods, the 'AVHRR gradient plus inverse distance' gives errors which average 1.0 °C for daily mean and 1.3 °C for mean daily maximum temperatures. This new method is the most suitable for interpolation in the studied mountainous region.

Key words: Spatial interpolation, air temperature, AVHRR

INTRODUCCIÓN

Los métodos de interpolación más habitualmente aplicados para la estimación de la temperatura del aire y la precipitación a partir de datos de estaciones meteorológicas incluyen la ponderación con la distancia (Tabios III and Salas, 1985; Lennon and Turner, 1995; Ashraf *et al.*, 1997; Dodson and Marks, 1997), los polinomios (Tabios III and Salas, 1985; Lennon and Turner, 1995), el krigeado (Tabios III and Salas, 1985; Phillips *et al.*,

1992; Holdaway, 1996; Ashraf *et al.*, 1997) y los splines (Hulme *et al.*, 1995; Lennon and Turner, 1995). La técnica más sencilla es la ponderación con la distancia, en la que se estima la variable de interés asignando más peso a las medidas más próximas que se han realizado de ella. El polinomio de interpolación ajusta una función polinómica del grado apropiado a los puntos conocidos. El krigeado asigna pesos a los valores medidos minimizando la varianza y el sesgo de las estimaciones.

Los métodos de spline, equivalentes al krigeado con una función de covarianza, ajustan polinomios a un conjunto restringido de puntos para dar la superficie de curvatura mínima. No hay evidencia de que uno de los métodos sea el mejor para todas las condiciones, por lo tanto es necesario determinar cual es la técnica que da mejores resultados en cada circunstancia (Lennon and Turner, 1995).

Muchas aplicaciones hidrológicas y meteorológicas requieren un método sencillo y rápido para estimar en tiempo real la temperatura diaria media y máxima en un área de interés. El krigeado tiene la ventaja de que es una técnica bien validada con programas comerciales ya desarrollados pero tiene un coste económico y temporal elevado. Económico porque requiere un elevado número de estaciones meteorológicas pocas veces disponibles. Un insuficiente número de estaciones conduce a variogramas inestables y modelos inapropiados. Bilonik (1983) sugirió que 50 datos eran los mínimos para aplicar el método correctamente. Los diferentes métodos de krigeado se han descartado de este estudio pues en pocas zonas de la Península se puede encontrar este número de estaciones, que proveen datos meteorológicos en tiempo real, para obtener mapas de temperatura del aire a escala semidetallada. El coste temporal resulta de la metodología empleada en el krigeado. Se probarán alternativas más ágiles y sencillas.

La combinación de datos de satélite y de superficie ha sido aplicada de muy diferentes formas. Las aplicaciones en la interpolación de variables meteorológicas diarias son escasas. Una de las dificultades principales es la localización de las estaciones en imágenes de baja resolución espacial debido a los errores en la georreferenciación. En este trabajo se propone un método que incorpora la información proveniente del sensor AVHRR-NOAA evitando la dificultad de una precisa georreferenciación. Este sensor de elevada resolución temporal permite mediante algoritmos de ventana partida determinar la temperatura radiativa de superficie con un error inferior 1°C. La obtención de mapas de temperatura de superficie ofrece la posibilidad de obtener gradientes de esta magnitud que incorporados a los métodos de interpolación existentes mejoran el resultado de las estimaciones sin tener un conocimiento preciso de la localización de las estaciones meteorológicas en la imagen.

LOCALIZACIÓN Y DATOS DISPONIBLES

Las temperaturas del aire estudiadas fueron tomadas en estaciones meteorológicas localizadas en la Cataluña central. El área, muy dañada en 1998 por diferentes incendios, supera los 5000 km² de extensión. El clima es continental. Se dispone de 11 estaciones me-

teorológicas automáticas distribuidas en la zona o próximas a ella (Tabla 1). La altitud varía de 250 a 860m.

Para el estudio se escogieron 20 fechas, según la disponibilidad de imágenes, distribuidas a lo largo del año anterior a los incendios (desde julio de 1997 hasta Julio de 1998) y se dispuso de un modelo digital del terreno con una resolución de 100 m.

La obtención de mapas regionales de temperatura de superficie sólo es factible a partir de imágenes de satélite. Las medidas en el térmico fueron realizadas por el sensor AVHRR. Se analizaron las imágenes captadas por este sensor hacia el mediodía en las fechas seleccionadas.

Después de las correcciones radiométrica, geométrica y de nubosidad, se calculó la temperatura radiativa de superficie aplicando un algoritmo tipo ventana partida propuesto por Coll *et al.* (1994) incluyendo la corrección por emisividad basada en el NDVI según describen Valor y Caselles (1996).

