

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN Y DE REGRESIÓN PARA LA CARTOGRAFÍA DE TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS ABSOLUTAS: EL CASO DE NAVARRA (NORTE DE ESPAÑA) EN 2009

Miguel A. Saz-Sánchez, Roberto Serrano-Notivoli
Martín de Luis-Arrillaga, Luis A. Longares-Aladrén

*Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio.
Universidad de Zaragoza
masaz@unizar.es*

RESUMEN

Este trabajo analiza la calidad final de diferentes cartografías de la temperatura máxima y mínima absoluta de Navarra (N. de España) en 2009. Se han realizado 12 cartografías para cada una de esas variables utilizando diferentes métodos de interpolación local, geoestadística, global y mixta. Su calidad se ha evaluado a partir de una muestra independiente de datos y mediante el cálculo del Error Medio Absoluto (MAE) y del Error Cuadrático Medio (RMSE). Los resultados señalan que las cartografías con un error estimado más bajo son las elaboradas a partir de modelos de regresión múltiple por pasos y corrección posterior del error mediante la cartografía de residuales.

Palabras clave: Temperaturas Máximas y Mínimas Absolutas, Métodos de Interpolación, Error Medio Absoluto (MAE), Error Cuadrático Medio (RMSE), Navarra

ABSTRACT

This paper analyzes the final quality of different cartographies of the absolute maximum and minimum temperature of Navarra in 2009 (N. of Spain). 12 maps for each of these variables have been performed using different methods of interpolation, local, geostatistics, global and mixed. The quality of these maps has been evaluated from an independent sample of data by calculating the mean absolute error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE). The results show that the maps with a lower estimated error are made from multiple regression models for subsequent steps and error correction by mapping residuals.

Key words: Absolute Maximum and Minimum Temperatures, Interpolation Methods, Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (RMSE), Navarra

1. INTRODUCCIÓN

La influencia que el clima tiene sobre muchos de los procesos bióticos y abióticos que se desarrollan en la superficie terrestre, su decisiva participación en la agricultura, su relación con actividades humanas tan importantes desde el punto de vista económico como el turismo e incluso su incidencia sobre la salud humana, entre otros aspectos, han hecho que cada vez

más y desde más ámbitos, se estén demandando cartografías que representen con precisión la variabilidad espacial de las variables climáticas.

El principal problema es el relacionado con el carácter puntual de los datos y la heterogénea distribución espacial de los observatorios, más numerosos en zonas con elevadas densidades de población o de clara orientación agrícola y escasos, cuando no inexistentes, en zonas de montaña. Para resolver este problema se han desarrollado diferentes métodos de interpolación que permiten obtener superficies continuas, en las que se hayan estimado los valores climáticos en aquellos puntos, evidentemente mayoritarios, en los que no existe observatorio instrumental. Mapas de este tipo se han desarrollado para áreas que cubren desde unos pocos miles de kilómetros cuadrados (NINYEROLA *et al*, 2000, MORAL, 2010) hasta escalas continentales (HULME *et al* 1995) e incluso el globo terráqueo (WILLMOTT y ROBESON, 1995), ofreciendo en general buenos resultados cuando se trata de cartografiar variables medias mensuales, estacionales o anuales (VICENTE *et al*, 2003). No son sin embargo tan abundantes los trabajos en los que se evalúe la validez de los distintos métodos de interpolación a la hora de representar en un mapa valores extremos.

En este trabajo se analiza la calidad final de distintos métodos de interpolación aplicados a las temperaturas máximas y mínimas absolutas registradas en Navarra en 2009. Navarra, con 10.391 km² de extensión, alberga una notable heterogeneidad térmica, fruto de las distintas influencias que sobre las temperaturas ejercen la mayor o menor cercanía al Cantábrico, la altitud y la orientación. En este sentido, podrían considerarse cuatro zonas climáticas: la Noroccidental o Atlántica, de características plenamente oceánicas; el Pirineo, con una distribución espacial de las temperaturas condicionada por la topografía y con un carácter más continental que en el caso de los valles cantábricos; la Zona Media, de características más mediterráneas pero con una clara influencia atlántica; y por último la Ribera del Ebro, de clima Mediterráneo continental e incluso continental seco en algunos espacios.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2. 1. Datos

