



UNIVERSIDAD DE LEÓN



ESCUELA SUPERIOR Y TECNICA DE INGENIEROS DE MINAS

Ingeniería Técnica en Topografía

**GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA CONTINUA PARA
VARIABLES CLIMÁTICAS EN CASTILLA Y LEÓN
MEDIANTE TÉCNICAS DE INTERPOLACIÓN
ESPACIAL**

RESUMEN

JOSÉ MANUEL MACÍAS BARREDO
PONFERRADA, Junio 2013



UNIVERSIDAD DE LEÓN



ESCUELA SUPERIOR Y TECNICA DE INGENIEROS DE MINAS

Ingeniería Técnica en Topografía

**PRODUCTION OF CONTINUOUS CARTOGRAPHY
FOR CLIMATIC VARIABLES IN CASTILLA Y LEÓN
USING SPATIAL INTERPOLATION METHODS**

JOSÉ MANUEL MACÍAS BARREDO
PONFERRADA, Junio 2013

SUMARIO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	1
3. MATERIAL	2
3.1. Datos Meteorológicos de temperatura, precipitación y humedad relativa diarias.	2
3.2. Cartografía de referencia	2
4. METODOLOGÍA	3
4.1. Creación y depuración de la base de datos meteorológicos.	3
4.2. Selección de la muestra de datos.	3
4.3. Generación de cartografía continua de las variables meteorológicas.	3
<u>4.3.1. Métodos de interpolación</u>	3
<i>A) Selección de Métodos de Interpolación.</i>	3
<i>B) Descripción de los métodos de interpolación elegidos.</i>	5
B.1. Krigado Ordinario (KO)	5
B.2. Co-krigado Ordinario (CK)	5
<u>4.3.2. Ajuste de los datos según los diferentes métodos de interpolación</u>	6
<u>4.3.3. Validación de resultados</u>	6
4.3.3.1 Validación cuantitativa no espacial	6
4.3.3.2 Validación cuantitativa espacial	7
5. RESULTADOS	8
5.1. Temperatura.	8
<u>5.1.1. Análisis de exactitud.</u>	8
<u>5.1.2. Comparación estadística de métodos de interpolación.</u>	10
<u>5.1.3. Representación espacial de las diferencias entre métodos de interpolación.</u>	10
<u>5.1.4. Representación espacial de los errores de interpolación.</u>	11
5.2. Precipitación.	12
<u>5.2.1. Análisis de exactitud.</u>	12
<u>5.2.2. Comparación estadística de métodos de interpolación.</u>	13
<u>5.2.3. Representación espacial de las diferencias entre métodos de interpolación.</u>	14
<u>5.2.4. Representación espacial de los errores de interpolación.</u>	15
5.3. Humedad relativa.	15
<u>5.3.1. Análisis de exactitud.</u>	15
<u>5.3.2. Comparación estadística de métodos de interpolación.</u>	17
<u>5.3.3. Representación espacial de las diferencias entre métodos de interpolación.</u>	18
<u>5.3.4. Representación espacial de los errores de interpolación.</u>	18
6. CARTOGRAFÍA FINAL	19
7. CONCLUSIONES	20

1. INTRODUCCIÓN

La generación de cartografía continua de variables meteorológicas ayuda a conocer y analizar la climatología de una determinada zona de estudio. El interés principal de este trabajo es el empleo de esta cartografía como información de partida para modelos que determinen la probabilidad de incendios producidos por rayo dentro de la comunidad de Castilla y León.

Las variables meteorológicas utilizadas son la temperatura, precipitación y humedad relativa. Los datos de las variables utilizadas en este trabajo han sido facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) o bien han sido descargados de sitios web.

La frecuencia de los datos de estas variables es diaria, y su distribución puntual, como en los trabajos de Carrera-Hernández y Gaskin (2007), Jarvis y Stuart (2000) y Martínez-Cob y Cuenca (1992). A partir de los datos registrados por las estaciones meteorológicas se procede a la obtención de nuevos datos puntuales a partir de aquellos disponibles (interpolación). El krigado es el método de interpolación que mejor resulta para la interpolación de variables climáticas (Carrera-Hernández y Gaskin 2007; Holdaway, 1992; Jarvis y Stuart, 2000; Mair y Fares, 2011). El krigado consiste en superponer una malla (o grid) sobre los puntos de control y estimar todos los puntos de la malla teniendo en cuenta la distancia de éstos a los puntos de control. La interpolación se realiza en dos períodos con mayor número de datos que en los demás y en los que se producen con mayor frecuencia incendios por rayo. Un período para la primera quincena de febrero de 2009 (días 1-15) y otro para la segunda quincena (días 17-31) del mes de julio de 2009.

Existen múltiples tipos de krigado, entonces se debe escoger el mejor en función de la cantidad, la distribución y el tipo de datos a utilizar. En este trabajo se utiliza el krigado ordinario y el co-krigado ordinario, este último para incluir la variable elevación y observar si esta variable externa influye en los resultados de la interpolación (Carrera-Hernández y Gaskin ,2006; Mair y Fares, 2011; Martínez-Cob y Cuenca 1992).

Por último se obtienen diferencias significativas entre métodos para la temperatura (Carrera-Hernández y Gaskin ,2006; Martínez-Cob y Cuenca 1992) y la humedad (Martínez-Cob y Cuenca 1992). En el caso de las precipitaciones los dos métodos obtienen precisiones análogas (Hay *et al.* 1998; Mair y Fares 2011) .Según esto y tras analizar cada método para cada una de las variables, se obtiene que el krigado ordinario es el método más preciso a la hora de generar los modelos de interpolación.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es obtener cartografía espacialmente continua diaria de las variables temperatura media, precipitación total y humedad relativa, para la Comunidad Autónoma de Castilla y León, a partir de datos recogidos en las estaciones meteorológicas de Castilla y León y las provincias limítrofes. Como objetivo específico se plantea la determinación del método de interpolación más adecuado para generar la cartografía. El objetivo último de la cartografía generada con este trabajo es su empleo como información de partida en modelos que determinen la probabilidad de incendios producidos por rayo dentro de la comunidad castellano-leonesa, si bien esto último no es objeto de este proyecto.

3. MATERIAL

3.1. Datos Meteorológicos de temperatura, precipitación y humedad relativa diarias.

Los datos climáticos de temperatura, precipitación y humedad relativa utilizados en este trabajo han sido facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) o bien han sido descargados de sitios web.

Para cada estación meteorológica difiere la disponibilidad de cada una de las variables utilizadas en el estudio, pudiendo disponer de datos para una, dos o la totalidad de las variables, así la cantidad de éstas pueden variar dependiendo del tipo de estación meteorológica a la que se haga referencia, la antigüedad de la estación y el período en el que ha estado plenamente operativa.

La figura 1 muestra con diferentes colores y símbolos la ubicación de las estaciones meteorológicas según la fuente de la que proceden, observándose como se trató de obtener una nube de puntos que cubriese de forma homogénea la totalidad del territorio de Castilla y León y las provincias aledañas.

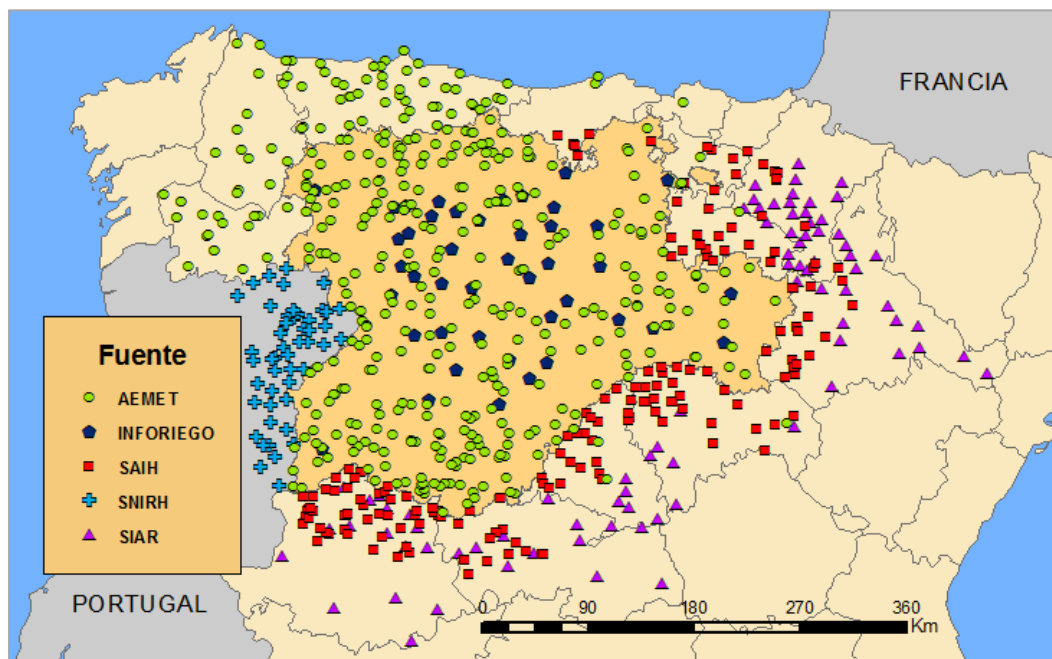


Figura 1. Localización estaciones meteorológicas según fuente.

3.2. Cartografía de referencia

Se ha utilizado cartografía vectorial de tipo polígono para delimitar el área política de cada una de las comunidades españolas, tanto peninsulares como periféricas, así como el límite portugués, la zona sur de Francia y el norte del continente africano, con en formato shapefile (.shp), con datum ETRS89 y sistema de coordenadas UTM Huso 30

Se empleó asimismo cartografía ráster, un modelo digital del terreno (MDT), con cobertura del territorio peninsular español, y sistema de referencia de coordenadas ED50 UTM Huso 30, además de un tamaño de celda de 200 x 200 metros.

4. METODOLOGÍA

4.1. Creación y depuración de la base de datos meteorológicos.

Campos de la base de datos:

- Nombre
- Código
- Provincia/confederación
- Fuente
- Fechas de inicio y fin de datos
- Disposición de las variables
- Coordenadas

Como no todos los datos de partida se encontraban en el sistema, ETRS89 UTM30 (Sistema Geodésico de Referencia en España), se han hecho las transformaciones y conversiones necesarias. La transformación es un cambio de datum, y se realizó entre ED50 y ETRS89 utilizando la rejilla NTV2, mediante el programa informático ArcGIS 9.3. La conversión es un cambio del sistema de coordenadas, y se aplicó para convertir coordenadas geográficas en proyectadas. De este modo todas las coordenadas se refirieron al sistema de referencia de coordenadas ETRS89 UTM Huso 30.

4.2. Selección de la muestra de datos.

Se han elegido dos quincenas de datos para los meses de febrero y julio, la primera quincena de febrero (1-15) y la segunda de julio (17-31), basándose en un estudio por el cual se demuestra que el mayor número de incendios y/o superficie quemada en Castilla y León se produce en dos periodos (estival y no estival) (Cubo *et al.*, 2012). Dentro del rango de años que abarca el estudio (1999-2011), se ha seleccionado el 2009, teniendo en cuenta como criterios el número de datos disponibles así como la representatividad de estos datos tanto para el mes de febrero como para el de julio.

4.3. Generación de cartografía continua de las variables meteorológicas.

4.3.1. Métodos de interpolación

A) Selección de Métodos de Interpolación.

Se requieren métodos que se adapten a cada una de las variables meteorológicas propuestas así como para otras variables físicas de la zona de estudio. Los métodos más habituales de interpolación automática para valores puntuales reales son la triangulación, el método inverso de la distancia y el krigado (*kriging*) (Slocum *et al.*, 2005).

Entre estos tres métodos, el que se ha empleado con mayor éxito en trabajos similares de interpolación de variables meteorológicas es el krigado (Carrera-Hernández y Gaskin, 2007; Holdaway, 1992; Jarvis y Stuart, 2000; Mair y Fares 2011). El krigado es un método que consiste en superponer una malla (o grid) sobre los puntos de control y en estimar los valores para cada punto de la malla teniendo en cuenta su distancia a los puntos de control. Este método considera la autocorrelación espacial existente en los datos, tanto la existente entre el punto de la malla (a estimar) y los puntos de control que lo rodean, como la autocorrelación entre los propios puntos de control (Slocum *et al.*, 2005). Aunque el krigado es más complejo que los otros dos métodos indicados

anteriormente, se considera que genera una interpolación óptima, siempre y cuando se ejecute de forma correcta y se seleccione el modelo de semivariograma adecuado (Slocum *et al.*, 2005). Otra de las ventajas es que proporciona un error asociado a cada estimación (error estándar de la estimación), lo que permite establecer un intervalo de confianza para cada uno de los valores obtenidos por interpolación.

Un aspecto clave a la hora de realizar interpolaciones por kriging es hacer una modelización correcta del semivariograma. Previo al concepto de semivariograma se debe conocer como está definida la semivarianza (Ec.1).

$$\gamma_h = \frac{\sum_{i=1}^{n-h} [Z_i - Z_{i+h}]^2}{2(n-h)} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde Z_i es el valor que posee la variable en una localización determinada, h es la distancia entre dos localizaciones y n es el número de estaciones de la muestra.

El semivariograma es una expresión gráfica de como varía la semivarianza en cuanto la distancia h aumenta así se espera que los datos geográficos más cercanos sean más parecidos que los datos más alejados. El semivariograma informa de como de parecidos son los valores de cada una de las estaciones meteorológicas y sus circundantes en función de la distancia entre ellas, de su correcta elección depende una interpolación óptima (Slocum *et al.*, 2005). Los modelos de semivariograma más habituales son el modelo lineal, el esférico y el exponencial (Figura 2). En este trabajo se utilizó el esférico.

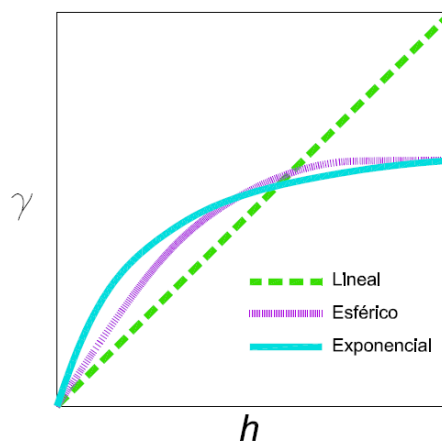


Figura 2. Tipos de semivariograma.

Existen tres formas fundamentales de ejecutar el kriging, que se denominan kriging ordinario, kriging simple y kriging universal. Estos tres modelos calculan el valor de la media de la variable de diferente manera, el kriging simple requiere de una media conocida para crear el modelo, mientras que el kriging ordinario asume una media constante, pero desconocida y estima su valor

constante a partir de los valores vecinos. Los modelos de kriging universal asumen una tendencia general que sigue un modelo polinomial y por ello utilizan funciones de bajo orden polinomial para las estimaciones. Este modelo es apropiado en muestras de datos con fuertes tendencias (Bailey *et al.*, 1995; Cressie, 1993) que son difíciles de interpretar para las variables involucradas por lo que este método se ha descartado. Estos métodos se diferencian en que el krigeado simple supone que la tendencia de los datos es una constante de valor conocido, mientras que el krigeado ordinario asume que la media de los datos se mantiene constante de forma local en la vecindad de cada punto de estimación (i.e. no existe una tendencia o deriva de los datos) (Bohling, 2005).

Para decidir cuál de los métodos de krigeado se iba a testar en este trabajo, se realizó un estudio piloto, en el que se realizaron interpolaciones para la variable temperatura para dos días de la muestra (uno de cada mes) elegidos de forma aleatoria (1 de febrero y 17 de julio de 2009) y se compararon los resultados. Para la comparación de los métodos se emplearon como estadísticos el error medio cuadrático (*Root mean square error*, RMSE), la media estandarizada, el error medio estándar y el RMSE estandarizado. Estos términos se definen con detalle en el apartado 4.3.2. de validación de resultados. Los criterios para seleccionar los mejores métodos fueron: (i) valor de la media estandarizada próximo a cero, (ii) error RMSE más pequeño, (iii) error medio estándar cercano al RMSE y (iv) RMSE estandarizado cercano a la unidad.

Estos estadísticos se obtuvieron a partir de la validación de los datos del ajuste (validación cruzada) y de la validación con datos independientes, para evaluar la bondad del ajuste los datos estimados. La validación cruzada consiste en eliminar un dato para posteriormente ser interpolado utilizando otros puntos de control para estimar el valor en la localización del dato eliminado, luego se calcula el *residuo*, la diferencia entre el dato conocido y el estimado, este proceso se repite para cada uno de los puntos de control individualmente. En la validación *stricto sensu* los puntos de control se dividen en dos grupos, uno para generar el perfil del mapa y otro para evaluarlo, los residuos se calculan para cada uno de los puntos de control utilizados en la fase de evaluación

Las tablas 1 y 2 muestran los resultados del estudio piloto para la variable temperatura los días 1 de febrero y 17 de julio de 2009 respectivamente, para el primer día de febrero se utilizaron 180 puntos de control en la validación cruzada y 60 en la validación, mientras que para el 17 de julio se utilizaron 198 para la validación cruzada y 67 en la validación.

Tabla 1. Errores krigeado temperatura día 1 Febrero 2009 (décimas de ° Celsius).

Errores	Ordinario/Esférico		Simple/Esférico		Universal/Esférico	
	Validación Cruzada	Validación	Validación Cruzada	Validación	Validación Cruzada	Validación
MEDIA	0,05	1,51	-0,64	1,00	0,05	1,51
RMSE	15,90	13,82	16,14	13,64	15,90	13,82
Error medio estándar	18,76	18,80	19,62	19,67	18,76	18,80
Media estandarizada	0,00	0,07	-0,03	0,04	0,00	0,07

Errores	Ordinario/Esférico		Simple/Esférico		Universal/Esférico	
	Validación Cruzada	Validación	Validación Cruzada	Validación	Validación Cruzada	Validación
RMSE estándar	0,85	0,70	0,82	0,66	0,85	0,70

Las tablas 1 y 2 muestran que los resultados de la validación y de la validación cruzada no fueron concluyentes. Por una parte, no existieron diferencias entre aplicar el krigado ordinario y el universal, lo que muestra la inexistencia de una tendencia (*trend*) clara que ayude a modelizar los datos (ESRI, 2001). Los resultados de la comparación entre el krigado ordinario y el krigado simple mostraron una mayor adecuación del KO al considerar los resultados de la validación cruzada y para algunos estadísticos de la validación externa (e.g. RMSE en la Tabla 2). Por ello, para decidir el método general para este estudio se tuvieron en cuenta no sólo estas tablas, si no las referencias bibliográficas, que muestran mejores resultados para el krigado ordinario (Atkinson *et al.*, 1998; Carrera-Hernández y Gaskin, 2007; Ibrahim, 2011; Jarvis y Stuart, 2001; Lloyd, 2005; Mair y Fares, 2011) y el hecho de que el krigado simple requiere que se conozca en cada una de las localizaciones el valor de la constante que emplea el modelo, mientras que en el krigado ordinario este valor se estima (Slocum *et al.*, 2005). De este modo se eligió como método base para las comparaciones el krigado ordinario.

Tabla 2. Errores krigado temperatura día 17 Julio 2009 (décimas de ° Celsius).

Errores	Ordinario/Esférico		Simple/Esférico		Universal/Esférico	
	Validación Cruzada	Validación	Validación Cruzada	Validación	Validación Cruzada	Validación
MEDIA	0,34	-0,63	-0,19	-0,36	0,34	-0,63
RMSE	15,95	21,61	16,51	22,04	15,95	21,61
Error medio estándar	16,83	16,77	21,98	21,98	16,83	16,77
Media estandarizada	-0,01	-0,05	-0,01	-0,02	-0,01	-0,05
RMSE estándar	0,94	1,26	0,75	0,99	0,94	1,26

B) Descripción de los métodos de interpolación elegidos.

A continuación se describen los métodos de interpolación empleados en este trabajo.

B.1. Krigado Ordinario (KO)

El krigado ordinario utiliza un promedio de pesos para calcular el valor de un punto en una malla de puntos (Ecuación 2).

$$\hat{Z} = \sum w_i Z_i \quad \text{Ec. 2}$$

Donde Z es el valor estimado en la maya de puntos, Z_i son los valores de los datos en los puntos de control y w_i son los pesos asociados a cada punto de control. La suma de los pesos es igual a la unidad.

Los pesos se calculan como el inverso de la distancia entre el punto de control y el punto del valor estimado, eligiéndose éstos para minimizar la diferencia entre el valor estimado y el valor verdadero (Ecuación 3).

$$\sum w_i \gamma(h_{ij}) = \gamma(h_{ig}) \quad \text{Ec. 3}$$

Donde $\gamma(h_{ij})$ es la semivarianza asociada a la distancia entre los puntos de control i y j , mientras que $\gamma(h_{ig})$ es la semivarianza asociada a la distancia entre el i -ésimo punto de control y el punto de valor real.

B.2. Co-krigado Ordinario (CK)

El co-krigado es un método de estimación geoestadística multivariada, generalización del krigado, aplicada a más de una variable, estando éstas en posesión de cierto grado de correlación. En este caso además del conocimiento del modelo del semivariograma, es necesario el semivariograma cruzado de las variables (Cuador Gil, 2004) (Ecuación 4):

$$\gamma_{AB}(h) = \frac{1}{2Np(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_A(xi) - Z_A(xi+h)] [Z_B(xi) - Z_B(xi+h)] \quad \text{Ec. 4}$$

Donde Z_A y Z_B son variables correlacionadas, Z_A la variable de interés y Z_B la variable auxiliar (en este caso la elevación).

Para poder aplicar este método se emplearon como variables a predecir las variables meteorológicas de estudio y como variable auxiliar la elevación del terreno, extraída de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la Universidad Autónoma de Barcelona. Dada la escala de trabajo de este estudio, estos datos se remuestraron para obtener un tamaño final de celda de 1000 metros acorde con la extensión y escala de este trabajo. El sistema de referencia

de coordenadas del MDE fue el ED50 UTM huso 30, por lo que se realizó una transformación al sistema de referencia ETRS89 UTM huso 30 empleando el método de rejilla NTV2 para el cambio de datum, tal y como recomienda el Instituto Geográfico Nacional. La transformación se realizó en el entorno del programa ArcGIS 9.3.

4.3.2. Ajuste de los datos según los diferentes métodos de interpolación

Para cada una de las tres variables meteorológicas diarias se ajustaron los modelos de interpolación anteriormente descritos: el krigeado ordinario esférico y el co-krigeado ordinario esférico (empleando como variable auxiliar la elevación). Estos ajustes se realizaron para cada uno de los días de la muestra, obteniéndose por lo tanto 15 modelos (diarios) para cada variable y método para febrero y otros tantos para julio.

El krigeado, al ser un predictor de tipo espacial no requiere que los datos se ajusten a una distribución normal, puesto que se considera como un buen estimador lineal insesgado. Sin embargo, si se cumple la hipótesis de normalidad, el krigeado pasa a ser el mejor predictor insesgado posible (Negreiros *et al.*, 2010), aunque no es condición *sine qua non* para hacer las interpolaciones.

4.3.3. Validación de resultados

Para determinar la idoneidad de cada método para la generación de cartografía continua de cada una de las variables es necesario validar los resultados.

4.3.3.1 Validación cuantitativa no espacial

En primer lugar se determinó la bondad del ajuste mediante una validación cruzada (*cross validation*) (75% de la muestra), por el que se utilizaron todos los datos destinados al ajuste para estimar modelos de tendencias y autocorrelación, eliminando un dato del modelo para predecirlo posteriormente; esta metodología (denominada validación-dejando-uno-fuera) se repite hasta que todos los datos de la muestra del ajuste han pasado por el proceso. Posteriormente se determinó el error para cada uno de los datos de la muestra de ajuste (restando el valor real del valor predicho) y se calcularon los estadísticos.

En segundo lugar se realizó una validación *stricto sensu* independiente con el 25% restante de la muestra de datos. Este tipo de validación usa parte de los datos para generar modelos de tendencias y la autocorrelación para comprobar si las opciones elegidas tales como el modelo de semivariograma o el tamaño de intervalo son los óptimos, y permite estimar la exactitud del modelo de forma independiente al ajuste previo.

Tanto para la validación cruzada (ajuste) como para la validación *stricto sensu*, el estadístico de referencia y de comparación fue el error medio cuadrático (*Root Mean Square Error*, RMSE) para el periodo de 15 días analizado. Este estadístico se ha empleado con el mismo fin en otros trabajos (Atkinson *et al.*, 1998; Carrera-Hernández y Gaskin, 2007; Jarvis y Stuart, 2001; Mair y Fares, 2011).

El error medio cuadrático (RMSE) es la medida de la diferencia entre los valores predichos por el modelo y los valores reales tomados por las estaciones meteorológicas del espacio que se quiere modelar, a estas diferencias también se les conocen como residuos. (Ecuación 5) (Mair y Fares, 2011):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{modelo,i})^2}{n}} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde n es el número de datos, X_{obs} es el valor observado y X_{modelo} es el valor predicho para un día concreto i .

Se han calculado los RMSE del ajuste para todas las estaciones correspondientes (validación cruzada) (RMSE0), mientras que para la validación *stricto sensu* se han calculado los RMSE de las estaciones correspondientes de la comunidad de Castilla y León y adyacentes (RMSE1) y aquellos sólo dentro de los límites comunitarios (RMSE2) La figura 3 muestra un esquema de los análisis de validación.

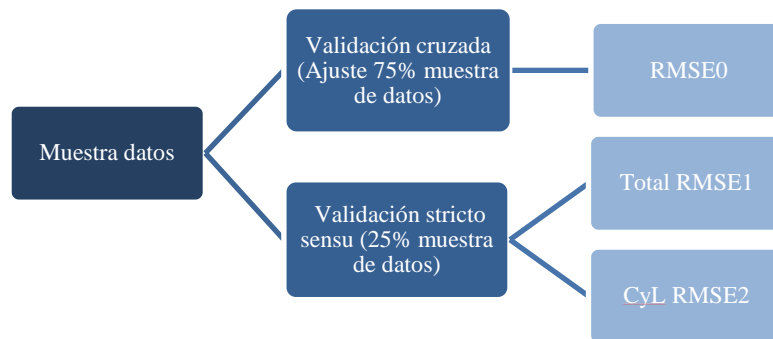


Figura 3. RMSE según procedencia y muestra de datos.

Para determinar si existían diferencias significativas entre los RMSE del KO y del CK se empleó el test de comparación de muestras de Wilcoxon. El test tiene como objetivo determinar si existen diferencias significativas entre los RMSE de dos conjuntos de observaciones. Se trata de un test no paramétrico (no asume ninguna función de distribución de los datos, en este caso los RMSE) para muestras relacionadas. Que las muestras sean relacionadas quiere decir que se comparan los RMSE correspondientes a un mismo día, y no los de días diferentes; este procedimiento es el adecuado para estos datos, puesto que se deben comparar resultados con una base diaria (Alea *et al.*, 2000). Se estableció como hipótesis nula (H_0), que no existían diferencias significativas (a un nivel de probabilidad del 95%, o a un nivel de significación del 5%) entre los RMSE obtenidos mediante KO o CK.

Para interpretar los resultados del test de Wilcoxon se tuvo en cuenta que cuando el *p-valor* (significación asintótica bilateral) obtenido es mayor que la significación (significación del 5% = 0,05), se debe aceptar la hipótesis nula (H_0), de modo que no hay diferencias significativas entre los conjuntos de datos (RMSE) comparados (Norusis, 2012). En el caso de detectar diferencias significativas con el método de Wilcoxon, el criterio para decidir qué método de krigeado resultó más adecuado fue la mediana de los RMSE en comparación. El test de comparación de Wilcoxon se realizó empleando el programa informático IBM SPSS Statistics 19 ©.

4.3.3.2 Validación cuantitativa espacial

Carrera-Hernández y Gaskin (2007) indicaron en su trabajo que no es suficiente conocer el RMSE para determinar qué método es más adecuado para realizar la interpolación de variables meteorológicas, si no que se debe tener en cuenta la distribución espacial de esos errores. Con el fin de conocer la distribución espacial de los errores en la estimación de cada una de las variables dentro de Castilla y León, se crearon mapas representando el *error* para cada una de las estaciones empleadas en la validación *stricto sensu* en la comunidad autónoma.

5. RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para cada una de las variables de estudio. En primer lugar, los análisis de exactitud muestran los RMSE que se obtuvieron en cada uno de los métodos de interpolación por variables, para las muestras de ajuste (RMSE0), validación *stricto sensu* en Castilla y León (RMSE1) y validación *stricto sensu* en el conjunto de datos (RMSE2) para cada uno de los días de las muestras de febrero y julio de 2009, además se especifica el número de puntos de control utilizados en cada uno de las muestras (n) y el valor de la mediana, como estadístico descriptivo de tendencia central no paramétrico. Posteriormente se incluyen los resultados del test de comparación de Wilcoxon para determinar la existencia o no de diferencias significativas entre los diferentes métodos de krigado en cuanto a su exactitud para predecir la variable en cuestión. Cuando la significación asintótica (bilateral) mostrada en la tabla fue mayor que el nivel de significación del 5% ($p > 0.05$), se rechazó la hipótesis nula de que no existen diferencias significativas entre los datos comparados. Se han destacado con sombreado las hipótesis rechazadas.

Por último se muestran las diferencias entre métodos de interpolación, para interpretar de forma visual los resultados del trabajo. Éstas se calcularon restando los valores predichos por el co-krigeado ordinario de los predichos por el krigado ordinario (i.e. Diferencia = krigado ordinario - cokrigado ordinario) y los gráficos con la distribución espacial de las magnitudes de los RMSE de validación *stricto sensu* dentro de Castilla y León, generados por el krigado y el co-krigeado ordinarios en unos días determinados de los meses de febrero y julio para cada una de las variables. Los criterios para la elección de los días representados se explicaron en el apartado de métodos de este proyecto.

5.1. Temperatura.

5.1.1. Análisis de exactitud.

Tabla 3. RMSE Temperatura Febrero (décimas de ° Celsius).

DIA	KRIGEADO ORDINARIO						CO-KRIGEADO ORDINARIO					
	TEMPERATURA (Décimas °C)						TEMPERATURA (Décimas °C)					
	Validación Cruzada		Validación				Validación Cruzada		Validación			
	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n
01/02/2009	15,90	180	13,82	60	11,68	30	18,51	180	16,75	60	15,23	30
02/02/2009	16,92	177	14,62	59	17,88	28	17,80	177	15,41	59	18,41	28
03/02/2009	13,33	176	12,37	58	13,20	30	16,38	176	15,23	58	15,61	30
04/02/2009	17,75	175	12,58	58	14,41	30	19,57	175	13,63	58	15,17	30

DIA	KRIGEADO ORDINARIO						CO-KRIGEADO ORDINARIO					
	TEMPERATURA (Décimas °C)						TEMPERATURA (Décimas °C)					
	Validación Cruzada		Validación				Validación Cruzada		Validación			
	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n
05/02/2009	16,69	176	15,87	58	19,59	31	17,86	176	17,22	58	21,37	31
06/02/2009	16,63	176	15,37	58	16,72	23	17,89	176	16,56	58	17,44	23
07/02/2009	16,25	177	16,97	59	20,43	26	19,63	177	19,47	59	21,50	26
08/02/2009	14,65	176	17,82	59	21,40	20	16,91	176	22,05	59	21,70	20
09/02/2009	18,98	175	18,83	58	21,19	21	19,51	175	19,16	58	21,27	21
10/02/2009	19,40	174	11,52	58	7,50	26	21,02	174	14,35	58	9,08	26
11/02/2009	15,04	176	19,57	58	24,41	24	15,48	176	20,46	58	25,24	24
12/02/2009	13,83	177	16,94	59	18,74	30	14,19	177	17,11	59	18,37	30
13/02/2009	15,58	178	12,33	59	14,81	30	17,04	178	13,06	59	14,23	30
14/02/2009	14,18	177	12,36	59	11,67	25	14,19	177	13,03	59	12,51	25
15/02/2009	12,64	178	15,99	59	16,39	32	12,99	178	15,94	59	15,68	32
MEDIANA	15,90		15,37		16,72		17,80		16,56		17,44	

Tabla 4. RMSE Temperatura Julio (décimas de ° Celsius).

DIA	KRIGEADO ORDINARIO						CO-KRIGEADO ORDINARIO					
	TEMPERATURA (Décimas °C)						TEMPERATURA (Décimas °C)					
	Validación Cruzada		Validación				Validación Cruzada		Validación			
	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n
17/07/2009	15,95	198	21,61	67	23,99	34	15,99	198	21,63	67	24,00	34
18/07/2009	14,21	198	14,28	66	11,89	30	14,31	198	14,52	66	12,08	30
19/07/2009	13,64	198	17,9	66	19,95	30	13,60	198	17,96	66	20,01	30
20/07/2009	14,88	199	13,66	67	14,92	32	14,91	199	13,71	67	15,10	32
21/07/2009	18,34	201	18,38	67	19,96	32	18,35	201	18,39	67	19,98	32
22/07/2009	13,90	198	16,52	67	18,90	31	13,90	198	16,52	67	18,90	31
23/07/2009	16,00	202	13,21	68	8,95	31	16,01	202	13,21	68	8,96	31
24/07/2009	15,83	204	14,52	68	14,60	29	15,84	204	14,53	68	14,59	29
25/07/2009	14,37	202	13,63	68	11,92	34	14,37	202	13,65	68	11,92	34
26/07/2009	14,15	202	13,31	68	13,51	40	14,15	202	13,31	68	13,51	40
27/07/2009	16,37	202	13,55	68	12,29	27	16,35	202	13,55	68	12,31	27
28/07/2009	13,14	202	17,21	68	15,87	32	13,14	202	17,21	68	15,87	32
29/07/2009	16,84	203	13,38	68	16,52	35	16,84	203	13,37	68	16,51	35
30/07/2009	15,29	202	15	68	12,50	38	15,30	202	15,01	68	12,50	38
31/07/2009	15,95	203	11,58	68	9,35	34	15,95	203	11,58	68	9,35	34
MEDIANA	15,29		14,28		14,60		15,30		14,52		14,59	

5.1.2. Comparación estadística de métodos de interpolación.

Tabla 5. Test Wilcoxon para el RMSE de la interpolación de la Temperatura media diaria de Febrero (décimas de ° Celsius).

	Hipótesis 1	Hipótesis 2	Hipótesis 3	Hipótesis 4	Hipótesis 5	Hipótesis 6
Variables	TKRMSE2F vs. TKRMSE1F	TKKRMSE2F vs. TKKRMSE1F	TKKRMSE1F vs. TKRMSE1F	TKKRMSE2F vs. TKRMSE2F	TKRMSE1F vs. TKRMSE0F	TKKRMSE1F vs. TKKRMSE0F
Z	-2,101	-1,704	-3,351	-2,613	-0,795	-0,909
Significación asintótica (bilateral)	0,036	0,088	0,001	0,009	0,427	0,363

Tabla.6. Test Wilcoxon para el RMSE de la interpolación de la Temperatura media diaria de Julio (décimas de ° Celsius).

	Hipótesis 1	Hipótesis 2	Hipótesis 3	Hipótesis 4	Hipótesis 5	Hipótesis 6
Variables	TKRMSE2J vs. TKRMSE1J	TKKRMSE2J vs. TKKRMSE1J	TKKRMSE1J vs. TKRMSE1J	TKKRMSE2J vs. TKRMSE2J	TKRMSE1J vs. TKRMSE0J	TKKRMSE1J vs. TKKRMSE0J
Z	-0,284	-0,170	-2,393	-1,647	-0,511	-0,511
Significación asintótica (bilateral)	0,776	0,865	0,017	0,100	0,609	0,609

Los resultados del test de Wilcoxon para febrero mostraron diferencias significativas en la exactitud del krigeado ordinario según se consideren todas las estaciones o sólo las estaciones dentro de Castilla y León, siendo el RMSE menor para el total de las estaciones (Tabla 5). Se identificaron también diferencias significativas en la comparativa de métodos de interpolación tanto para el conjunto de las estaciones como dentro de Castilla y León, siendo el RMSE menor si se utiliza el krigeado ordinario (Tabla 3). Para las demás comparaciones no se encontraron diferencias significativas.

En el mes de julio sólo se encontraron diferencias significativas en el RMSE para el caso de comparación entre krigeado ordinario y co-krigeado ordinario para la totalidad de la muestra de estaciones de validación *stricto sensu* (Tabla 6), obteniéndose un RMSE menor en el krigeado (Tabla 4).

5.1.3. Representación espacial de las diferencias entre métodos de interpolación.

La figura 4 muestra que en general (para el día 1 de febrero) los valores de temperatura predichos por el método del KO fueron menores que los predichos por el CK (celdas representadas en rojo en la figura 4). Las zonas con diferencias mayores ($KO < CK$) se corresponden con algunas de las zonas con el relieve más montañoso. Estos resultados corroboraron lo esperado, puesto que la diferencia entre el CK y el KO es precisamente la consideración del modelo digital del terreno (elevaciones) en la interpolación, por lo tanto, en aquellas zonas con variaciones en la elevación es más probable que haya diferencias entre las interpolaciones de KO y el CK. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por otros autores como Martínez-Cob y Cuenca (1992) y Carrera-Hernández y Gaskin (2007).

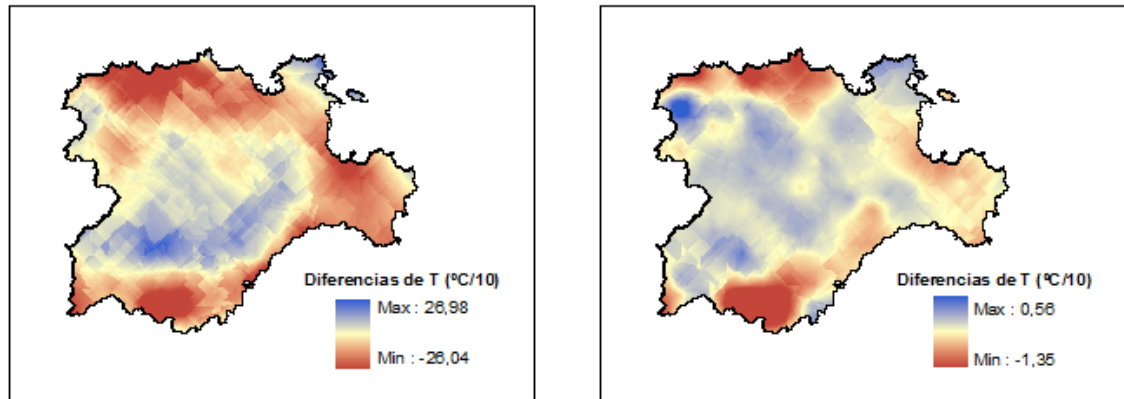


Figura 4. Diferencia de temperatura media diaria entre KO y CK para el día 1 de Febrero de 2009 (izquierda) y para el 17 de Julio de 2009 (derecha).

La zonas con mayores diferencias entre krigeado ordinario y co-krigeado en la Figura 6, se corresponden con algunas de las zonas con relieve más montañoso de la comunidad. Esto nos demuestra como la utilización de la variable externa elevación influye en el modelo final y las zonas donde se observaron mayores magnitudes de error coinciden con zonas en las que la orografía obedece a extremos. La figura muestra que las diferencias entre el KO y CK fueron menores para este día que para el 1 de febrero (Figura 4) y que de forma global los valores de temperatura predichos por el método del KO para el 17 de julio fueron mayores que los predichos por el CK, si bien la magnitud de las diferencias fue pequeña (<1,5 décimas de °C).

5.1.4. Representación espacial de los errores de interpolación.

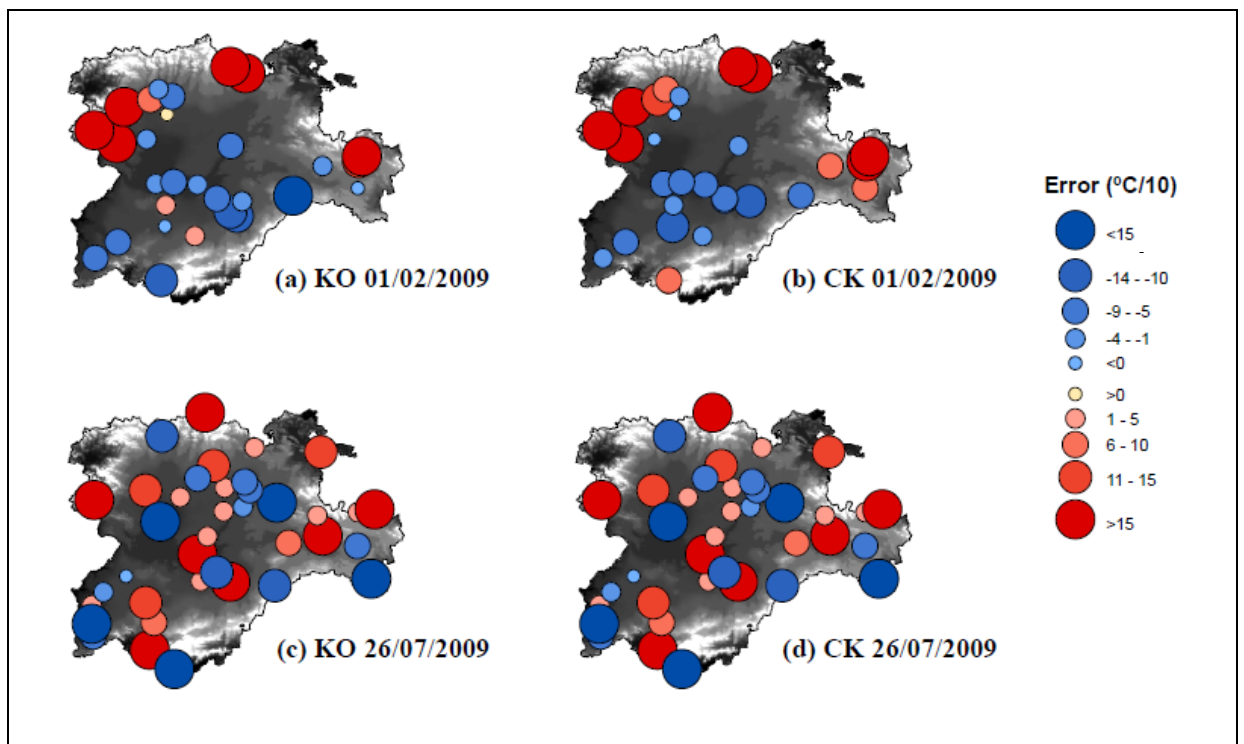


Figura 5. Representación espacial de los errores de interpolación dentro de Castilla y León, para la muestra de febrero mediante KO (a), CK (b), y para julio mediante KO (c) y CK (d). De fondo se muestra el Modelo Digital del Terreno (zonas más elevadas representadas en tonos más claros).

Al comparar el comportamiento de cada método en los dos periodos de estudio, la Figura 5 muestra que en febrero el KO (Figura 5.a) presenta unos errores extremos (por sobrestimación en la mayoría de los casos) en las zonas de montaña, mientras que en julio (Figura 5.c) la magnitud de los errores no aparece tan ligada a la distribución de la elevación. Para el CK se obtuvieron resultados análogos. En el caso de los días analizados se puede deducir que el krigeado fue más exacto el 1 de febrero que el 26 de julio, y el co-krigeado fue más preciso el 26 de julio que el 1 de febrero, tal y como se demostró según los RMSE2 en la tablas 3 y 4. Este resultado indica que no es posible elegir un método de interpolación empleando como referencia únicamente los errores obtenidos para un día. Se debe tener en cuenta la diferencia clara de temperaturas entre los dos meses, esto influye directamente en la determinación de los errores y explica porque las magnitudes de los errores en julio fueron mayores que en febrero.

5.2. Precipitación.

5.2.1. Análisis de exactitud.

Tabla 7. RMSE Precipitación Febrero (mm).

DIA	KRIGEADO ORDINARIO						CO-KRIGEADO ORDINARIO					
	PRECIPITACION (mm)						PRECIPITACION (mm)					
	Validación Cruzada		Validación				Validación Cruzada		Validación			
	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n
01/02/2009	94,77	431	67,78	144	66,95	61	94,77	431	67,77	144	66,95	61
02/02/2009	40,41	429	36,97	144	30,24	71	41,62	429	37,92	144	30,19	71
03/02/2009	55,40	426	37,41	142	44,76	57	55,40	426	37,42	142	44,77	57
04/02/2009	74,02	429	48,47	144	49,23	65	74,10	429	48,54	144	49,25	65
05/02/2009	42,68	429	37,37	144	41,22	73	42,69	429	37,37	144	41,22	73
06/02/2009	34,38	430	39,31	144	38,44	64	37,74	430	39,63	144	38,32	64
07/02/2009	29,04	434	32,15	145	29,58	74	29,06	434	32,01	145	29,18	74
08/02/2009	50,77	432	22,32	145	17,00	78	51,49	432	23,77	145	19,72	78
09/02/2009	40,53	429	33,13	144	38,86	74	40,53	429	33,13	144	38,87	74
10/02/2009	19,73	430	16,7	144	12,27	66	19,74	430	16,71	144	12,27	66
11/02/2009	17,84	431	14,86	144	19,68	61	17,84	431	14,87	144	19,71	61
12/02/2009	26,56	431	25,77	144	9,11	70	26,78	431	26,07	144	9,37	70
13/02/2009	6,99	435	3,605	145	5,02	61	6,68	435	1,622	145	1,81	61
14/02/2009	14,73	431	1,79	144	2,91	53	13,29	431	3,516	144	5,74	53
15/02/2009	15,28	434	10,74	145	2,43	59	13,67	434	10,97	145	3,87	59
MEDIANA	34,38		32,15		29,58		37,74		32,01		29,18	

Tabla 8. RMSE Precipitación Julio (mm).

DIA	KRIGEADO ORDINARIO						CO-KRIGEADO ORDINARIO					
	PRECIPITACION (mm)						PRECIPITACION (mm)					
	Validación Cruzada		Validación				Validación Cruzada		Validación			
	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n
17/07/2009	6,19	459	3,42	153	2,32	68	6,13	459	3,29	153	2,20	68
18/07/2009	7,85	457	1,66	153	2,04	62	7,87	457	1,87	153	2,33	62
19/07/2009	0,44	458	0,55	153	0,16	66	0,43	458	0,53	153	0,15	66
20/07/2009	13,23	458	13,94	153	6,16	61	13,39	458	13,85	153	5,25	61
21/07/2009	4,49	456	8,12	153	9,77	77	4,49	456	8,12	153	9,77	77
22/07/2009	85,55	454	65,32	152	50,53	67	85,57	454	65,33	152	50,57	67
23/07/2009	25,79	456	43,42	153	55,71	73	25,79	456	43,42	153	55,71	73
24/07/2009	9,11	459	3,07	154	1,77	76	9,11	459	3,07	154	1,77	76
25/07/2009	1,65	460	0,70	154	0,29	67	1,60	460	0,30	154	0,37	67
26/07/2009	0,58	459	0,55	154	0,18	80	0,58	459	0,55	154	0,18	80
27/07/2009	4,22	460	2,56	154	0,24	77	4,22	460	2,56	154	0,24	77
28/07/2009	5,28	460	1,69	154	2,34	79	5,08	460	1,25	154	1,71	79
29/07/2009	1,54	459	1,54	154	0,36	68	1,52	459	1,54	154	0,36	68
30/07/2009	1,37	459	18,23	154	26,45	73	1,37	459	18,23	154	26,45	73
31/07/2009	6,63	458	8,16	153	11,33	78	6,63	458	8,17	153	11,33	78
MEDIANA	5,28		3,07		2,32		5,08		3,07		2,20	

5.2.2. Comparación estadística de métodos de interpolación.

Tabla 9 Test Wilcoxon para el RMSE de la interpolación de la Precipitación media diaria de Febrero (mm).

	Hipótesis 1	Hipótesis 2	Hipótesis 3	Hipótesis 4	Hipótesis 5	Hipótesis 6
Variables	PKRMSE2F vs. PKRMSE1F	PKKRMSE2F vs. PKKRMSE1F	PKKRMSE1F vs. PKRMSE1F	PKKRMSE2F vs. PKRMSE2F	PKRMSE1F vs. PKRMSE0F	PKKRMSE1F vs. PKKRMSE0F
Z	-0,568	-0,625	-1,682	-0,625	-2,726	-3,067
Significación asintótica (bilateral)	0,570	0,532	0,092	0,532	0,006	0,002

Tabla 10. Test Wilcoxon para el RMSE de la interpolación de la Precipitación media diaria de Julio (mm).

	Hipótesis 1	Hipótesis 2	Hipótesis 3	Hipótesis 4	Hipótesis 5	Hipótesis 6
Variables	PKRMSE2J vs. PKRMSE1J	PKKRMSE2J vs. PKKRMSE1J	PKKRMSE1J vs. PKRMSE1J	PKKRMSE2J vs. PKRMSE2J	PKRMSE1J vs. PKRMSE0J	PKKRMSE1J vs. PKKRMSE0J
Z	-0,341	-0,227	-1,020	-0,057	-0,511	-0,568
Significación asintótica (bilateral)	0,733	0,820	0,308	0,955	0,609	0,570

Se debe destacar que no existen diferencias significativas entre la exactitud del KO y la exactitud del CK, ni en febrero ni en julio, independientemente de la medida de exactitud que se emplee para compararlos (Tablas 9 y 10) (hipótesis 3 e hipótesis 4). En el trabajo de Carrera-Hernández y Gaskin (2007) el mejor método para estimar la precipitación diaria fue el krigeado con deriva externa utilizando la elevación, siendo más exacto que otros tipos de krigeado como el KO, mientras que en este proyecto el empleo de la elevación no mejoró la exactitud, si bien no se empleó el krigeado con deriva externa. Los resultados del proyecto están de acuerdo con los obtenidos por Mair y Fares (2011), Por otra parte, Hay *et al.* (1998) concluyeron que la elevación influye en menor medida que otras variables relacionadas con la topografía como la pendiente.

5.2.3. Representación espacial de las diferencias entre métodos de interpolación.

La figura 6 muestra que en general (para el día 1 de febrero) los valores de precipitación predichos por el método del KO fueron mayores que los predichos por el CK (celdas representadas en beige en la figura 6). No se aprecia que en las zonas de montaña haya más diferencias entre los métodos.

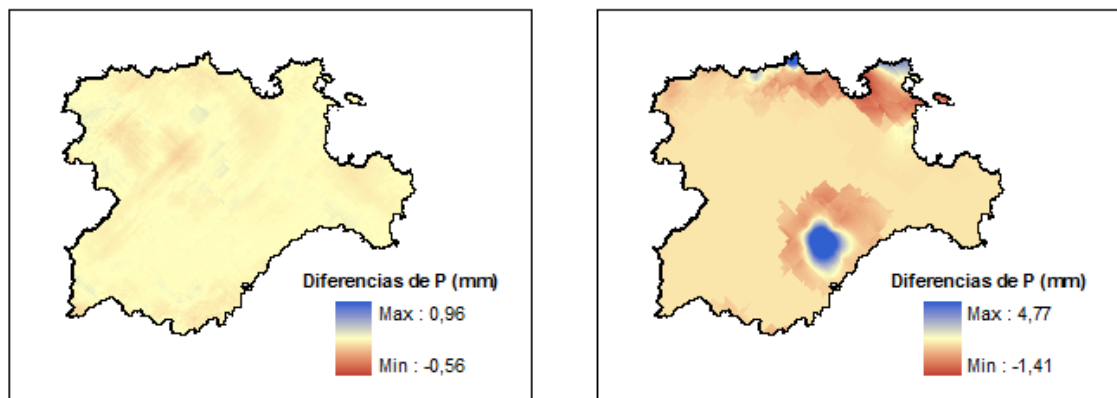


Figura 6. Diferencia de precipitación diaria entre KO y CK para el día 1 de Febrero de 2009 (izquierda) y para el 17 de Julio de 2009 (derecha).

La figura 6 muestra que las diferencias entre el KO y CK fueron mayores para el 17 de julio que para el 1 de febrero y que de forma global los valores de precipitación predichos por el método del KO para el 17 de julio fueron mayores que los predichos por el CK (zonas en beige y en azul). Las zonas de mayores diferencias entre ambos métodos se localizaron en dos áreas diferenciadas. Una de esas zonas está en el NE de León, norte de Palencia (zonas montañosas) y el norte de Burgos (zona con una orografía heterogénea), caracterizada por terrenos montañosos o heterogéneos desde el punto de vista fisiográfico, y donde el empleo de la elevación en el CK puede haber influido en las diferencias con el KO. La otra zona con mayores diferencias entre KO y CK se localizó en la provincia de Segovia (SE de Castilla y León), en una zona no especialmente montañosa, pero que se podría definir como una zona de transición de la planicie a las montañas

5.2.4. Representación espacial de los errores de interpolación.

Cabe destacar que la amplitud del rango de error fue menor en julio que en febrero y también fueron menores los errores de julio que los de febrero. Visualmente se deduce que tanto el kriging ordinario como el co-kriging ordinario fueron más precisos en julio que en febrero en términos absolutos (Figuras 7 y 8). Se debe tener en cuenta que la cantidad de precipitación en julio es mucho menor que en febrero, y que por ello las estimaciones de precipitación son menores y también los errores de las interpolaciones. Estos resultados no se deben extrapolar a otras fechas y deben analizarse en detalle según las fechas y zonas de aplicación. Este proyecto, ninguno de los trabajos encontró diferencias en la exactitud a la hora de estimar la precipitación según se incluyese la elevación o no, a excepción del trabajo de Carrera-Hernández y Gaskin (2007), que mostró que la exactitud mejora al considerar la elevación.

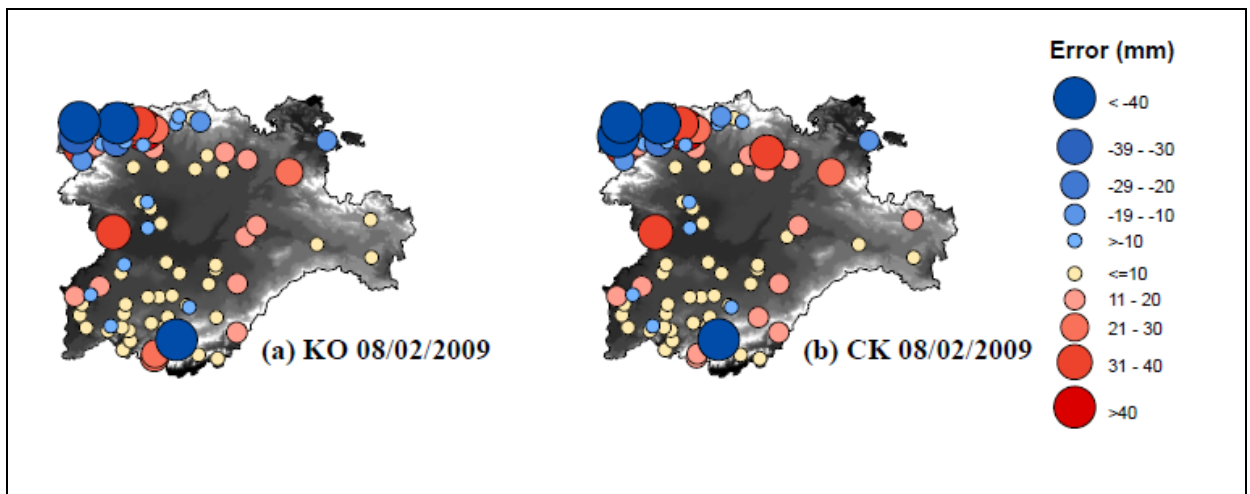


Figura 7. Representación espacial de los errores de interpolación dentro de Castilla y León (8 de febrero de 2009) mediante KO (a) y CK (b). De fondo se muestra el Modelo Digital del Terreno (zonas más elevadas representadas en tonos más claros)

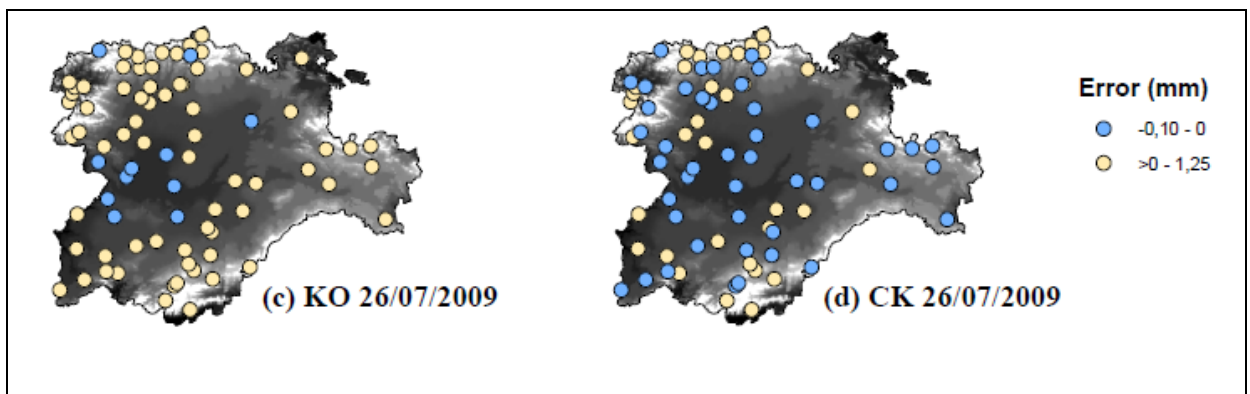


Figura 8. Representación espacial de los errores de interpolación dentro de Castilla y León (26 de julio de 2009) mediante KO (c) y CK (d). De fondo se muestra el Modelo Digital del Terreno (zonas más elevadas representadas en tonos más claros).

5.3. Humedad relativa.

5.3.1. Análisis de exactitud.

Tabla 11. RMSE Humedad Febrero (%).

DIA	KRIGEADO ORDINARIO						CO-KRIGEADO ORDINARIO					
	HUMEDAD (%)						HUMEDAD (%)					
	Validación Cruzada		Validación				Validación Cruzada		Validación			
	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n
01/02/2009	9,91	173	6,77	58	7,05	25	9,87	173	6,91	58	7,20	25
02/02/2009	4,62	169	4,09	57	4,51	23	4,96	169	4,45	57	5,15	23
03/02/2009	4,47	169	4,77	57	4,79	24	4,48	169	4,77	57	4,79	24
04/02/2009	5,85	168	5,63	57	6,35	29	5,85	168	5,64	57	6,36	29
05/02/2009	6,51	169	4,97	57	5,09	27	6,59	169	5,07	57	5,11	27
06/02/2009	5,34	169	5,01	57	5,11	20	6,21	169	6,05	57	6,28	20
07/02/2009	6,82	171	7,18	57	6,77	29	6,83	171	7,19	57	6,77	29
08/02/2009	6,19	170	4,64	57	4,27	29	6,20	170	4,65	57	4,28	29
09/02/2009	5,67	168	6,69	57	5,90	27	5,67	168	6,69	57	5,89	27
10/02/2009	6,03	168	4,91	56	4,76	27	6,04	168	4,92	56	4,76	27
11/02/2009	5,98	170	7,68	57	8,16	26	5,99	170	7,71	57	8,18	26
12/02/2009	5,48	171	4,84	57	4,33	32	5,48	171	4,85	57	4,34	32
13/02/2009	7,04	172	5,68	58	4,19	26	7,04	172	5,68	58	4,19	26
14/02/2009	7,92	171	8,71	58	9,32	27	7,92	171	8,72	58	9,34	27
15/02/2009	8,56	173	8,06	58	8,45	28	9,44	173	8,59	58	8,80	28
MEDIANA	6,03		5,63		5,11		6,20		5,68		5,89	

Tabla 12. RMSE Humedad Julio (%).

DIA	KRIGEADO ORDINARIO						CO-KRIGEADO ORDINARIO					
	HUMEDAD (%)						HUMEDAD (%)					
	Validación Cruzada		Validación				Validación Cruzada		Validación			
	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n
17/07/2009	5,93	195	4,79	66	5,23	37	5,93	195	4,77	66	5,17	37
18/07/2009	5,18	195	5,53	65	5,58	28	5,18	195	5,53	65	5,58	28
19/07/2009	5,67	195	6,42	65	4,54	31	5,67	195	6,42	65	4,54	31
20/07/2009	6,58	196	5,97	66	6,91	29	6,54	196	5,94	66	6,90	29
21/07/2009	6,74	198	7,81	66	8,20	30	6,74	198	7,75	66	8,18	30
22/07/2009	4,84	195	5,91	66	5,81	31	4,84	195	5,91	66	5,81	31
23/07/2009	5,32	199	5,40	67	4,65	30	5,32	199	5,40	67	4,65	30
24/07/2009	5,21	201	4,54	67	4,57	33	5,21	201	4,54	67	4,57	33
25/07/2009	5,38	199	5,77	67	4,95	33	5,38	199	5,77	67	4,95	33
26/07/2009	6,28	199	5,38	67	4,55	38	6,28	199	5,38	67	4,55	38

DIA	KRIGEADO ORDINARIO						CO-KRIGEADO ORDINARIO					
	HUMEDAD (%)						HUMEDAD (%)					
	Validación Cruzada		Validación				Validación Cruzada		Validación			
	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n	RMSE0	n	RMSE1	n	RMSE2	n
27/07/2009	6,33	199	5,46	67	5,48	37	6,33	199	5,46	67	5,48	37
28/07/2009	6,04	199	6,24	67	6,62	34	6,04	199	6,24	67	6,62	34
29/07/2009	6,61	200	6,74	67	7,98	34	6,61	200	6,74	67	7,98	34
30/07/2009	5,99	199	5,55	67	6,01	33	5,99	199	5,55	67	6,01	33
31/07/2009	6,09	200	5,56	67	4,40	31	6,09	200	5,56	67	4,40	31
MEDIANA	5,99		5,56		5,48		5,99		5,56		5,48	

5.3.2. Comparación estadística de métodos de interpolación.

Tabla 13. Test Wilcoxon para el RMSE de la interpolación de la Humedad relativa media diaria de Febrero (%).

	Hipótesis 1	Hipótesis 2	Hipótesis 3	Hipótesis 4	Hipótesis 5	Hipótesis 6
Variables	HKRMSE2F vs. HKRMSE1F	HKKRMSE2F vs. HKRMSE1F	HKKRMSE1F vs. HKRMSE1F	HKKRMSE2F vs. HKRMSE2F	HKRMSE1F vs. HKRMSEF	HKKRMSE1F vs. HKRMSEF
Z	-0,114	-0,170	-3,202	-3,067	-1,306	-1,306
Significación asintótica (bilateral)	0,910	0,865	0,001	0,002	0,191	0,191

Tabla 14 .Test Wilcoxon para el RMSE de la interpolación de la Humedad relativa media diaria de Julio (%).

	Hipótesis 1	Hipótesis 2	Hipótesis 3	Hipótesis 4	Hipótesis 5	Hipótesis 6
Variables	HKRMSE2J vs. HKRMSE1J	HKKRMSE2J vs. HKRMSE1J	HKKRMSE1J vs. HKRMSE1J	HKKRMSE2J vs. HKRMSE2J	HKRMSE1J vs. HKRMSEJ	HKKRMSE1J vs. HKRMSEJ
Z	-0,114	-0,114	-1,378	-2,272	-0,454	-0,454
Significación asintótica (bilateral)	0,910	0,910	0,168	0,023	0,650	0,650

Se debe destacar que los resultados del test de Wilcoxon para febrero mostraron, diferencias significativas en la comparación entre krigeado ordinario y co-krigeado ordinario según se consideren todas las estaciones o sólo las estaciones dentro de Castilla y León (Tabla 13), siendo los RMSE1 y RMSE 2 menores para el krigeado ordinario (Tabla 11). Para las demás comparaciones no se encontraron diferencias significativas.

En el mes de julio sólo se encontraron diferencias significativas en el RMSE para el caso de comparación entre krigeado ordinario y co-krigeado ordinario de la muestra de estaciones de validación *stricto sensu* dentro de Castilla y León (Tabla 14), obteniéndose un RMSE igual para ambos métodos de interpolación (Tabla 12), por lo que no se pudo determinar qué método resultó más exacto. Para las demás comparaciones no se encontraron diferencias significativas.

En este estudio de Martínez-Cob y Cuenca (1992), el krigado y el co-krigeado obtuvieron resultados similares en zonas con baja elevación. Sin embargo en áreas de gran elevación el co-krigeado fue más preciso que el krigado, por lo que sí que se determinaron diferencias significativas entre el KO y el CK, al igual que los resultados obtenidos en este trabajo.

5.3.3. Representación espacial de las diferencias entre métodos de interpolación.

La figura 9 muestra que en general (para el día 1 de febrero) los valores de humedad relativa predichos por el método del KO fueron mayores que los predichos por el CK (celdas representadas en beige y azul en la figura 9). Estos valores extremos no coinciden exactamente con grandes formaciones orográficas, a excepción de aquellos localizados en el Norte de la comunidad, pero sí coinciden con zonas de transición entre meseta y cordillera, o zonas en depresión dentro de formaciones rocosas, como es el caso de la comarca de El Bierzo (León).

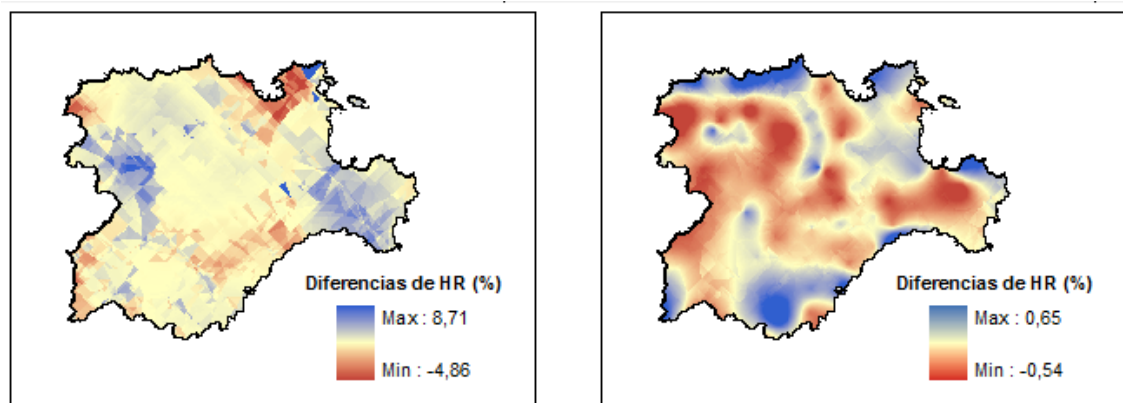


Figura 9. Diferencia de humedad relativa diaria entre KO y CK para el día 1 de Febrero de 2009 (izquierda) y para el 17 de Julio de 2009 (derecha).

El rango de valores de humedad relativa para el 17 de julio (Figura 9) es menor que para el 1 de febrero, por lo tanto las diferencias entre KO y CK fueron menores para este día que para el 1 de febrero. Esto es debido a que en el mes de febrero el porcentaje de humedad relativa es mayor que en el mes de julio. Las zonas de mayores diferencias entre ambos métodos (estimaciones del KO mayores que las del CK, en azul), se corresponden con zonas en las que están presentes formaciones montañosas; sin embargo las áreas en las que el CK predice valores mayores que el KO se concentran en zonas como la comarca del Bierzo en León, provincia de Soria, Salamanca y centro de la comunidad, zonas con poco relieve o incluso zonas de depresión entre montañas como lo es la comarca de El Bierzo. Las grandes diferencias entre métodos ocurrieron en zonas donde la elevación tiene valores opuestos. Lo mismo ocurrió en el trabajo Martínez-Cob y Cuenca (1992), según este trabajo las diferencias entre KO y KO fueron similares en zonas con baja elevación, mientras que en zonas de montaña, las diferencias entre métodos fueron más acusadas, como mostró este trabajo (Figura 9).

5.3.4. Representación espacial de los errores de interpolación.

La magnitud de los errores fue mayor en julio que en febrero. Según los RMSE2 el krigado ordinario fue más preciso en febrero que en julio, y el co-krigeado fue más preciso en julio que en febrero. Se debe tener en cuenta que el porcentaje de humedad relativa no es el mismo en julio que en

febrero, de este modo se obtendrán mayores valores de RMSE, en el período en el que la humedad relativa es mayor, en este caso febrero. Comparando las magnitudes de los errores (Figura 10) se vio que tanto el KO como el CK fueron más precisos en el mes de febrero que el de julio, aunque el método que mejor generó el modelo de todos fue el KO del mes de febrero, por lo que la elevación no resultó determinante para mejorar la exactitud en las predicciones de la humedad relativa. En oposición a estos resultados están los obtenidos por Martínez-Cob y Cuenca (1992), que obtuvieron una mayor exactitud empleando co-krigeado ordinario que con krigeado ordinario. Estos resultados no se deben extrapolar a otras fechas y deben analizarse en detalle según las fechas y zonas de aplicación.

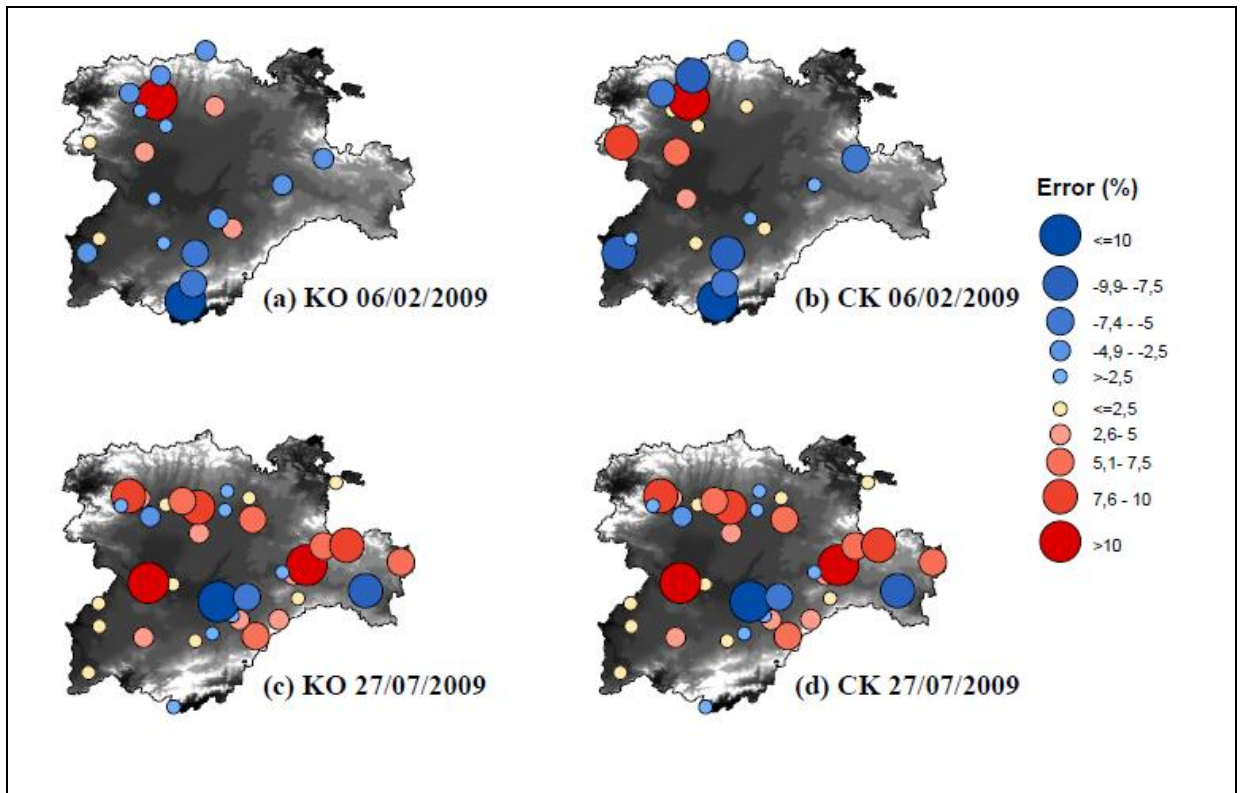


Figura 10. Representación espacial de los errores de interpolación dentro de Castilla y León, para la muestra de febrero mediante KO (a), CK (b), y para julio mediante KO (c) y CK (d). De fondo se muestra el Modelo Digital del Terreno (zonas más elevadas representadas en tonos más claros).

6. CARTOGRAFÍA FINAL

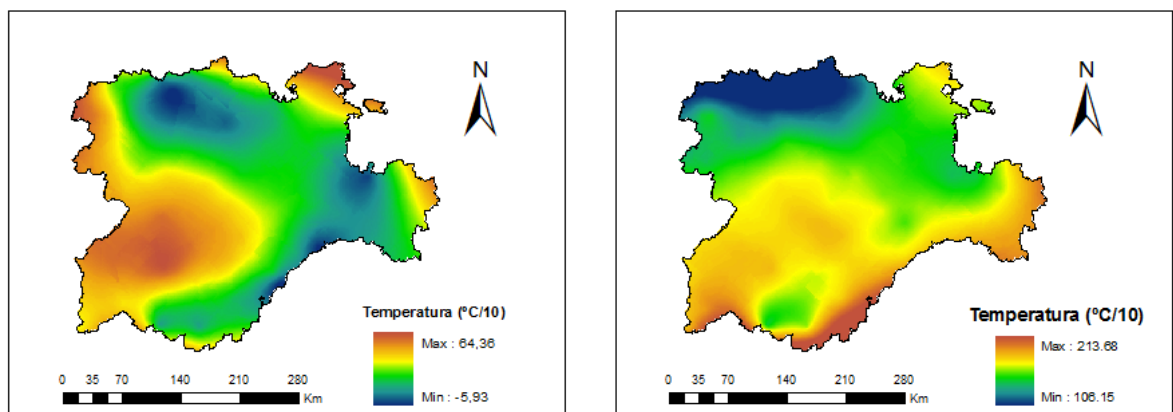


Figura 11. Representación de las temperaturas medias predichas dentro de Castilla y León para el 1 de Febrero (Izquierda) y el 17 de Febrero (Derecha) de 2009 mediante krigeado ordinario.

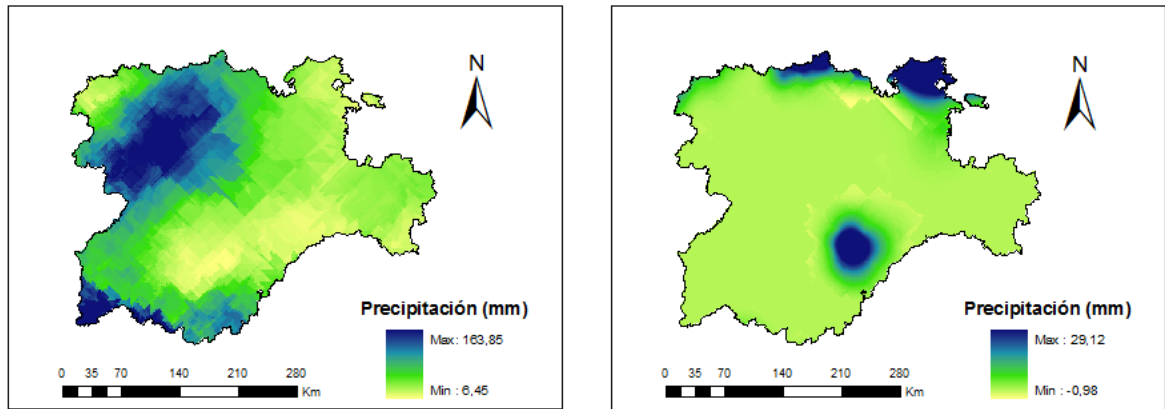


Figura 11. Representación de las precipitaciones predichas dentro de Castilla y León para el 1 de Febrero (Izquierda) y el 17 de Febrero (Derecha) de 2009 mediante krigado ordinario.

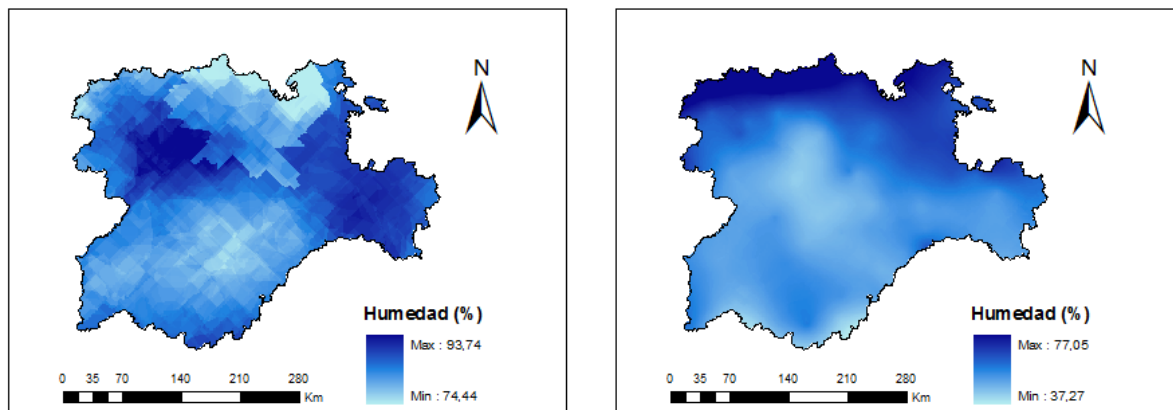


Figura 11. Representación de la humedad relativa predicha dentro de Castilla y León para el 1 de Febrero (Izquierda) y el 17 de Febrero (Derecha) de 2009 mediante krigado ordinario.

7. CONCLUSIONES

En este apartado se explican las conclusiones obtenidas en este trabajo y las líneas de futuro.

1. *Método más adecuado para obtener cartografía espacialmente continua de la variable temperatura media.*

Para la interpolación de la temperatura media se obtuvieron diferencias significativas al 95% de probabilidad entre la exactitud del krigado ordinario (KO) y el co-krigado (CK). El método más exacto para los dos periodos de estudio (febrero y julio de 2009) fue el krigado ordinario, ya que en febrero las medianas de los RMSE obtenidos por el KO fueron menores que los del CK, y aunque en julio las medianas de los RMSE fueron semejantes, se eligió como más adecuado el método que requiere menos datos de partida (KO).

2. *Método más adecuado para obtener cartografía espacialmente continua de la variable precipitación total.*

Los resultados estadísticos no mostraron diferencias significativas al 95% de probabilidad entre utilizar krigado ordinario y co-krigado ordinario en ninguno de los meses utilizados para el

estudio. Por ello teniendo en cuenta que las medianas de los RMSE fueron similares y que el KO utilizó una variable menos que el CK (elevación), se eligió el krigeado ordinario como el más adecuado para interpolar la precipitación total.

3. Método más adecuado para obtener cartografía espacialmente continua de la variable humedad relativa.

En febrero y julio de 2009, se obtuvieron diferencias significativas al 95% de probabilidad entre los dos métodos de interpolación, KO y CK. En las interpolaciones para el primer período del año los valores de las medianas de los RMSE fueron menores para el KO que para el CK, mientras que en el segundo período las medianas de los RMSE fueron iguales, eligiéndose como método más adecuado el KO por utilizar una variable menos.

4. Líneas de futuro.

Por una parte, la base de datos creada servirá como información de partida en modelos que definirán la probabilidad de incendio producido por rayo en la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Por otra parte, las conclusiones de las interpolaciones obtenidas por KO y CK para cada una de las variables servirán para crear la cartografía diaria de estas variables, que se empleará como dato de partida en los modelos de probabilidad de inicio de incendios originados por rayos en de Castilla y León, en función de los valores de temperatura, precipitación y humedad relativa. Otras líneas de futuro podrían ser la implantación de herramientas para la obtención automática de cartografía continua, una vez conocido el mejor método de interpolación para cada variable, así como comprobar la aplicabilidad de los resultados de este trabajo a otras zonas de España.