Estación	Coordenadas UTM (m)		
	X	Y	Z
Clariana	382830	4645815	693
Pinós	377232	4628439	650
Guardiola	407400	4676020	720
La Quar	414240	4659470	860
Sant Salvador	397475	4614540	349
Manresa	402590	4619980	250
Castellnou	404360	4631845	500
Igualada	385550	4603995	548
Els Hostalets	400630	4598640	312
Cervera	358240	4615380	558
Els Plans de Sió	350600	4616925	440

Tabla 1. Nombre y coordenadas UTM de las estaciones.

MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

En el estudio se aplicaron los siete métodos siguientes. De éstos, los cuatro primeros han sido estudiados en profundidad en las diferentes referencias citadas anteriormente:

- (1) Vecino más próximo (VP)
 - (2) Inverso de la distancia al cuadrado (ID)
 - (3) Polinomio (P)
 - (4) Gradiente y el vecino más próximo (GVP)
 - (5) Gradiente y el inverso de la distancia (GID)
- (Nalder y Wein, 1998)

Los dos métodos originales presentados en este trabajo se diferencian de los dos anteriores en que el gradiente aplicado es obtenido utilizando el mapa de temperatura de superficie y no a partir de las temperaturas del aire medidas en las estaciones.

(6) Gradiente AVHRR y el vecino más próximo (GAVP). La imagen AVHRR procesada ofrece un mapa de temperaturas de superficie. La georreferenciación de la imagen y el modelo digital del terreno permiten determinar la localización y la altitud de los píxeles del área estudiada. Se realiza una regresión lineal múltiple de la temperatura radiativa frente a las coordenadas UTM (X, Y, Z) de cada píxel para obtener los gradientes en las tres direcciones (A, B, C). En este primer método propuesto los gradientes se combinan con la medida de temperatura del aire realizada en la estación meteorológica más próxima al lugar del estudio para dar la expresión:

$$T = T_p + A \cdot (X - X_p) + B \cdot (Y - Y_p) + C \cdot (Z - Z_p)$$

Siendo T_p la temperatura del aire en la estación más próxima de coordenadas (X_p, Y_p, Z_p) y las coordenadas del lugar estudiado (X, Y, Z) .

(7) Gradiente AVHRR y el inverso de la distancia (GAID). En este segundo método propuesto los gradientes obtenidos de igual forma que en el apartado anterior se combinan con el método del inverso de la distancia al cuadrado. La expresión utilizada para estimar la temperatura del aire en el lugar deseado es:

$$T = \left[\frac{\sum_{i=1}^N T_i + A \cdot (X - X_i) + B \cdot (Y - Y_i) + C \cdot (Z - Z_i)}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}} \right] \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}}$$

siendo T_i la temperatura del aire en la estación i de coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) y d_i la distancia de esta estación al lugar estudiado (X, Y, Z) .

Para probar la validez de los métodos se estimó la temperatura máxima y media en cada estación excluyéndola de los datos de entrada. Esta forma de operar es conocida como 'validación cruzada' (Hulme *et al.*, 1995; Holdaway, 1996). Para cada método y cada fecha se dispuso de un mínimo de nueve estaciones. El error cometido en cada estación se evaluó como el valor medido menos el estimado, para analizar estos resultados se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para aplicar cuatro de los métodos propuestos necesitamos los gradientes, de temperatura del aire o de temperatura de la superficie. Estos gradientes son los coeficientes del polinomio obtenido de la regresión de la temperatura frente a las coordenadas y la altitud. Las regresiones múltiples realizadas para las temperaturas media y máxima del aire y la temperatura de superficie revelan gradientes importantes. La Figura 1 presenta los coeficientes de determinación para las tres temperaturas en cada fecha. Se muestra que en el peor de los casos r^2 supera 0.4. Valores más elevados del coeficiente de

determinación han sido encontrados en otros estudios en áreas continentales (Holdaway, 1996; Nalder and Wein, 1998).

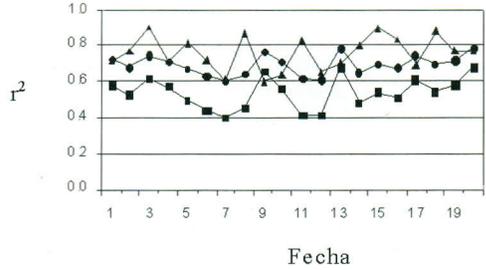


Figura 1. Coeficientes de determinación para la temperatura del aire media (●), la temperatura del aire máxima (■) y la temperatura de superficie (▲) en cada fecha.