Para la realización de las distintas cartografías se utilizaron los datos de la temperatura máxima y mínima absoluta mensual en 2009 de 337 observatorios instrumentales, base de datos obtenida de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). De ellos, 108 observatorios están localizados en la Comunidad Foral de Navarra y 229 en las provincias limítrofes. En el caso de las temperaturas máximas absolutas, se desecharon todos los observatorios que no tuviesen registros durante los meses de mayo a septiembre, mientras que para las mínimas absolutas, se hizo lo mismo con aquellos que no registrasen valores mínimos en los meses de noviembre a marzo. Además, para depurar esta base de datos se eliminaron, tanto en el caso de las máximas como de las mínimas absolutas, todos los registros que quedasen por debajo del percentil 1 o por encima del percentil 99. La base de datos disponible se redujo a 229 observatorios en el caso de las temperaturas máximas absolutas y 230 en el de las mínimas. De ellos se seleccionaron de manera aleatoria un 80% para la aplicación de los distintos métodos de interpolación y de regresión, reservándose un 20% para la validación. Para los modelos de regresión se utilizó un modelo digital de elevaciones (MDE) de un tamaño de celda de 100 metros y capas digitales de la misma resolución de la orientación, rugosidad del terreno (según el método descrito por ALLMARAS *et al*, 1966, CURRENCE y LOVELY, 1977), de distancia al Mar Cantábrico y Mar Mediterráneo, latitud (UTMY) y longitud (UTMX), generadas en ArcGIS 9.2 a partir del MDE.

2. 2. Métodos de interpolación

En total se han realizado 12 cartografías de cada una de las variables. BURROUGH y MCDONELL (1998) clasifican los métodos de interpolación en locales, geoestadísticos, globales y mixtos, existiendo en la literatura científica numerosos ejemplos de aplicación de estos métodos a variables climáticas. Las operaciones con los grid y los distintos métodos de interpolación se han aplicado utilizando la extensión de análisis geoestadístico de ArcGIS 9.2. Los cálculos de los modelos se han realizado en SPSS.

Los interpoladores locales no utilizan información auxiliar y únicamente se sirven de los datos climáticos de los observatorios existentes en la base de datos. Captan bien la variabilidad de alta frecuencia, es decir, las variaciones del clima debidas a factores de carácter más local. En este trabajo se han utilizado el inverso a la distancia y las *splines* o funciones radiales. Estos métodos seleccionan un conjunto de estaciones cercanas al punto en el que queremos obtener el valor climático y aplican una función matemática que trata de representar la variación de la variable climática en el espacio (BURROUGH y MCDONELL, 1998). El proceso termina cuando se han estimado los valores climáticos en todos los puntos (celdas del grid) del área de estudio (en este trabajo, 3242 x 2625 celdas). El inverso a la distancia estima los valores a partir de un promedio ponderado con los datos de los puntos de muestreo existentes en el conjunto de interpolación seleccionado, teniendo más peso los puntos más cercanos al existir una ponderación en función de la distancia. En nuestro caso se han utilizado para el cálculo los datos de los 15 observatorios, optimizando el factor de ponderación en función de la distancia para obtener un valor de error más bajo en la validación cruzada realizada por el SIG. Con el método de los *splines* o funciones radiales tratamos de encontrar la función regular continua y derivable que se adapta mejor a los datos del conjunto de interpolación seleccionado sin perder sus propiedades de continuidad. En MITASOVA *et al* (1995), VICENTE *et al* (2003) se aportan detalles sobre la obtención de estas funciones. Como en el caso anterior se requiere de la delimitación del conjunto de interpolación, que se ha establecido también en 15 observatorios, y de un parámetro de tensión, buscando de nuevo obtener un valor de error más bajo en la validación cruzada realizada por el SIG. Los métodos del inverso a la distancia y de los *splines* o funciones radiales se han aplicado también con un factor de suavizado 0,5.

La aplicación de métodos geoestadísticos a la cartografía de datos climáticos ha aumentado en los últimos años gracias a la generalización de los SIG. BURROUGH y MCDONELL, (1998), GOOVAERTS (1997), ISAAKS Y STRIVASTAVA, 1989) describen las diferentes técnicas geoestadísticas, señalando GOOVAERTS (1997), y MORAL (2010), sus ventajas frente a los métodos deterministas al tener en cuenta la autocorrelación espacial de los datos. Los métodos de kriging estiman el valor que un determinado atributo tomaría en un punto a partir de los valores observados en los puntos vecinos, teniendo en cuenta unos factores de ponderación determinados. Esta ponderación no sólo tiene en cuenta la distancia, sino que también toma en consideración la relación espacial general que en todo el área de estudio se establece entre los valores de los diferentes pares de puntos situados a distancias similares, integrando de esta forma una consideración espacial más amplia sobre la variación del atributo que la que asumen los métodos de interpolación local. Para tratar de evaluar esa nueva forma de variabilidad en el espacio del y obtener unos pesos de ponderación basados en ella, hemos de calcular la semivarianza, que se visualiza a partir de un semivariograma. Ese semivariograma indica hasta dónde llega la dependencia espacial de los puntos muestrales. En este trabajo se han aplicado el simple kriging y el ordinary kriging.

Los métodos globales recurren a información externa, creando modelos de dependencia entre los datos climáticos y un conjunto de predictores. En este trabajo hemos aplicado dos métodos globales diferentes, los basados en superficies de tendencia de distinto orden y los basados en modelos de regresión múltiple a partir de un conjunto más o menos amplio de variables que, de forma empírica, entendemos que pueden influir en la distribución espacial de la variable cartografiada. Los primeros son más adecuados cuando las variaciones de un atributo en el espacio se producen de forma continua. Esa variación espacial es posible modelizarla a partir de la obtención de superficies matemáticas suavizadas, mediante el ajuste de las observaciones a ecuaciones polinomiales de distinto orden, de tal forma que los valores de aquellos puntos en los que no existe información puedan ser calculados a partir de la latitud y longitud. En este trabajo se han aplicado superficies de tendencia de orden dos y cuatro. El segundo método global utilizado ha consistido en el cálculo de modelos empíricos de regresión múltiple (AGNEW y PALUTIKOF, 2000, NINYEROLA *et al*, 2000, VICENTE *et al*, 2003, VICENTE *et al*, 2007). En el caso de las variables climáticas, la elevación (MDE) es la variable independiente que un mayor porcentaje de varianza suele explicar. Junto a ella, es habitual incluir como variables explicativas la latitud, la longitud y la distancia al mar. Una primera cartografía de la temperatura máxima y mínima absoluta a partir de un modelo de regresión múltiple por pasos se ha obtenido utilizando como variables independientes el MDE, la latitud, la longitud, la rugosidad y la distancia euclidiana al Cantábrico y al Mediterráneo, todas ellas en forma de grids de 3242 x 2625 celdas. La complejidad topográfica de Navarra y las múltiples influencias que condicionan la distribución espacial de cualquier variable climática en su territorio, aconsejaban la exploración también de predictores más complejos para el análisis de regresión múltiple por pasos. Así, se crearon grids que combinaban esas variables: orientación, coseno de la orientación, seno de la orientación, raíz cuadrada del MDE, longitud * MDE, latitud * MDE, longitud * distancia al Mediterráneo, longitud * distancia al Cantábrico, latitud * distancia al Mediterráneo, latitud * distancia al Cantábrico, MDE * distancia al Mediterráneo, MDE * distancia al Cantábrico, inverso de la distancia al Cantábrico, inverso de la distancia al Mediterráneo, inverso de la distancia al Cantábrico * MDE, inverso de la distancia al Mediterráneo * MDE, inverso de la distancia al Cantábrico * raíz cuadrada del MDE y el inverso de la distancia al Mediterráneo * raíz cuadrada del MDE.

En las tablas 1 a 4 aparecen los resultados del análisis de regresión múltiple por pasos aplicado a los datos de la temperatura máxima y mínima absoluta.

	Coeficientes no estandarizados		t	Sig.
	B	Error típ.		
R = 0,799				
(Constante)	132,2454574	9,2223109	14,3397	0,0000
MDE	-0,0053744	0,0003602	-14,9218	0,0000
latitud	-0,0000199	0,0000020	-9,9009	0,0000
dist_med	0,0000042	0,0000015	2,8445	0,0050

Tabla 1. COEFICIENTES DEL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE POR PASOS OBTENIDO EN EL CASO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA ABSOLUTA CONSIDERANDO SOLO LAS VARIABLES MÁS HABITUALES (MDE, LATITUD, LONGITUD Y DISTANCIA A LOS MARES).

R = 0,813	Coeficientes no estandarizados		t	Sig.
	B	Error típ.		
(Constante)	127,6429109	8,9043526	14,3349	0,0000
MDE	-0,0058115	0,0003648	-15,9326	0,0000
latitud	-0,0000185	0,0000019	-9,9472	0,0000
invdmed	-168077,7043140	49997,1259550	-3,3617	0,0009
invdatXMDE	-191,3946625	64,8183599	-2,9528	0,0036

Tabla 2. COEFICIENTES DEL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE POR PASOS OBTENIDO EN EL CASO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA ABSOLUTA CONSIDERANDO VARIABLES COMBINADAS.

R = 0,567	Coeficientes no estandarizados		t
	B	Error típ.	
(Constante)	-3,5723783	0,4029003	-8,867
MDE	-0,0067985	0,0007324	-9,283

Tabla 3. COEFICIENTES DEL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE POR PASOS OBTENIDO EN EL CASO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA ABSOLUTA CONSIDERANDO SOLO LAS VARIABLES MÁS HABITUALES (MDE, LATITUD, LONGITUD Y DISTANCIA A LOS MARES).

R = 0,636	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	Sig.
	B	Error típ.	Beta	
(Constante)	122,9889710	28,4049767		,000
MDE	-0,0060749	0,0007117	-,507	,000
invdatXMDE	407,1297315	151,6645521	,167	,008
latitud	-0,0000266	0,0000060	-,582	,000
dist_cant	-0,0000189	0,0000049	-,499	,000

Tabla 4. COEFICIENTES DEL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE POR PASOS OBTENIDO EN EL CASO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA ABSOLUTA CONSIDERANDO VARIABLES COMBINADAS.

Por último se han aplicado los conocidos como métodos mixtos, que tratan de combinar las ventajas de la aplicación de los métodos globales y su capacidad para mostrar las variaciones a escala regional del atributo cartografiado, con los métodos locales y sus ventajas a la hora de captar las variaciones debidas a factores locales (NINYEROLA *et al*, 2000, PRUDHOMME y REED, 1999, VICENTE *et al*, 2003). Los métodos globales son inexactos, es decir, que el valor estimado en aquel punto donde existe información muestral y el valor observado no coinciden. Con ellos podemos obtener para cada punto muestral un residual, mediante la resta entre el valor observado y el predicho. Esos residuales serán posteriormente interpolados mediante un interpolador local. Mediante la suma de las cartografías de

corrección y del modelo de regresión obtendremos una cartografía final donde los valores predichos son modificados por las cartografías de corrección. De esta forma, en los lugares de observación obtendremos los valores reales de la variable climática cartografiada.

2. 3. Validación de las cartografías

Para evaluar los doce métodos de interpolación aplicados a cada una de las variables y señalar aquella cartografía que ofrece un error de estimación menor, se han utilizado los datos de ese 20% de observatorios instrumentales reservados como muestra independiente y calculado el Error Absoluto Medio (MAE) y el Error Cuadrático Medio (RMSE) (WILLMOTT, 1982).

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|$$

$$RMSE = \left(N^{-1} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)^{0,5}$$

Siendo N el número de observaciones, P_i el valor predicho y O_i el valor observado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 1 y 2 se muestran las cartografías obtenidas para la temperatura máxima y mínima absoluta en Navarra en 2009. En la tabla 5 se señalan los valores obtenidos en cada una de ellas para MAE y el RMSE a partir de la muestra de datos independientes, un 20% del global de la base de datos.

En el caso de las temperaturas máximas absolutas, son en general los métodos de interpolación globales (modelos de regresión y superficies de tendencia) los que ofrecen valores de error más bajos, excepto en el caso del modelo de regresión múltiple por pasos desarrollada a partir del MDE, latitud, longitud y distancia a los mares, que, a pesar del elevado porcentaje de varianza explicada por el modelo, resulta en un valor de error elevado. Las superficies de tendencia de orden 2 y 4 y los modelos de regresión con corrección de residuales y sin ella (excepto el antes señalado) ofrecen valores del MAE de entre 1,02 y 1,22 °C y de entre 1,29 y 1,53 °C en el caso del RMSE, entre 0,2 y 0,4 ° inferiores en general a los de los métodos locales. Es sin embargo la cartografía obtenida a partir del modelo de regresión múltiple en el que introducíamos como predictores el MDE, la latitud, longitud y distancia a los mares y la posterior corrección mediante residuales la que ofrece unos valores de error más bajos, tanto en el caso del MAE con del RMSE, siendo la que en principio mejor se adecua a la variable que estamos pretendiendo cartografiar.

En el caso de las temperaturas mínimas absolutas encontramos una situación distinta. Los interpoladores globales y los geoestadísticos (kriging) son los que peor parecen representar la variable analizada, ofreciendo valores de error más elevados que los interpoladores locales. De los interpoladores locales destaca el resultado obtenido por la cartografía basada en *splines*, que ofrece el valor de RMSE más bajo, de 0,64 °C. Es sin embargo la cartografía desarrollada a partir de modelos de regresión múltiple por pasos con variables complejas (modelo que también arrojaba un elevado porcentaje de varianza explicada) y corrección por residuales, la que da un valor más bajo para el MAE, de sólo 0,29 °C, siendo el valor del RMSE sólo 0,03 °C superior al mínimo que marca la cartografía hecha a partir de *splines*.

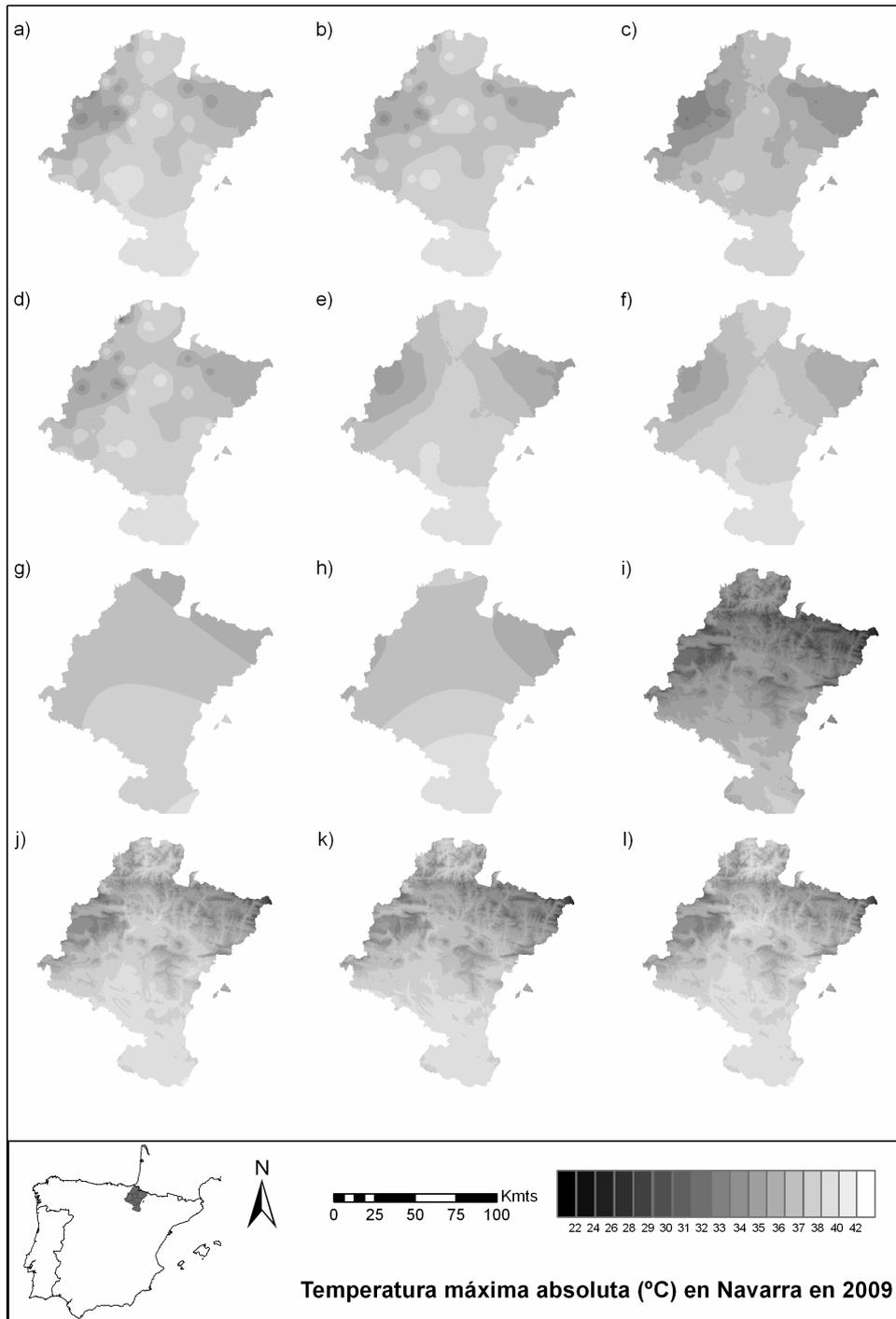


Fig. 2: Resultado de los métodos de interpolación aplicados a la temperatura máxima absoluta en Navarra en 2009. a) Inverso a la distancia, b) Inverso a la distancia con suavizado, c) Funciones radiales o splines, d) Funciones radiales o splines con suavizado, e) Kriging simple, f) Kriging ordinario, g) Superficies de tendencia orden 2, h) Superficies de tendencia orden 4, i) Modelos de regresión múltiple por pasos con variables habituales, j) Modelos de regresión múltiple por pasos con variables habituales y corrección por residuales, k) Modelos de regresión múltiple por pasos con variables complejas, l) Modelos de regresión múltiple por pasos con variables complejas y corrección por residuales

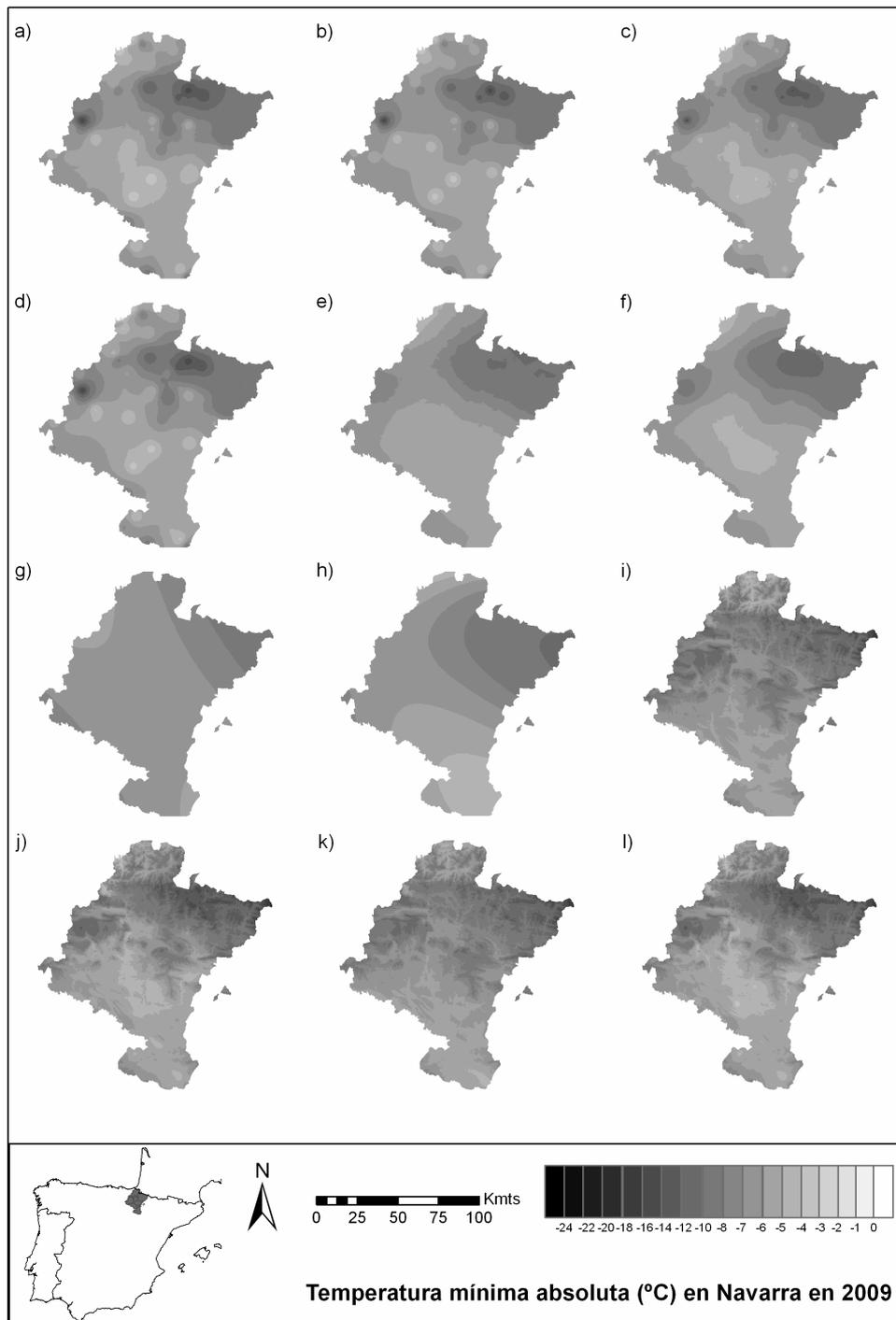


Fig. 3: Resultado de los métodos de interpolación aplicados a la temperatura mínima absoluta en Navarra en 2009. a) Inverso a la distancia, b) Inverso a la distancia con suavizado, c) Funciones radiales o splines, d) Funciones radiales o splines con suavizado, e) Kriging simple, f) Kriging ordinario, g) Superficies de tendencia orden 2, h) Superficies de tendencia orden 4, i) Modelos de regresión múltiple por pasos con variables habituales, j) Modelos de regresión múltiple por pasos con variables habituales y corrección por residuales, k) Modelos de regresión múltiple por pasos con variables complejas, l) Modelos de regresión múltiple por pasos con variables complejas y corrección por residuales

	T°C máx absoluta			T°C mín absoluta	
	MAE	RMSE		MAE	RMSE
a	1,16	1,50	a	0,31	0,76
b	1,18	1,55	b	0,32	0,76
c	1,14	1,51	c	0,32	0,64
d	1,21	1,61	d	0,31	0,71
e	1,52	1,91	e	1,86	2,45
f	1,31	1,69	f	1,56	1,96
g	1,10	1,47	g	1,33	1,67
h	1,14	1,53	h	1,06	1,38
i	2,32	2,67	i	1,91	2,36
j	1,02	1,29	j	0,56	0,79
k	1,22	1,50	k	1,82	2,22
l	1,05	1,33	l	0,29	0,67

Tabla 5. VALORES OBTENIDOS PARA EL ERROR ABSOLUTO MEDIO (MAE) Y EL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE) EN CADA UNA DE LAS 12 CARTOGRAFÍAS REALIZADAS PARA LA TEMPERATURA MÁXIMA ABSOLUTA Y TEMPERATURA MÍNIMA ABSOLUTA EN NAVARRA EN 2009.

Resulta de particular interés esta diferenciación en dos grandes bloques, entre interpoladores globales por un lado, que parecen representar en general mejor la variabilidad espacial de las temperaturas máximas absolutas, y los clasificados como locales, que se adaptan mejor a la plasmación territorial de las mínimas. Esta diferenciación estaría relacionada con los condicionantes atmosféricos y geográficos que condicionan estas variables. En el caso de las máximas, las jornadas con temperaturas elevadas suelen afectar a territorios amplios, modulándose su magnitud en función de la latitud, la altitud del terreno y la distancia a los mares, por su efecto termorregulador. En general los valores térmicos máximos absolutos están condicionados pues por factores que podríamos considerar de escala regional, más allá de los condicionantes atmosféricos que los provocan. Sin embargo, en el caso de las mínimas es bien conocido el hecho de que los registros térmicos más bajos a escala regional y comarcal se producen en fondos de valle (aparte de los que puedan darse en zonas de alta montaña en las que en general no existen mediciones instrumentales), en situaciones de estabilidad atmosférica que se prolongan durante varias jornadas, quedando zonas a mayor altitud, en las que los valores medios son más bajos en función del efecto de esa variable, con unos registros mínimos absolutos superiores, resultando los factores locales, en especial los ligados con la topografía, fundamentales en su desarrollo. En este caso la corrección con residuales resulta fundamental, pues sirve para matizar la información generada por los interpoladores globales basados en los modelos de regresión.

4. CONCLUSIONES

Sin dejar de tomar en consideración en ocasiones la opinión de DALY *et al* (2002) que dan valor a la evaluación subjetiva de las cartografías y al criterio experto a la hora de su selección final, la elección del mejor método de interpolación ha de basarse, como norma general, en los estadísticos de error, eligiéndose aquél método que ofrezca unos valores de MAE o RMSE más bajos.

Para las variables cartografiadas en este trabajo, la temperatura máxima y mínima absoluta de Navarra en 2009, han sido los modelos de regresión múltiple por pasos, ya sea utilizando

variables simples o empleando como predictores combinaciones de estas variables, y la posterior corrección por residuales, los interpoladores que ofrecen los valores de error más bajos, ofreciendo unas estimaciones que, comparando los datos registrados en un conjunto de observatorios independientes con los datos estimados por el método cartográfico en ese punto en el caso de las máximas nos darían un error ligeramente superior a 1 °C, e inferiores a ese umbral en las mínimas. Unos resultados aceptables si tenemos en cuenta la dificultad general existente para cartografiar valores extremos.

5. REFERENCIAS

- AGNEW, M.D. y PALUTIKOF, J.P., 2000 “GIS-based construction of baseline climatologies for the Mediterranean using terrain variables.” *Climate Research* 14, pp. 115-127
- ALLMARAS, R.R, BURWELL, R.E., LARSON, W.E. y HOLT, R.F.(1966). “Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage”. *USDA Conservation Research Report* 7, pp. 1-14.
- BURROUGH P.A, MCDONNELL R.A, (1998). *Principals of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- CURRENCE, H.D. y LOVELY, W.G., (1970). “The analysis of soil surface roughness”. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*. pp. 710-714.
- DALY, C., GIBSON W. P., JOHNSON, G. L. PASTERIS. P. (2002). “A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate”. *Climate Research*, 22. pp 99-113.
- GOOVAERTS, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press
- HULME, M. CONWAY, D. JONES, P.D. JIANG, T. BARROW, E.M. TURNEY C. (1995). “Construction of a 1961–1990 European climatology for climate change modelling and impact applications”. *International Journal of Climatology*. 30, pp. 1333–1363
- ISAAKS, E. H. y SRIVASTAVA, R. M., (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, USA.
- MITASOVA, H, MITAS L, BROWN B M, GERDES D P, KOSINOVSKY I (1995). “Modeling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools for GRASS GIS”. *International Journal of Geographical Information Systems* 9. pp 433-460.
- MORAL, F.J. (2010). “Comparison of different geoestatistical approaches to map climate variables: application to precipitation”. *International Journal of Climatology*. 30, pp. 620-631
- NINYEROLA M, PONS X, ROURE JM. (2000). “A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques”. *International Journal of Climatology*. 20, pp. 1823-1841.
- PRUDHOMME, C y REED, DW (1998). “Relationships between extreme daily precipitation and topography in a mountainous region: a case study in Scotland”. *International Journal of Climatology*, 19, pp. 1337-1453.
- VICENTE, S.M., SAZ, M.A. y CUADRAT, J.M.(2003). “Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature”. *Climate Research* 24, pp 161-180.
- VICENTE, S.M., LANJERI, S. y LÓPEZ-MORENO, J.I. (2007). “Comparison of different procedures to map reference evapotranspiration using geographical information systems and regression-based techniques” *International Journal of Climatology*, 27. pp 1103-1118.
- WILLMOTT C.J. (1982). “Some comments on the evaluation of model performance”. *Bulletin American Meteorological Society*, 63 (11), 1309-1313.
- WILLMOTT, C.J. y ROBESON, S.M. (1995). “Climatologically aided interpolation (CAI) of terrestrial air temperature”. *International Journal of Climatology*, 15(2), pp. 221-229.