

The background features a stylized globe with a grid of latitude and longitude lines. Overlaid on the globe are numerous silhouettes of various types of trees, including deciduous and coniferous species, arranged in a circular pattern around the globe.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Geoinformática aplicada a la generación de cartografías temáticas

**Clima, recursos hídricos, vulnerabilidad
social y deforestación**

Luis Carlos Bravo Peña
Luis Carlos Alatorre Cejudo
(Coordinadores)

DR © Luis Carlos Bravo Peña, Luis Carlos Alatorre Cejudo
(por coordinación)

© Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Avenida Plutarco Elías Calles 1210
Fovissste Chamizal, CP 32310
Ciudad Juárez, Chihuahua, México
Tels. +52 (656) 688 2100 al 09

Geoinformática aplicada a la generación de cartografías temáticas: clima, recursos hídricos, vulnerabilidad social y deforestación / Coordinadores Luis Carlos Bravo Peña, Luis Carlos Alatorre Cejudo.-- Ciudad Juárez, Chihuahua: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2019.

184 páginas.

ISBN: 978-607-520-354-6

Contenido: Introducción.-- Cartografías de variables climáticas de la región central de Chihuahua: una serie temporal 2000-2011 de las estaciones climatológicas de Unifrut / Ana Karen García Peña, Luis Carlos Alatorre Cejudo, Luis Carlos Bravo Peña, Lara Cecilia Wiebe Quintana.-- Diagnóstico del funcionamiento hidráulico de la red de agua potable mediante Sistemas de Información Geográfica en Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua: recomendaciones / Yadira Iveth Ibarra Pérez, Luis Carlos Alatorre Cejudo, Mario Iván Uc Campos, Luis Carlos Bravo Peña.-- Dinámica del crecimiento del área de inundación de la Laguna de Bustillos utilizando imágenes landsat para el año 2013 / Heber Javier García Cortés, Lara Cecilia Wiebe Quintana, Luis Carlos Alatorre Cejudo, Hugo Luis Rojas Villalobos, María Elena Torres Olave.-- Prospección de indicadores de respuesta frente al abatimiento del acuífero, una exploración entre menonitas y mestizos de la región de Cuauhtémoc, Chihuahua / Jessica Iveth Cera Campos, Luis Carlos Bravo Peña, Luis Carlos Alatorre Cejudo, Ramón Leopoldo Moreno Murrieta, María Elena Torres Olave.-- Predicción de áreas susceptibles a deforestación del suroeste de Chihuahua, aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos de regresión lineal múltiple / Héctor Obed Castro Beltrán, Luis Carlos Bravo Peña, María Elena Torres Olave, Lara Cecilia Wiebe Quintana.

Estaciones climatológicas – 2000 -2011 - Chihuahua.

Red de agua potable - Diagnóstico (SIG) - Cuauhtémoc, Chihuahua.

Laguna de Bustillos - Precipitación pluvial.

Recursos hídricos (Indicadores) — Cuauhtémoc, Chihuahua.

Deforestación - Chihuahua - Sistemas de Información Geográfica

HD1696.M6 G46 2019

La edición, diseño y producción editorial de este documento estuvo a cargo de la Dirección General de Comunicación Universitaria, a través de la Subdirección de Editorial y Publicaciones

Coordinación editorial:

Mayola Renova González

Cuidado editorial:

Subdirección de Editorial y Publicaciones

Diseño de portada y diagramación:

Karla María Rascón

Primera edición, 2019

elibros.uacj.mx



Contenido

Introducción 7

Cartografías de variables climáticas de la región central de Chihuahua: una serie temporal 2000-2011 de las estaciones climatológicas de Unifrut

Ana Karen García Peña
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Luis Carlos Bravo Peña
Lara Cecilia Wiebe Quintana 9

Diagnóstico del funcionamiento hidráulico de la red de agua potable mediante Sistemas de Información Geográfica en Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua: recomendaciones

Yadira Iveth Ibarra Pérez
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Mario Iván Uc Campos
Luis Carlos Bravo Peña 33

Dinámica del crecimiento del área de inundación de la Laguna de Bustillos utilizando imágenes landsat para el año 2013

Heber Javier García Cortés
Lara Cecilia Wiebe Quintana
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Hugo Luis Rojas Villalobos
María Elena Torres Olave 71

Prospección de indicadores de respuesta frente al abatimiento del acuífero, una exploración entre menonitas y mestizos de la región de Cuauhtémoc, Chihuahua

Jessica Iveth Cera Campos
Luis Carlos Bravo Peña
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Ramón Leopoldo Moreno Murrieta
María Elena Torres Olave 101

Predicción de áreas susceptibles a deforestación del suroeste de Chihuahua, aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos de regresión lineal múltiple

Héctor Obed Castro Beltrán
Luis Carlos Bravo Peña
María Elena Torres Olave
Lara Cecilia Wiebe Quintana 143

Cartografías de variables climáticas de la región central de Chihuahua: una serie temporal 2000-2011 de las estaciones climatológicas de Unifrut

Ana Karen García Peña
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Luis Carlos Bravo Peña
Lara Cecilia Wiebe Quintana

Resumen

Una densa red de estaciones climatológicas es muy importante para el desarrollo de las regiones geográficas, para así tener una mejor representación de las variables climáticas de una forma espacialmente distribuida. El objetivo de este trabajo fue determinar cartografías de variables climáticas con una red alternativa de estaciones climatológicas de la Unión Agrícola Regional de Fruticultores del Estado de Chihuahua (Unifrut), región central, debido a que la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) no es lo suficientemente densa para representar de forma adecuada la variabilidad espacial del clima en la región. El área de estudio comprende los municipios de Cuauhtémoc, Bachíniva, Guerrero, Namiqipa y Cusihiuriachi, en los cuales se localizan 11 estaciones climatológicas. Se utilizaron tres métodos de interpolación del módulo Geostatistical Analysis de ArcGis 10.1. Fue posible

comparar diversos métodos de interpolación y establecer el óptimo, en función de los errores de predicción, error medio y cuadrático medio. Finalmente, mediante la información climatológica registrada en el periodo 2000-2011, se obtuvieron cartografías de los valores medios de 7 variables climatológicas.

Palabras clave: Cartografía climática, región central de Chihuahua, serie temporal 2000-2011, estaciones climatológicas de UNIFRUT, Geoestatistical Analisis.

Maps of climatic variables of the central region of Chihuahua: a time series 2000-2011 of climatological stations Unifrut

Abstract

A dense network of weather stations is very important for the development of regions, in order to have a better representation of weather variables spatially distributed. The aim of this study was to determine cartography of weather variables by mean of an alternative network of weather stations of the Regional Union of Fruit-farming and Agricultural (Unifrut), in the central region of Chihuahua. This has been necessary because the network of weather stations of the National Weather Service (NWS) is not dense enough to adequately represent the spatial variability of climate in the region. The study area includes the municipalities of Cuauhtémoc, Bachíniva, Guerrero, Namiquipa and Cusihuirachi, where 11 weather stations are located. Three interpolation methods modules of ArcGIS Geostatistical Analisis 10.1 were used. All interpolation methods were compared in order to establish the most optimal in terms of prediction error, mean error and RMS. Finally using climate information recorded in the period 2000-2011, the mean values mapping 7 climatic variables were obtained.

Keywords: climatic cartography, central region of Chihuahua, time series 2000-2011, Unifrut weather stations, geoestatistical analisis.

Introducción

Muchos de los procesos bióticos y abióticos están determinados por las características climáticas del entorno, además en las disciplinas científicas como la agronomía, la climatología, la biología, la ecología y la geografía física, entre otras, el uso de datos climáticos con fines científicos y técnicos son indispensables. Generalmente los datos climáticos presentan problemas asociados a la calidad de la información (Bustamante, J., 2003), sobre todo pobre cobertura espacial y temporal de los datos. En algunos casos estos problemas se ven mitigados por métodos de control de calidad y de homogeneización (Vicente-Serrano *et al.*, 2003). La disponibilidad de una red de estaciones climatológicas con una buena distribución espacial es más problemática, debido a que la información que se registra en las estaciones meteorológicas es permanente, pero se encuentra muy dispersa. En muchas ocasiones, los datos climáticos no están disponibles donde más se necesitan.

Como solución, se han desarrollado diversos métodos estadísticos para predecir los valores climáticos en zonas donde se carece de estaciones meteorológicas. Estos métodos difieren en su concepto y formulación matemática (Borough & McDonnell 1998). La literatura científica se centra más en las variables climáticas en las zonas montañosas (Daly *et al.*, 1994, Prudhomme & Reed 1998, Goovaerts 1999), debido a que la complejidad topográfica genera una gran diversidad de microambientes donde los valores climáticos son muy difíciles de predecir (Daly *et al.*, 2002). Hay menos dificultades en zonas más llanas. Sin embargo, en regiones donde el terreno transita por una topografía llana-piedemontes-sierras, los patrones climáticos son muy complejos, debido a la presencia de cadenas montañosas, ocasionando variaciones estacionales de los flujos de aire y la acumulación frecuente de aire frío en los valles inferiores, que producen inversiones térmicas y la niebla, entre otros (Vicente-Serrano *et al.*, 2003). Esta complejidad climática provoca una gran variación entre localidades vecinas y hace que sea difícil predecir valores climáticos donde las estaciones no están disponibles. A pesar de lo

anterior, la predicción de los valores climáticos en estas zonas montañosas es relevante tanto en términos científicos y aplicados, debido a las actividades humanas, agrícolas, económicas y recreativas que se concentran en estas regiones (Vicente-Serrano et al., 2003).

Los métodos, como interpolaciones locales solo utilizan los datos climáticos de estaciones meteorológicas. Para la predicción climática, en un momento dado, se toman en cuenta los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas (New et al., 2000). Usando estos datos, se puede construir una función matemática, que luego se utiliza para predecir el valor climático en un punto dado. El proceso es espacialmente continuo y termina cuando los datos climáticos son predichos para todos los puntos (New et al. 2000). Por otra parte, interpoladores locales tales como polígonos de Thiessen, el inverso de la distancia ponderada (IDW), funciones de base radial como: i) completely regularized spline; ii) spline with tensión, multiquadratic; iii) multiquadratic inverse; y iv) thinplatespline, también se han utilizado con frecuencia en la predicción climática y generación de cartografía (New et al. 2000).

Hoy en día, con los modelos de regresión, las técnicas más utilizadas en la cartografía climática son geoestadísticas (Bustamante, J., 2003), que analizan la correlación espacial entre los datos registrados en varias estaciones meteorológicas. Este análisis da predicciones imparciales con variación espacial mínima (Curran & Atkinson, 1998). Los métodos aseguran predicciones óptimas de acuerdo con la variación espacial de los datos (Borough & McDonnell 1998). Numerosos autores utilizan la geoestadística para interpolar datos climáticos (Dingman et al., 1988; Karnieli, 1990; Bigg, 1991; Phillips et al., 1992; Bacchi Kottegoda, 1995), con resultados variados.

El estado de Chihuahua cuenta con dos redes de estaciones climatológicas: I) Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y II) Unión Agrícola Regional de Fruticultores del Estado de Chihuahua (Unifrut). La primera cuenta, a nivel estatal, con una red con mayor número de estaciones, más no en la región central del estado

de Chihuahua. El objetivo del presente estudio se centra en generar cartografías climáticas a partir de los datos de la red de Unifrut, con base en una metodología empírica experimental mediante la comparación de métodos de interpolación para analizar la mejor predicción de cada uno de ellos.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la parte central del estado de Chihuahua, México; comprende los municipios de Cuauhtémoc (3018 km²), Bachíniva (1691 km²), Guerrero (5603 km²), Namiquipa (4212 km²) y Cusihuirachi (1810 km²), con un área total de 16 334 km² (Figura 1). El rango altitudinal se caracteriza por presentar una altitud media de 2366 metros sobre el nivel medio del mar (msnm), aunque se pueden encontrar zonas serranas que alcanzan elevaciones de 3081 msnm y valles intramontanos con elevaciones de 1651 msnm (Figura 2).

En el área de estudio se presentan dos tipos de clima: en los municipios de Cuauhtémoc y Cusihuirachi es subhúmedo templado con transición hacia los municipios de Guerrero, Bachíniva y Namiquipa con climas semifríos y en algunos lugares climas semiáridos.

Por otra parte, el estado de Chihuahua cuenta con un total 15 estaciones climatológicas a cargo del SMN con registros que van desde el año 1961 a la fecha, pero en el área de estudio solo se localizan 2 (Figura 3). Unifrut, en cambio, tiene un total de 11 estaciones climatológicas, nueve más que el SMN en el área de estudio y con una mejor distribución espacial (figuras 1 y 2).

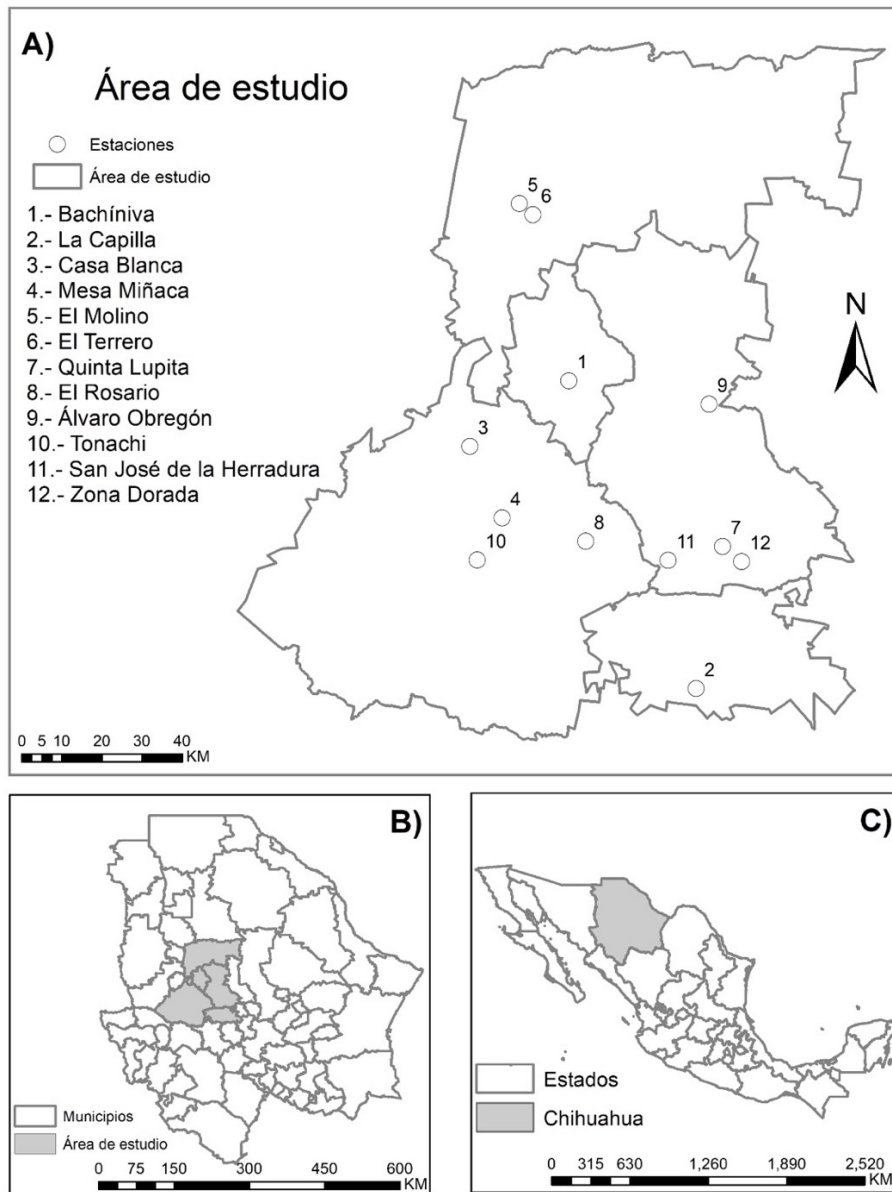


Figura 1. Localización general del área de estudio: A) Estaciones climatológicas de Unifrut; B) Localización de los municipios dentro del estado de Chihuahua; C) Localización del estado de Chihuahua.

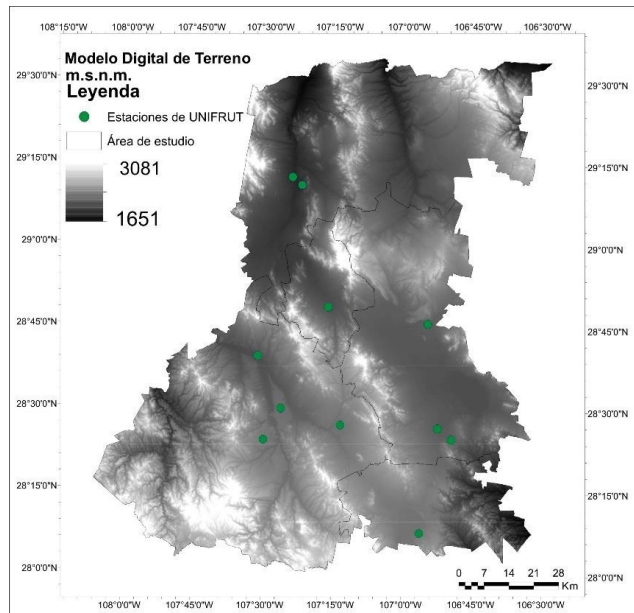


Figura 2. Modelo digital de elevaciones (m.s.n.m.)



Figura 3. Localización de las estaciones climatológicas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN).

Selección de la base de datos

Para este estudio se utilizó la base de datos de la red de estaciones climatológicas de Unifrut, alterna a la del SMN, la cual se

encuentra en operación desde el año 2000 hasta la actualidad. Dicha red recoge información diaria de diversas variables climatológicas. Se utilizaron los datos de enero del 2000 a diciembre del 2011. Se dispone de 11 estaciones, cada una genera la información de las siguientes variables: i) precipitación media anual (PMA; mm año⁻¹); ii) temperatura media anual (TMA; °C); iii) temperatura mínima media anual (TMINA; °C); iv) temperatura máxima media anual (TMAXA; °C); v) velocidad media anual del viento (VMAV; Km/h); vi) velocidad máxima anual del viento (VMAXV; Km/h) y vii) evaporación media anual (EMA; mm año⁻¹). Para cada una de estas variables se calculó la media anual desde enero hasta diciembre de cada año comprendido desde el 2000 hasta el 2011, para determinar sus respectivas cartografías.

Elaboración de cartografías climáticas

Los datos de cartografías de variables climáticas, en comparación con otro tipo de variables ambientales, tienen un elevado grado de dificultad para su elaboración, por el hecho de que se presentan en tiempo real y que se encuentran en constante cambio. Para la elaboración de las cartografías se generarán predicciones para analizar el comportamiento de los datos en las áreas que quedan desprotegidas de estaciones meteorológicas, ya que la información existente es de puntos en específico y no son los mismos valores en unos lugares que en otros. Es por eso que se hace necesario evaluar la predicción de diferentes métodos de interpolación y el análisis del comportamiento de los datos climatológicos en el área de estudio.

Para el análisis de los datos y la generación de las cartografías de variables climáticas en el área de estudio, se aplicaron tres métodos de interpolación contenidos en el software ArcGIS 10.1, los métodos a comparar fueron: Kriging Ordinario (KO), Kriging Simple (KS) y Radial Basis Function (RBF), para la selección del mejor método se compararon los valores resultantes de la predicción, la media del error y el error medio cuadrático (RMS). Cabe

mencionar que los métodos de interpolación deterministas no se han considerado para este estudio debido a que no realizan un análisis previo de la variable a interpolar, además de realizar suposiciones generales (Cañada Torrencilla 2007). En cambio, los métodos de interpolación geoestadísticos estudian en primer lugar la autocorrelación espacial de la variable a interpolar, usando muestras puntuales, y a su vez utilizan un semivariograma para descubrir y elaborar modelos espaciales (Cañada Torrencilla 2007a).

Descripción de Kriging

Kriging es un interpolador que puede ser exacto o suavizado en función del modelo de error de medición. Es muy flexible y facilita investigar los gráficos de autocorrelación espacial y de correlación cruzada. Kriging utiliza modelos estadísticos que permiten una variedad de superficies de salida incluyendo predicciones, los errores estándar de predicción, probabilidad y cuántil. La flexibilidad del Kriging puede requerir una gran cantidad de toma de decisiones (Cañada Torrencilla 2007c). Kriging asume los datos que provienen de un proceso estocástico estacionario. Es decir, que las funciones de distribución como lo son la media, las varianzas y la autocovarianza tienen un comportamiento constante (estabilidad a través del tiempo).

a) Kriging Ordinario (KO)

Asume que la variable es estacionaria y que no tiene tendencia, la ecuación que lo define es: $Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s)$, siendo $Z(s)$ la variable de interés; $\mu(s)$ una constante (media) desconocida, $\varepsilon(s)$ los errores aleatorios; s simplemente indica el lugar con unas determinadas coordenadas espaciales X (longitud) e Y (latitud). Se utiliza para datos que no tienen tendencia y cuya media es desconocida (Cañada Torrencilla 2007c).

b) Kriging Simple (KS)

El kriging simple funciona similar al kriging ordinario, salvo que considera la media de los datos una constante conocida y que la suma de los pesos no es igual a 1. La ecuación es similar a la

del kriging ordinario y se define: $Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s)$, siendo $Z(s)$ la variable de interés; $\mu(s)$ una constante (media) conocida, $\varepsilon(s)$ los errores aleatorios; s simplemente indica el lugar con unas determinadas coordenadas espaciales X (longitud) e Y (latitud) (Cañada Torrencilla 2007c).

Descripción de Funciones de Base Radial (RBF)

Es una técnica de interpolación exacta. La superficie creada debe pasar por cada uno de los puntos muestrales. Se utiliza para producir superficies lisas; se consiguen buenos resultados suaves para diferentes superficies como la elevación (Cañada Torrencilla 2007b).

Resultados

Los resultados de aplicar cada uno de los tres métodos de interpolación para la base de datos climatológica del área de estudio se muestran en la Tabla 1. Se refleja el resultado del mejor método de interpolación para cada una de las variables climatológicas, correspondiendo a las mejores predicciones. En general, se puede observar que el método que mejor se ajustó a los tipos de variables y a la distribución espacial de las estaciones climatológicas de Unifrut para el área de estudio fue KO.

Tabla 1. Métodos de interpolación seleccionados para cada variable climatológica: kriging simple (KS) y kriging ordinario (KO).

Variables	Método de Interpolación	Forma de búsqueda	Número de vecinos	Media	Error medio cuadrático
TMAXA (°C)	KS	4 Sectores	12	0.004	1.266
TMINA (°C)	KS	4 Sectores	12	-0.027	1.048
TMA (°C)	KO	4 Sectores	12	0.005	0.53
VMAV (km/h)	KO	4 Sectores	12	-0.116	2.545
VMAXV (km/h)	KO	4 Sectores	12	-0.213	8.675
PMA (mm)	KO	4 Sectores	12	-0.211	9.079
EMA (mm año ⁻¹)	KO	4 Sectores	12	-2.702	11.55

Precipitación media anual (PMA; mm)

El resultado de aplicar el método de interpolación KS para la variable de PMA en el área de estudio se expone en la figura 4. La distribución espacial de la PMA muestra que la mayor parte del área localizada en la región norte presenta los valores más elevados, entre 440 a 500 mm, estas áreas tienen como característica una altitud promedio de 1860 msnm. Por otra parte, en la región sur los valores predichos por el modelo son un poco más bajos y van desde 340 a 380 mm, y esta zona tiene un promedio altitudinal de 2100 msnm. En general, toda el área de estudio tiene una PMA de 420 mm.

De acuerdo con los resultados, se puede observar que no existe una correspondencia de la PMA con la distribución espacial de la altitud del relieve, es decir, los valores más altos predominan las zonas menos elevadas. Esto puede deberse a que las estaciones climatológicas se encuentran en los fondos de los valles, y no recogen el gradiente altitudinal, por ende, tampoco el gradiente de la precipitación de zonas menos elevadas a zonas más elevadas.

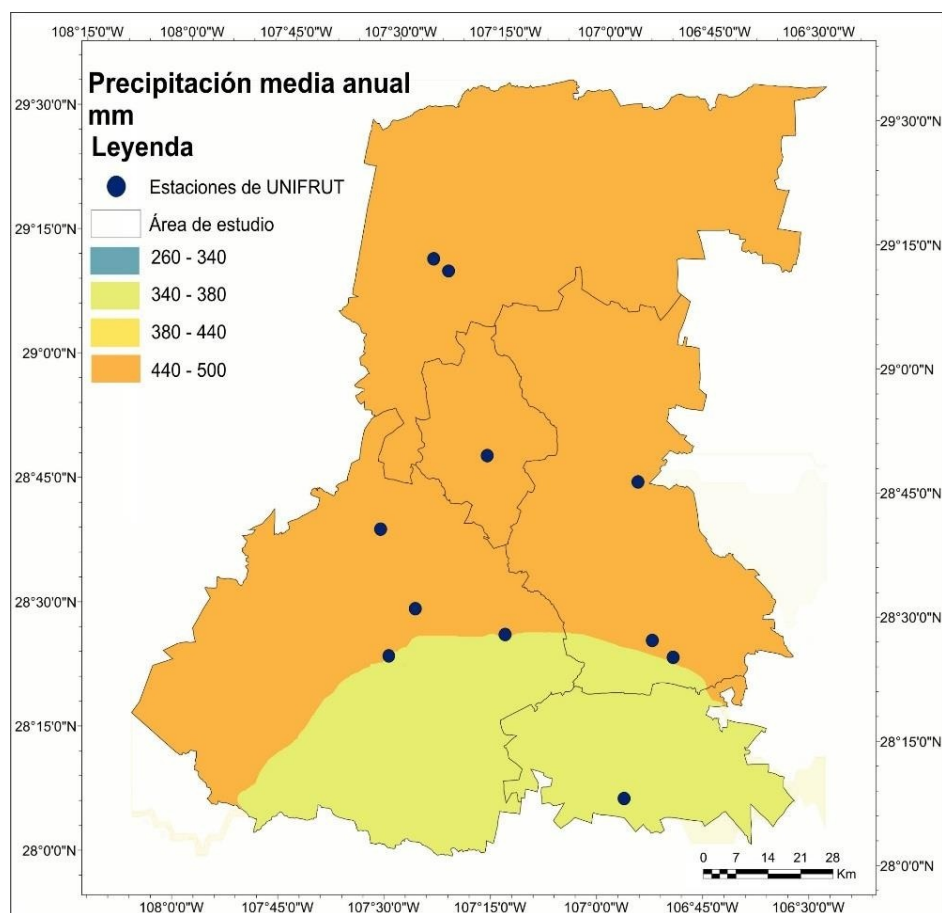


Figura 4. Precipitación media anual (PMA; mm)

Temperatura media anual (TMA; °C)

La cartografía resultante al aplicar el método de interpolación KO para la variable de TMA aplicado al área de estudio se muestra en la figura 5. La distribución espacial de los datos predichos sigue un patrón de transición de sur a norte, localizándose los valores más bajos para TMA en la región de la Sierra Madre Occidental en los municipios de Guerrero y Cusihuirachi, con valores de 10° C, en tanto, que hacia la parte norte del área de estudio los valores más altos se localizan en los municipios de Bachíniva y Namiquipa con temperaturas que alcanzan los 14° C.

De acuerdo con la cartografía resultante y a diferencia de lo observado con la PMA, para la TMA sí existe una relación entre los valores predichos de TMA y la distribución espacial de la

altitud del relieve, es decir, hacia la parte de la sierra se encuentran los valores más bajos en tanto que los valores más altos se localizan en las partes bajas. Esto es lo que se conoce como Gradiente Térmico con respecto a la altitud (Sendiña-Nadal 2006). En la práctica el gradiente térmico también tiene variaciones locales según la zona geotérmica y según sea la orientación de las laderas o vertientes (de solana o de umbría, por ejemplo). La existencia de estos gradientes es uno de los factores determinantes de la circulación atmosférica a gran escala (Sendiña-Nadal, 2006) (Figura 5).

Temperatura mínima anual (TMINA; °C)

En la figura 6 se muestra la cartografía resultante para la variable de TMINA, al aplicar el método de interpolación KS. Presenta un patrón similar a la distribución espacial de la TMA, con un gradiente de sur a norte, correspondiendo las áreas con las temperaturas más bajas al municipio de Guerrero con valores de 2° C en la parte suroeste del área de estudio y hacia la parte norte las áreas con valores más altos en los municipios de Namiquipa y Bachiniva con temperaturas que alcanzan los 5° C. La TMINA se predice en promedio en 4° C en el área de estudio. Como se refleja en los resultados de TMA y TMINA, ambos se comportan de manera similar tomando en cuenta la distribución espacial de los datos altitudinales del relieve (Figura 6).

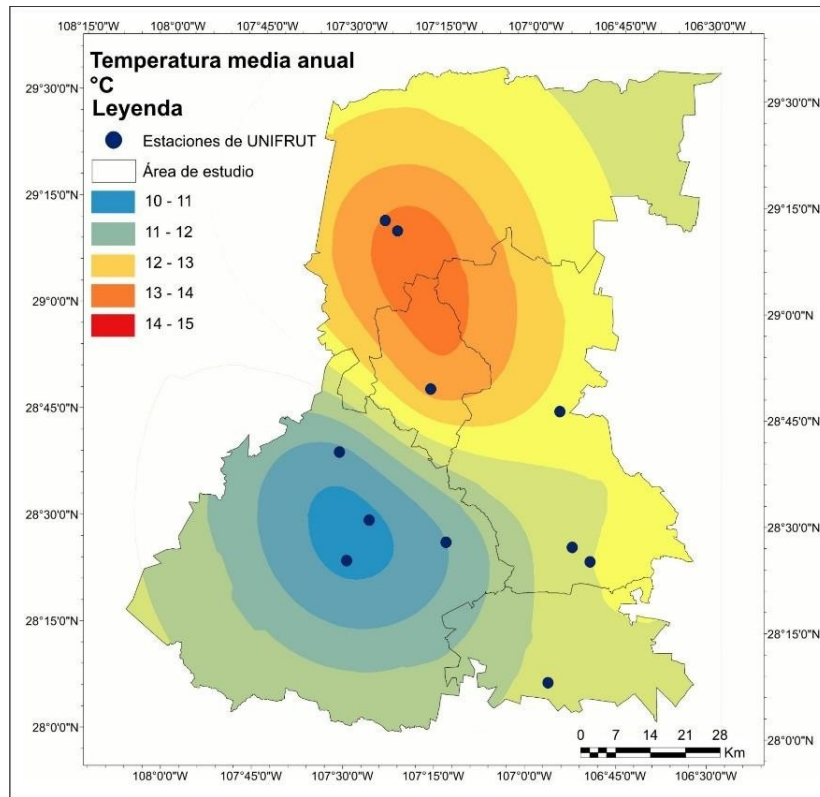


Figura 5. Temperatura media anual (TMA; °C).

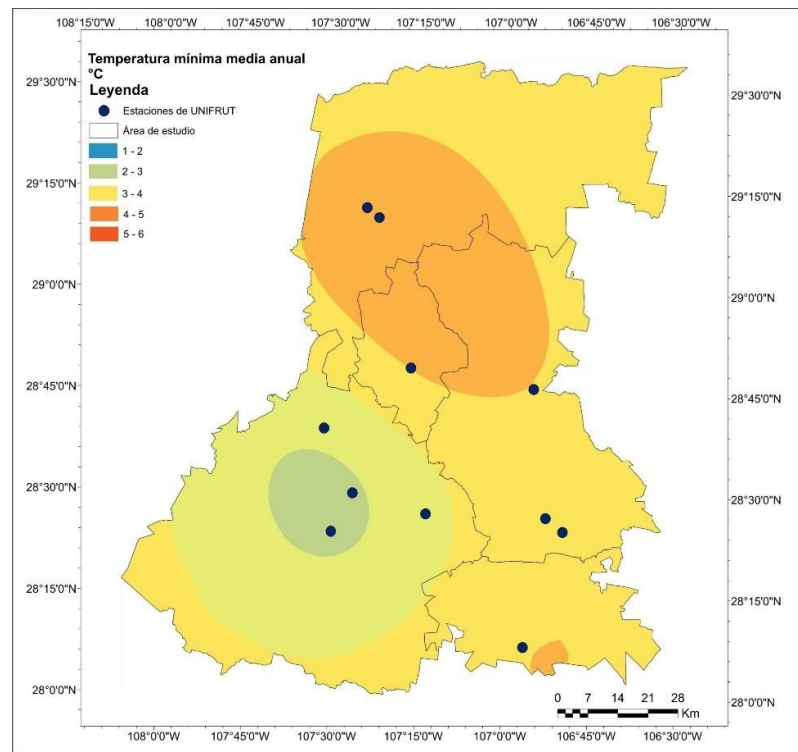


Figura 6. Temperatura mínima media anual (TMINA; °C).



Temperatura máxima anual (TMAXA; °C)

La figura 7 corresponde al resultado de aplicar el método de interpolación KO para la variable de TMAXA. Se encontró que en la zona norte del área de estudio se localizan las temperaturas con valores más altos alcanzando los 25° C en el municipio de Namiquipa. En cambio, es la zona sur del área de estudio donde se predicen los valores más bajos con 22° C en los municipios de Cusihiuriachi y Cuauhtémoc. La predicción arroja una temperatura promedio de 23° C en toda el área de estudio. De nuevo se refleja en el resultado de la predicción de las tres variables de temperatura que la distribución espacial de los valores de altitud juega un papel muy importante para la temperatura.

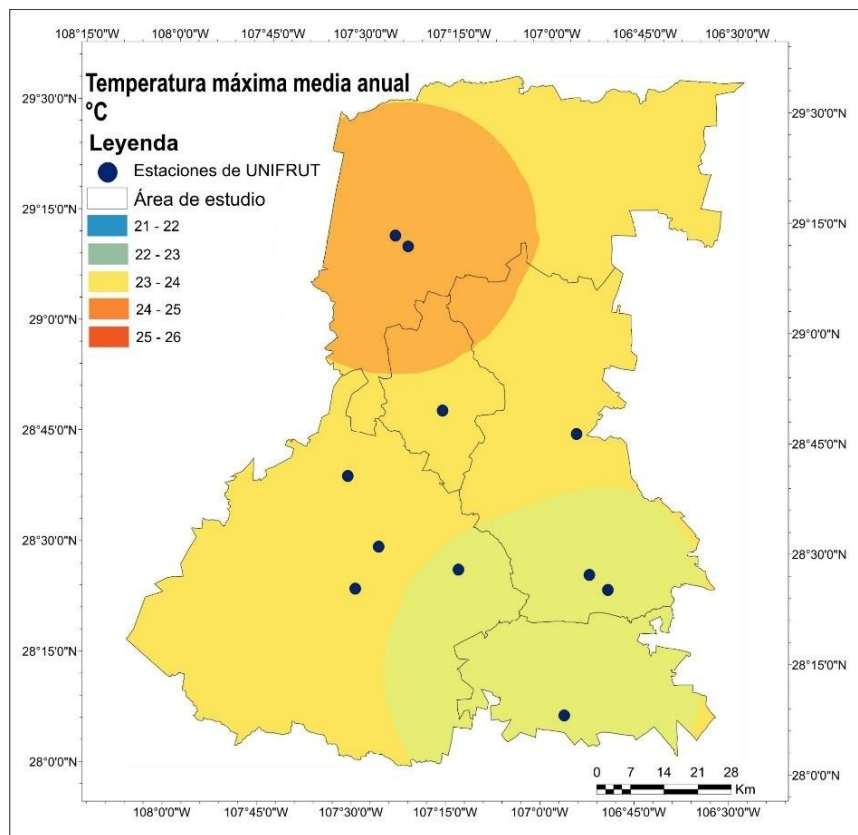


Figura 7. Temperatura máxima media anual (TMAXA; °C).

Evaporación media anual (EMA; mm año⁻¹)

Para la variable de EMA el método que realizó la mejor predicción fue KO, el resultado se muestra en la figura 8. Como se refleja en la predicción, la EMA tiene un comportamiento similar en toda el área de estudio con valores entre 140 y 150 mm, con excepción de dos puntos en específico localizados en los municipios de Namiquipa y Cuauhtémoc, en las cabeceras municipales con datos un poco más bajos entre 130 y 140 mm.

Al comparar la EMA con PMA, se obtiene que esta variable representa aproximadamente el 35% de la PMA, lo cual sin duda hace deducir la importancia que pueden tener años de sequía en la región, y por tanto, ocasionaría déficit en el balance hidrológico.

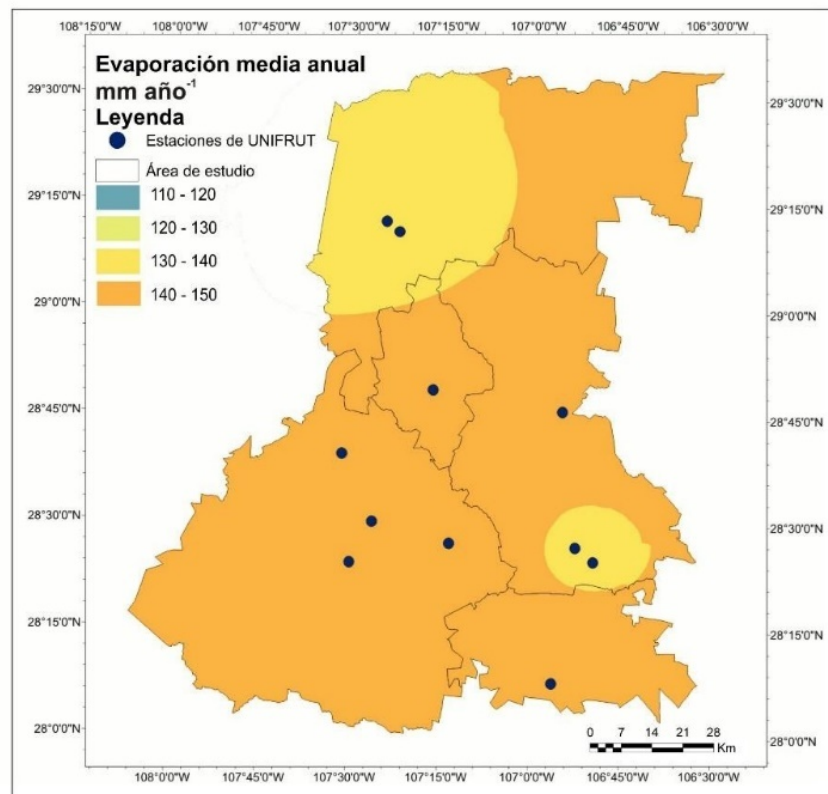


Figura 8. Evaporación media anual (EMA; mm año⁻¹).

Velocidad máxima del viento anual (VMAXV; km/h)

El resultado de la predicción para la variable de VMAXV se muestra en la figura 9 al aplicar el método de interpolación KO. El resultado refleja un gradiente en el patrón de norte a sur; localizándose en la zona norte del área de estudio los datos más bajos con valores entre 25 y 31 kilómetros por hora (km/h), en el municipio de Namiquipa y parte norte del municipio de Bachíniva, hacia la parte sur del área de estudio se presenta un ligero aumento en los valores de VMAXV que van de 34 a 37 km/h en los municipios de Guerrero y Cuauhtémoc.

De acuerdo con los resultados predichos para la variable de VMAXV y su distribución espacial, pareciera haber una relación entre las diferencias geométricas de las cuencas que se localizan al norte y al sur, es decir, en la zona norte se presentan los datos de VMAXV más bajos; estas áreas tienen como característica que las cuencas tienen amplios valles y una sección transversal más grande (1860 msnm), en cambio las zonas de la parte sur que presentan los datos más altos de VMAXV, donde las cuencas son más estrechas (2100 msnm), reduciendo la sección transversal por donde circula el aire, lo cual hace que se incrementen las velocidades.

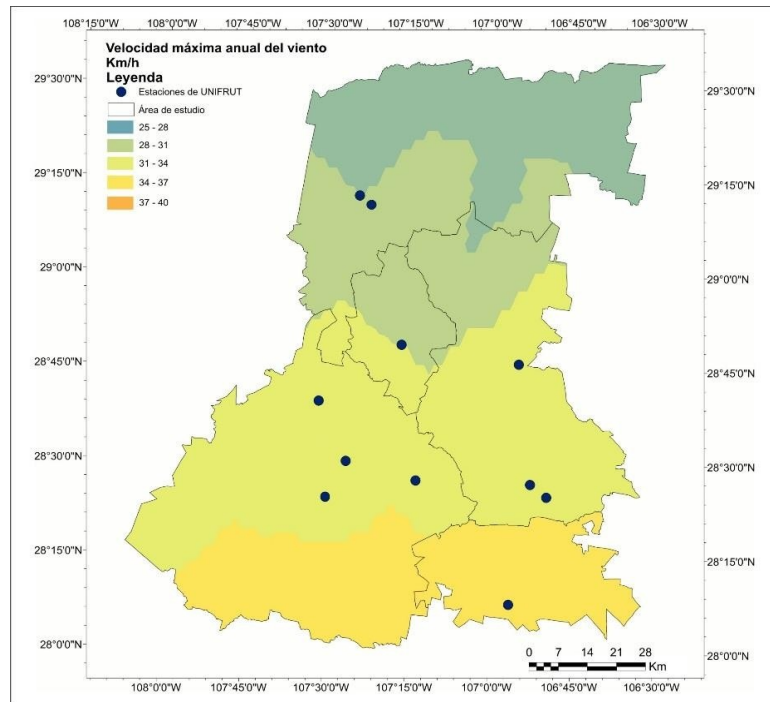


Figura 9. Velocidad máxima del viento anual (VMAXV; km/h).

Velocidad media del viento anual (VMAV; km/h)

La figura 10 muestra el resultado de aplicar el método de interpolación KO para la variable de VMAV. La cartografía presenta un patrón similar al observado en el resultado de la predicción de la variable de VMAXV, con un gradiente de transición de norte a sur. Los municipios de Namiquipa y parte norte de Bachíniva y Cuauhtémoc presentan los valores más bajos entre 5 y 7 km/h, y al igual que la variable de VMAXV, la variable de VMAV se presenta con los valores más altos en la parte sur del área de estudio con datos entre 9 y 11 km/h en el municipio de Cusihuirachi y la parte sur del municipio de Guerrero.

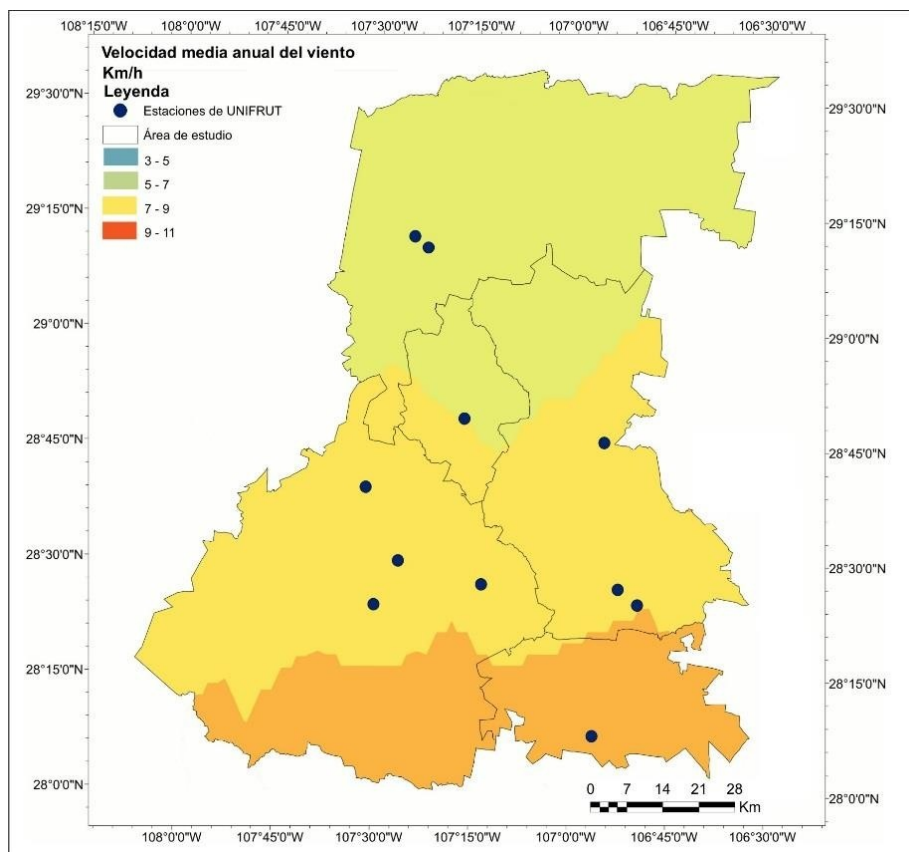


Figura 10. Velocidad media del viento anual (VMAV; km/h).

Discusión y conclusiones

La disponibilidad de cartografías de variables climáticas de alta calidad es un tema clave para la gestión agrícola e hidrológica en muchas regiones del mundo, especialmente en lugares como el área de estudio donde se requiere información actualizada y que sea útil para el tipo de cultivos en la región. La creación de cartografías a partir de una red climatológica, más los distintos métodos de interpolación, hacen posible la obtención de información sobre variables climáticas en los lugares donde no se cuenta con cobertura de estaciones.

Independientemente de las características geográficas, hay que partir del hecho de que los métodos de interpolación deben ser comparados en términos estadísticos (p. ej. error medio y error cuadrático medio) para poder seleccionar el que mejor prediga

la distribución espacial de la variable climática que se quiera predecir en aquellos lugares donde no se cuenta con estaciones climatológicas. Esto se debe a que incluso en áreas donde las diferencias geográficas y su relación con la distribución espacial de las variables climáticas no son determinantes, puede haber diferencias significativas entre los modelos de interpolación aplicados a cada una de las variables predichas. Es decir, el mejor método de asignación puede cambiar como una función de la variable climática asignada, debido a que los factores que determinan la distribución espacial pueden ser diferentes para diferentes variables.

De acuerdo con los resultados, se ha demostrado la utilidad de los Sistemas de Información Geográfica y de los distintos métodos geoestadísticos para determinar cartografías de variables climatológicas a escala regional. Por ejemplo, las cartografías de precipitación y temperatura anual, aquí desarrollados, pueden ser muy útiles para la gestión hidrológica y agrícola de la región. Estas cartografías deben ser el primer paso en la creación de una base de datos de variables climáticas, que incluya la diversidad ofrecida por las escalas temporales estacionales o mensual (New et al. 2000; Brown y Comrie, 2002). En general, las cartografías de variables climáticas son muy útiles para la planificación, ya que permiten ampliar nuestra comprensión de la complejidad de la distribución espacial del clima y su variabilidad temporal en el área de estudio.

La principal conclusión y aportación que se desprende de este trabajo es que se demuestra que una red de estaciones climatológicas alterna a la del SMN provee una mayor cobertura espacial, lo cual permitió obtener una adecuada distribución espacial de las variables climáticas de la región. Por otra parte, la versatilidad de los Sistemas de Información Geográfica y la inclusión de la mayoría de los principales métodos de interpolación en paquetes de software comunes hacen más fácil el proceso de producción y la comparación de cartografías climáticas. Finalmente, las cartografías generadas en este trabajo pueden constituir una base de datos útil para la gestión ambiental y para una

mejor planificación de las actividades productivas que se desarrollan en la región; además, en las disciplinas científicas como la agronomía, la climatología, la biología, la ecología y la geografía física, entre otras, el uso de esta base de datos climáticos y técnicos es indispensable.

Bibliografía

- Atkinson, P.M. (1997). "Geographical information science", *Prog Phys Geogr* 21, pp. 573-582.
- Bacchi, B. and N.T. Kottegoda (1995). "Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall". *J Hydrol* 165, pp. 311-348.
- Bigg, G.R. (1991). "Kriging and intraregional rainfall variability in England", *Int J Climatol* 11, pp. 663-675.
- Borrough, P.A. and R.A. McDonnell (1998). *Principles of geographical information systems*, Oxford University Press, Oxford.
- Brown, D.P. and A.C. Comrie (2002). "Spatial modeling of winter temperature and precipitation in Arizona and New Mexico", USA, *Clim Res* 22, pp. 115-128.
- Bustamante, J. Cartografía predictiva de variables climáticas: comparación de distintos modelos de interpolación de la temperatura en España peninsular. *Graellsia*, [S.l.], v. 59, n. 2-3, p. 359-376, dec. 2003. Disponible en: <http://graellsia.revistas.csic.es/index.php/graellsia/article/view/252/252>. Fecha de acceso: 12 dec. 2018 doi: <http://dx.doi.org/10.3989/graellsia.2003.v59.i2-3.252>.
- Cañada Torrencilla, M. R. (2007a). "Análisis exploratorio de datos espaciales: gráficos de distribución" en Moreno Jiménez, A. (coord.), *Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de aprendizaje con ArcGIS*, Madrid, España, pp. 753-761.

- Cañada Torrencilla, M. R. (2007b). "Técnicas de interpolación espacial deterministas y exactas: media ponderada por el inverso de la distancia y funciones de base radial", en: Moreno Jiménez, A. (coord.). *Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de aprendizaje con ArcGIS*, Madrid, España, pp. 802-818.
- Cañada Torrencilla, M. R. (2007c). "Técnicas de interpolación geoestadísticas: kriging" en Moreno Jiménez, A. (coord.), *Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de aprendizaje con ArcGIS*, Madrid, España, pp. 833-847.
- Cressie, N. (1990). "The origins of Kriging", *Math Geol* 22, pp. 239-253.
- Curran, P.J. and P.M. Atkinson (1998). "Geostatistics and remote sensing", *Prog Phys Geogr* 22, pp. 61-78.
- Daly, C., R.P. Neilson and D.L. Phillips (1994), "A statistical-topographical model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain", *J Clim Appl Meteorol* 33, pp. 140-158.
- Daly, C., W.P. Gibson, G.H. Taylor, G.L. Johnson, and P. Pasteris (2002). "A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate", *Clim Res* 22, pp. 99-113.
- Dingman SL, D.M. Seely-Reynolds and R.C. Reynolds (1988). "Application of kriging to estimating mean annual precipitation in a region of orographic influence", *Water Resour Bull* 24, pp. 329-339.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Goovaerts, P. (1999). "Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity", *Catena* 34, pp. 227-242.
- Karnieli, A. (1990). "Application of kriging technique to areal precipitation mapping in Arizona", *Geojournal* 22, pp. 391-398.

- New, M., M. Hulme and P. Jones (2000). "Representing twentieth century space- time climate variability", Part II, Development of 1901 monthly grids of terrestrial surface climate, *J Clim* 13, pp. 2217-2238.
- Peterson, T.C., R. Vose, R. Schmoyer and V. Razuvaëv (1998). "Global historical climatology network (GHCN) quality control of monthly temperature data", *Int J Climatol* 18, pp. 1169-1179.
- Phillips, D.L., J. Dolph and D. Marks (1992). "A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain", *Agricult for Meteorol* 58, pp. 119-141.
- Prudhomme, C., D.W. Reed (1998). "Relationships between extreme daily precipitation and topography in a mountainous region: a case study in Scotland", *Int J Climatol* 18, pp. 1439-1453.
- Sendiña-Nadal, I. (2006). Fundamentos de meteorología. Universidad Santiago de Compostela.
- Vicente Serrano, S.M., M.A. Saz and J.M. Cuadrat (2003). "Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature", *Climate Research* 24, pp. 161-180.