La validación cruzada llevada a cabo para comparar los diferentes métodos ofrece los resultados presentados en la Tabla 2. El error medio es relativamente pequeño para todos los métodos comparados siendo el error máximo para las temperaturas medias inferior a 2°C y para las temperaturas máximas inferior 3°C.

Métodos	Ta Media (°C)	Ta Máxima (°C)
VP	1.9	2.3
ID	1.9	2.6
P	1.6	2.7
GVP	1.4	2.1
GID	1.1	1.3
GAVP	1.2	1.9
GAID	1.0	1.3

Tabla 2. RMSE de los diferentes métodos para la temperatura del aire media y máxima diaria.

Los errores inferiores siempre se obtienen en los métodos en los que interviene algún tipo de gradiente. Tanto para las temperaturas del aire máximas como para las medias los métodos GID y GAID, donde se aplica algún tipo de gradiente combinado con la ponderación por el inverso de la distancia al cuadrado, ofrecen los mejores resultados. Basándonos en las medias absolutas de los errores obtenidos en la validación cruzada, los métodos se pueden clasificar para la temperatura media diaria de mejor a peor en el siguiente orden:

$$\text{GAID} > \text{GID} > \text{GAVP} > \text{GVP} > \text{P} > \text{VP} > \text{ID}.$$

Para la interpolación de la temperatura diaria máxima el orden resultante es:

GID > GAID > GAVP > GVP > VP > ID > P

Para todos métodos se observan importantes variaciones en el error a lo largo del año pero no se pueden definir tendencias claramente estacionales.

El método GAID fue utilizado como método patrón para estudiar si existían diferencias significativas entre las estimaciones aportadas por las diferentes técnicas. Este análisis permite afirmar que en cuanto a la interpolación de temperaturas medias, al 1% de nivel de significación, GAID es diferente de los métodos VP, ID y P. Para la temperatura máxima, GAID es diferente del resto de métodos.

CONCLUSIONES

Para la estimación de temperaturas medias y máximas diarias a partir de unas pocas estaciones meteorológicas y en una zona de paisaje abrupto los métodos sencillos interpolan muy bien, tal y como ya habían mostrado otros autores (Lennon and Turner, 1995). El método GID tal y como lo propusieron Nalder and Wein (1998) da buenos resultados. Este método es de sencilla aplicación y da errores adecuados para temperaturas medias y máximas. Con todo, se ofrece una alternativa que reduce estos errores pero requiere de imágenes de satélite. El nuevo método llamado Gradiente AVHRR y el inverso de la distancia al cuadrado da mejores resultados en el área estudiada y con las estaciones disponibles. El error es para la temperatura media de 1°C y para la máxima de 1.3°C.

BIBLIOGRAFÍA

ASHRAF, M., J. C. LOFTIS y K. G. HUBBARD, 1997. Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks. *Agric. For. Meteorol.*, 84, 225-271.

BILONIK, R. A., 1983. Risk qualified maps of hydrogen ion concentration for the New York state area for 1966-1978. *Atmos. Environ.*, 17, 2513-2524

COLL, C., V. CASELLES, J. A. SOBRINO y E. VALOR, 1994. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *Int. J. Rem. Sens.*, 15, 105-122.

DODSON, R. y D. MARKS, 1997. Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Clim. Res.*, 8, 1-20.

HAMMOND, T., J. YARIE, 1996. Spatial prediction of climate state factor regions in Alaska. *Ecoscience*, 3, 490-501.

HOLDAWAY, M. R., 1996. Spatial modeling and interpolation of monthly temperature using kriging. *Clim. Res.*, 6, 215-225.

HULME, M., D. CONWAY, P. D. JONES, T. JIANG, E. M. BARROW y C. TURNEY, 1995. Construction of a 1961-1990 European climatology for climate change modelling and impact applications. *Int. J. Climatol.*, 15, 1333-1363.

LENNON, J. J. y J. R. G. TURNER, 1995. Predicting the spatial distribution of climate: temperature in Great Britain. *J. Anim. Ecol.*, 64, 370-392.

NALDER, I. A. y R. W. WEIN, 1998. Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agric. For. Meteorol.*, 92, 211-225.

PHILLIPS, D. L., J. DOLPH y D. MARKS, 1992. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agric. For. Meteorol.*, 58, 119-141.

TABIOS III, G. Q. y J. D. SALAS, 1985. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water resour. Bull.*, 21, 365-380.

VALOR, E. y V. CASELLES, 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to european, african and south american areas. *Rem. Sens. Environ.*, 57, 167 - 184.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a la cesión de las imágenes del sensor AVHRR-NOAA por el CREPAD (Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial) y a los datos de estaciones meteorológicas por el Servei de Meteorologia y el departament de Agricultura, Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya.