

# Spatial interpolation of irrigation requirements in Guanajuato

Aristeo de Jesús López Carranza<sup>1\*</sup>

Víctor Manuel Olmedo Vázquez<sup>1</sup>

Alberto González Sánchez<sup>2</sup>

Ma. Leticia Hernández Hernández<sup>1</sup>

Anayeli Rómulo Juárez<sup>1</sup>

## Abstract

Irrigation water is a crucial factor in agricultural activity, making it essential to use the resource efficiently. In Mexico, the efficiency of irrigation systems is low, largely due to the uneven and limited adoption of technology. In this scenario, it is vital to accurately determine the net irrigation requirements (IR) of crops to quantify the water volumes needed to meet crop demands across the country's agricultural regions. One prominent region is the state of Guanajuato, Mexico, which dedicates over 30 % of its agricultural land to irrigation. This study identifies the IR for the main crops in Guanajuato, creating maps that display their distribution using QGIS software and the inverse distance weighted (IDW) spatial interpolation method, selected for its simplicity, particularly regarding data input in QGIS. This method produced a clear, relatively continuous surface showing the spatial distribution of interpolated values. The modeled crops were alfalfa, barley, maize, sorghum, and wheat. Three variables were considered to calculate the irrigation requirements: reference evapotranspiration (ETo), Effective Precipitation (Pe), and crop evapotranspiration (ET). ETo was computed using Cropwat 8.0 and the Penman-Monteith method, Pe was estimated with the USDA method, and ET was derived from ETo and the crop coefficient (Kc). The state of Guanajuato has 104 weather stations that recorded maximum and minimum temperatures and precipitation from 1981 to 2010, data that was utilized in this study. The resulting maps allow visualization of water volumes, expressed as irrigation depths. These can be used to evaluate water usage in agriculture and aid in making informed decisions regarding irrigation management.

**Keywords:** Spatial interpolation, irrigation requirements, evapotranspiration, effective precipitation, QGIS.

## Interpolación espacial de los requerimientos de riego en el estado de Guanajuato

### Resumen

El agua de riego resulta ser un factor esencial en la actividad agrícola, por lo que es necesario hacer un uso eficiente del recurso. En México, las eficiencias de conducción de las zonas de riego son bajas, lo que está asociado al nivel y parcialización de la tecnificación. En este escenario, es importante determinar con precisión los requerimientos de riego netos (RR) de los cultivos agrícolas, a fin de cuantificar los volúmenes que se requieren para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos que se establecen en las distintas regiones agrícolas del país. Entre estas regiones destaca el estado de Guanajuato, México, que dedica más del 30 % de la superficie agrícola al riego. Por lo anterior, el presente trabajo determina los RR de los principales cultivos agrícolas en el estado de Guanajuato, generando mapas con la distribución de los RR por medio del software QGIS y el método de interpolación espacial de la distancia inversa ponderada (IDW) elegido por la simplicidad que presenta, sobre todo, en la cuestión de datos de entrada del software QGIS, lo que permitió obtener una superficie visible y ligeramente continua en la distribución espacial de los valores interpolados. Los cultivos modelados fueron alfalfa, cebada, maíz, sorgo y trigo. Para determinar los RR se utilizaron tres variables: la evapotranspiración de referencia (ETo), la Precipitación Efectiva (Pe) y la evapotranspiración de cultivo (ET). La ETo fue calculada por medio del programa Cropwat 8.0 y la metodología de Penman-Monteith, la Pe fue calculada con el método de la USDA, mientras que la ET se calculó con la ETo y el coeficiente único del cultivo (Kc). El estado de Guanajuato cuenta con 104 estaciones climatológicas registrando la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación en el periodo 1981-2010, información que fue utilizada en este trabajo. El resultado fue la obtención de mapas que permiten visualizar los volúmenes de agua, expresados en láminas de riego, con los cuales es posible determinar, entre varias aplicaciones, los escenarios posibles para contabilizar el uso de agua que se le da a la agricultura y coadyuvar a la toma correcta de decisiones en el riego agrícola.

**Palabras clave:** Interpolación espacial, requerimientos de riego, evapotranspiración, precipitación efectiva, QGIS.

\*Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Texcoco Edo. de México, C. P. 56230.

\*Corresponding author: aristeo1220@gmail.com Tel: 7352358799, ORCID ID: 0009-0005-6469-7956

## Introduction

The main global use of water from rivers and aquifers is for agriculture, according to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2011), with 70 % of the extracted water being used in agricultural production.

An effective irrigation system is essential for food production, as only 20 % of the world's cultivated land has irrigation infrastructure, yet it produces 40 % of global crops (UNESCO, 2017). Countries such as China, India, and the United States lead in irrigation infrastructure, while Mexico ranks seventh (FAO, 2014).

The irrigation system is crucial for optimizing the allocated water volume for each crop, delivering the necessary amount at the right time to increase production yields.

Irrigation water in Mexico is a crucial factor in agricultural activity, making it essential to use this resource efficiently. However, the operational efficiency of irrigation zones in Mexico is very low, with only 37 % in Irrigation Districts and 57 % in Irrigation Units (Jiménez et al., 2010). This is linked to the level of modernization; as of 2017, 70 % of irrigation was still primarily by gravity, followed by drip irrigation at 15 % and sprinkler irrigation at 5 %, with the remainder using other methods. Of the total gravity irrigation, more than 65 % continues to be conducted through earthen channels (INEGI, 2018). The modernization of irrigation has not yet reached all areas outside the Irrigation Districts, resulting in inadequate water volumes being applied during gravity irrigation, leading to other problems that hinder optimal crop yields.

In this context, it is crucial to accurately determine the net irrigation requirements (IR) of crops and quantify the volumes needed to meet their water demand in various agricultural regions of the country. Irrigation requirements replenish water lost through crop evapotranspiration (ETc), with the contribution from effective precipitation (Pe) subtracted from this. Precisely estimating the water required by crops offers valuable information to mitigate the negative impact of inefficiencies in conveyance systems, aiming to deliver the most appropriate volume at the plot level.

The precise estimation of the IR is not trivial. The variables involved in the calculations depend on climatic data from conventional, agro-climatic, synoptic, or

## Introducción

El principal uso del recurso agua proveniente de ríos y acuíferos a nivel mundial se utiliza en la agricultura, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2011), ya que se utiliza el 70 % del agua extraída en el proceso de producción agrícola.

Un buen sistema de riego es indispensable para la producción de alimentos ya que, de toda la superficie cultivada a nivel mundial, solo el 20 % cuenta con infraestructura de riego, produciendo el 40 % de los cultivos del mundo (UNESCO, 2017). Países como China, India y los Estados Unidos de Norteamérica ocupan los primeros lugares con infraestructura para riego, mientras que México se coloca en el séptimo lugar (FAO, 2014).

El sistema de riego es importante para que los cultivos aprovechen de la mejor manera posible el volumen de agua asignada para cada cultivo, dándole la cantidad necesaria en el momento oportuno; con el propósito de obtener mayores ingresos en la producción.

El agua de riego en México resulta ser un factor esencial en la actividad agrícola, por lo que es necesario hacer un uso eficiente del recurso. Sin embargo, la eficiencia de operación de las zonas de riego en México es muy baja, ya que en los Distritos de Riego es del 37 % y en las Unidades de Riego es del 57 % (Jiménez, et al., 2010). Esto está relacionado con el nivel de tecnificación, ya que hasta el año 2017, el 70 % del riego continuaba siendo principalmente por gravedad, seguido por goteo con un 15 %, y con aspersión un 5 %; el resto utiliza otros métodos de irrigación. Del total de riego por gravedad, más del 65 % se sigue realizando mediante canales de tierra (INEGI, 2018). La tecnificación del riego aun no llega a todas las zonas fuera de los Distritos de Riego y eso genera que al regar por gravedad no se apliquen los volúmenes de agua adecuados, provocando otros daños que interfieren en el rendimiento óptimo de los cultivos.

En este contexto, se hace sumamente importante determinar con precisión los requerimientos de riego netos (RR) de los cultivos agrícolas y cuantificar los volúmenes que se requieren para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos que se establecen en las distintas regiones agrícolas del país. Los requerimientos de riego reponen el agua que ha sido

automatic weather stations. In this regard, the availability of climatic data is uneven across the country, depending on the atmospheric parameters recorded and the instruments used by the stations. The state of Guanajuato has only two automatic weather stations; thus, calculating the reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) using the Penman-Monteith method (Allen et al., 2006) is unfavorable due to insufficient data for better accuracy.

The method for calculating the IR is more accurate when evapotranspiration is calculated using meteorological variables with the fewest missing or erroneous data (Hernández, 2013). When this data is unavailable, interpolation and calibration methods are used to ensure greater reliability. Spatial interpolation is defined as the process that allows the calculation of a variable's value at a location in space (a non-sampled point with an estimated value) based on the values of that variable at other locations in space (sampled points with real values) (Bosque, 1992, as cited in Cañada et al., 2007). In this process, three values are used for the analysis, where x and y are employed to locate the point, and z represents the parameter to be determined (Ferreira, 2005).

Various studies have developed spatial data processing techniques that generate predictive models, where these variables are analyzed and interpreted through Geographic Information Systems (GIS). In these systems, elements are created from sampling or remote sensors (Miranda & Condal, 2003). The authors further note that spatial interpolation algorithms are most appropriate for this type of analysis. Modeling allows visualization of scenarios for a given area where limited data are available, thus yielding more detailed and optimal results for decision-making. These studies can be applied to forestry, climate, economic projects, and more.

Díaz et al. (2008) assert that climatic uncertainty plays a significant role in the modeling of hydrological processes. In this regard, they state: "Hence, the stochastic approach offers its greatest benefit by quantifying climatic variability and incorporating it into the prediction of events."

Dressler et al. (2000) and Díaz et al. (2008) have confirmed that the interpolation of climatic data has been widely studied globally, and various techniques have been applied based on the results to determine

evapotranspirada por el cultivo (ET<sub>c</sub>), además de que a ésta se le sustraen la aportación de agua proveniente de la precipitación efectiva (Pe). Una estimación precisa del agua requerida por los cultivos aporta información para disminuir el impacto negativo de la deficiencia de los sistemas de conducción, con el fin de entregar el volumen más adecuado a nivel de parcela.

La estimación precisa de los RR no es trivial. Las variables que intervienen en el cálculo utilizan datos climatológicos provenientes de estaciones meteorológicas convencionales, agro-climatológicas, sinópticas o automáticas. En este sentido, la disponibilidad de los datos climatológicos es desigual en todo el país, ya que estos dependen de los parámetros atmosféricos que se registran y los instrumentos con los que están equipadas las estaciones. El estado de Guanajuato únicamente cuenta con dos estaciones automáticas, por lo que al momento de calcular la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) por el método Penman-Monteith (Allen et al., 2006) el método resulta desfavorable al no contar con los datos requeridos para obtener una mejor precisión.

La forma de calcular el RR es más exacta cuando la evapotranspiración ha sido calculada con los datos de las variables meteorológicas con la menor cantidad de datos faltantes o erróneos (Hernández, 2013); cuando no se tiene la disponibilidad de ellos, se recurre a la interpolación y calibración de estos a través de métodos que aseguren una mayor confiabilidad. La interpolación espacial, se define como el procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral, con un valor estimado) conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales con valores reales) (Bosque, 1992, como se citó en Cañada et al., 2007). De esta manera, se utilizan tres valores para llevar a cabo el análisis, donde se puede utilizar x e y para localizar el punto, y se considera z el parámetro que se debe encontrar (Ferreira, 2005).

En diversas investigaciones, se han desarrollado técnicas de procesamiento de datos espaciales que generan modelos de predicción, donde estas variables son analizadas e interpretadas por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en los cuales los elementos son creados a partir de muestras o

continuous surfaces for climatic variables such as temperature and precipitation—two key variables in agricultural production processes. As Díaz et al. (2008) mention:

Crop-climate interaction models have great potential to estimate crop responses to climate variations, although they require detailed information on soil, crop, and climate (Conde et al., 1999). The interaction between these factors helps determine the productive potential of plant species and the adaptation of species of interest based on their agroclimatic requirements. In this context, the use of Geographic Information Systems (GIS) provides full capability for this representation by utilizing algorithms that exploit the attributes and resources of digital systems. Currently, GIS includes tools that allow for the combination of statistical analysis and spatial interpolation to create continuous surfaces for climatic variables.

Currently, spatial interpolations are performed using GIS software such as ArcGIS, QGIS, and Saga. GIS allows us to estimate, approximate, average, and weigh unavailable information (due to the absence of weather stations) in new areas of interest, which greatly contributes to agriculture.

However, as noted by Kitanidis (1997) and Miranda and Condal (2003), the accuracy of the results may not be precise, as it depends on the interpretation and statistical hypotheses of the model being studied, particularly regarding the spatial structure of the attributes. In this regard, Díaz et al. (2008) demonstrated the great importance of developing prediction models based on interpolation; however, in Mexico, few studies have focused on analyzing the goodness-of-fit of various climatic data interpolation methods. Thus, the main aim of this work is to analyze the interpolation methods available in QGIS software and, based on this analysis, generate informative maps that allow for the visualization of data where there are no sampling points.

The objective of this research was to quantify the irrigation requirements (IR) of the main crops in the state of Guanajuato through spatial interpolation (using QGIS software), with the following hypothesis: *Spatial interpolation of irrigation requirements will al-*

de sensores remotos (Miranda & Condal, 2003). Los autores agregan que, para este tipo de análisis, lo más conveniente es utilizar algoritmos de interpolación espacial. La modelación permite visualizar los escenarios de un área determinada en la cual únicamente hay pocos datos que permitan profundizar un resultado óptimo a la hora de tomar decisiones. Los estudios se pueden desarrollar en proyectos forestales, climatológicos, económicos, entre otros.

Díaz et al. (2008) aseguran que la incertidumbre climática juega un papel importante en el contexto de la modelación de procesos hidrológicos; en este sentido, mencionan que: "de aquí a que la aproximación estocástica ofrezca su máxima bondad al cuantificar la variabilidad climática e incorporarla a procesos de predicción de eventos".

Dressler et al. (2000) y Díaz et al. (2008) han confirmado que la interpolación de datos climáticos ha sido estudiada ampliamente en el mundo y a través de los resultados obtenidos se han utilizado distintas técnicas para determinar superficies continuas de variables climáticas como temperatura y precipitación, que son dos variables en proceso de producción agrícola. Como lo mencionan Díaz et al. (2008):

Los modelos de interacción cultivo-clima tienen un gran potencial para estimar la respuesta de los cultivos a variaciones climáticas, aunque requieren de información detallada del suelo, cultivo y clima (Conde et al., 1999). La interacción entre estos factores ayuda a determinar el potencial productivo de especies vegetales y adaptación de las especies de interés en función de sus requerimientos agroclimáticos. En este contexto, el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrece plena capacidad para esta representación haciendo uso de algoritmos que explotan los atributos y recursos de los sistemas digitales. En la actualidad los SIG cuentan con herramientas que permiten combinar el análisis estadístico e interpolación espacial para crear superficies continuas de variables climáticas.

Actualmente, se utilizan las interpolaciones espaciales a través de software de SIGs, como ArcGis, QGIS y Saga; por los SIG nos permiten estimar, aproximar, promediar, ponderar; la información que no está dis-

low us to determine the necessary water depth to meet water needs in areas where data is lacking for the main crops in the state of Guanajuato.

## Methodology

### Study area

Guanajuato has a total area of 3,058,000 ha, of which 1,252,352 ha are used for agriculture. Of this, 416,690 ha are irrigated. The state has two irrigation districts: District 011 Alto Río Lerma and District 085 La Begoña. Additionally, there is an irrigated area in the La Piedad Irrigation Module, which is part of Irrigation District 087, Rosario-Mezquite. Of the 16,096 irrigated ha in this module, 11,984 ha are in Guanajuato, and 4,112 ha in Michoacán (Torres, L. M., et al., 2018).

As of 2019, the state ranked seventh nationally in the agricultural sector with a production volume of 11,153,785 tons, of which 87.9 % (9,813,716 tons) was agricultural, 12.0 % (1,337,878 tons) was livestock, and 0.1 % (2,192 tons) came from fishing (SIAP, 2019).

According to the National Institute for Federalism and Municipal Development (INAFED, 2019), Guanajuato is located in the Central Plateau to the south of the Mexican Plateau. It lies between parallels 19°55'08" and 21°52'09" north latitude and meridians 99°41'06" and 102°09'07" west longitude.

### Weather information

Monthly data on maximum temperature, minimum temperature, and precipitation were obtained from the climatological normals published by the National Meteorological Service (SMN, by its acronym in Spanish) for the state of Guanajuato from 1981 to 2010. A total of 142 stations were included in the study (Figure 1), including those from neighboring states that border Guanajuato: to the north with the states of Zacatecas and San Luis Potosí, to the south with the state of Michoacán, to the east with the state of Querétaro, and to the west with the state of Jalisco.

### Reference evapotranspiration ( $ETo$ ) and effective precipitation ( $Pe$ )

Ojeda & Flores (2015) mention that, for practical purposes, evapotranspiration is expressed as the water depth transferred to the atmosphere, typically measured in millimeters (mm) over a fixed time interval.

ponible, (inexistencia de estaciones climatológicas) en sitios nuevos de interés, siendo esto de gran contribución a la agricultura.

No obstante, como lo menciona Kitanidis (1997) citado por Miranda & Condal (2003), la exactitud de los resultados puede no ser exacta, ya que dependerá de la interpretación y la hipótesis estadística del modelo que se pretenda estudiar, especialmente en aquellas relacionadas con la estructura espacial de los atributos. De acuerdo con esto, Díaz et al. (2008) demostraron la gran importancia de desarrollar modelos de predicción basados en interpolación, aunque en México son pocos los estudios que se han enfocado en analizar la cualificación de bondad de los distintos métodos de interpolación de datos climáticos. En este sentido, la idea principal de este trabajo es analizar los métodos de interpolación disponibles en el software QGIS y a partir de ello, generar mapas de carácter informativo que permitan visualizar datos donde no hay puntos muestrales.

El objetivo de la presente investigación fue cuantificar los valores del RR de los principales cultivos en el estado de Guanajuato, a través de una interpolación espacial (mediante el software QGIS), con la siguiente hipótesis: *La interpolación espacial del requerimiento de riego, permitirá conocer la lámina necesaria para satisfacer las necesidades hídricas en lugares donde se carece de información, para los principales cultivos agrícolas en el estado de Guanajuato.*

## Metodología

### Área de estudio

El estado de Guanajuato tiene una superficie total de 3 058 000 ha, de las cuales, 1 252 352 ha son utilizadas para la agricultura; de esta última cifra, 416 690 ha son superficies establecidas bajo riego. En el estado se encuentran dos distritos de riego, el 011 Alto Río Lerma y el 085 la Begoña; también existe una superficie irrigada del Módulo de Riego La Piedad perteneciente al Distrito de Riego 087 Rosario-Mezquite. De las 16 096 ha de riego de dicho modulo, 11 984 se localizan en el estado de Guanajuato y 4 112 en Michoacán (Torres, L. M., et al., 2018).

Hasta 2019, la entidad ocupó el séptimo lugar a nivel nacional en el ámbito agropecuario, obteniendo un volumen de 11 153 785 toneladas de producción, de

ETo is the evapotranspiration rate on a reference surface where water is always available (Allen et al., 2006). Effective precipitation is the fraction of precipitation stored in the root zone, excluding percolated, intercepted, runoff, and evaporated water that does not reach the root zone (León et al., 2007).

In this study, ETo was calculated using FAO's Cropwat 8.0 software, a computational program used for simulating and planning irrigation in gravity-fed agriculture. The program requires climatological data such as temperature, humidity, wind speed, and radiation (Arteaga et al., 2010).

The Penman-Monteith model proposed by the FAO is represented as follows:

$$ETo = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

Where:

ETo: reference evapotranspiration ( $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ );  
 R<sub>n</sub>: net radiation at the crop surface ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ );  
 G: soil heat flux density ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ );  
 T: mean air temperature at 2 m height ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 U<sub>2</sub>: wind speed at 2 m height ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 e<sub>s</sub>: saturation vapor pressure (kPa);  
 e<sub>a</sub>: actual vapor pressure (kPa);  
 e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>: vapor pressure deficit (kPa);  
 Δ: slope of the vapor pressure curve (kPa  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  
 Y: psychrometric constant (kPa  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Because the program allows for the calculation of ETo using the Penman-Monteith method with missing data (utilizing only maximum and minimum temperatures, altitude, and latitude), this method was chosen. Monthly average values were taken from 30-year average data from the meteorological stations, as described in the previous section.

The effective precipitation (Pe) was calculated using the method proposed by the US Department of Agriculture (USDA). The equation varies based on the amount of rainfall:

$$P_e = P \left(125 - \frac{2P}{125}\right) \text{ para } P < 250 \text{ mm} \quad (2)$$

$$P_e = \frac{P}{10} + 125 \text{ para } P \geq 250 \text{ mm} \quad (3)$$

Where:

Pe: effective precipitation (mm);  
 P: precipitation (mm).

las cuales el 87.9 % (9 813 716 t) es agrícola, el 12.0 % (11 337 878 t) es pecuario y 0.1 % (2 192 t) correspondientes a la pesca (SIAP, 2019).

De acuerdo con El Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED, 2019), el estado de Guanajuato se localiza en la Mesa Central y al sur de la Altiplanicie Mexicana; se ubica entre los paralelos 19°55'08" y los 21°52'09" de latitud norte y los meridianos 99°41'06" y 102° 09'07" de longitud oeste.

#### *Información climatológica*

Los datos mensuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación se obtuvieron de las normales climatológicas publicadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), disponibles en el estado de Guanajuato, correspondientes al periodo 1981-2010. En total, se incluyeron 142 estaciones en el estudio (Figura 1), incluyendo las de otros estados que se encontraron en la periferia de la entidad, que colinda al norte con los estados de Zacatecas y San Luis Potosí, al sur con el estado de Michoacán, al este con el estado de Querétaro y al oeste con el estado de Jalisco.

#### *Evapotranspiración de referencia (ETo) y precipitación efectiva (Pe)*

Ojeda & Flores (2015) mencionan que, por cuestiones prácticas, la evapotranspiración es expresada como una lámina de agua que se transfiere a la atmósfera y se expresa usualmente en milímetros (mm) para un intervalo de tiempo fijo, en tanto que la ETo se define como una tasa evapotranspirada en una superficie de referencia en donde siempre hay disponibilidad de agua (Allen et al., 2006). La precipitación efectiva se considera como la fracción de la precipitación que se almacena en la zona de raíces, la cual no incluye el agua percolada, interceptada, escurrida o evaporada, que al precipitarse no llega a la zona radical (León et al., 2007).

En este trabajo, la ETo se calculó con el software Cropwat 8.0 de la FAO, que es un programa de cómputo utilizado para la simulación y planeación de riegos en la agricultura por gravedad, donde las variables que requiere el programa son datos climatológicos de temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación (Arteaga et al., 2010).

El modelo Penman-Monteith propuesto por la FAO se representa de la siguiente manera:

**Crop coefficient (Kc)**

The duration of the crop growth stages is based on the study conducted by Allen et al. (2006) (Table 1), adjusted to the cycle duration recommended by INIFAP (2017). The crop coefficients (Kc) were obtained from the same study as the previously mentioned stages. Using this data, the Kc curves for the main crops in Guanajuato were generated (Table 2).

**Irrigation Requirements (IR)**

The net IR for crops is calculated by subtracting Pe from total crop evapotranspiration (ETc). The ETc variable is obtained by multiplying ETo by Kc for each growth stage. If the result is negative, no irrigation is needed because the water demand is met by rainfall.

**Main crops and planting dates in Guanajuato**

In Mexican agriculture, Guanajuato ranks among the top 10 states with the largest sown area, accounting for 4.5 % of the total sown hectares nationwide at the end of 2018. The crops with the largest areas in the state are grain maize, grain sorghum, grain barley, and grain wheat, occupying the top positions, while alfalfa ranks first among perennial crops (SIAP, 2018). The sowing dates (Table 3) were based on the recommendations of INIFAP (2017).

**Spatial interpolation of irrigation requirements**

QGIS is an open-source GIS software distributed un-

$$ETo = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

Donde:

$ETo$ : evapotranspiración de referencia ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ );  
 $R_n$ : radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ );  
 $G$ : flujo del calor de suelo ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ );  
 $T$ : temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $U_2$ : velocidad del viento a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $e_s$ : presión de vapor de saturación (kPa);  
 $e_a$ : presión real de vapor (kPa);  
 $e_s - e_a$ : déficit de presión de vapor (kPa);  
 $\Delta$ : pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  
 $\gamma$ : constante psicométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Ya que el programa permite calcular la ETo con el método de Penman-Monteith por datos faltantes (utilizando solo la temperatura máxima y temperatura mínima, la altitud y latitud), se optó por elegir dicho método. Los valores ingresados fueron promedios mensuales, para lo cual se utilizaron los datos promedio para el periodo de 30 años de las estaciones climatológicas descritas en la sección anterior.

La precipitación efectiva Pe, por su parte, se calculó con el método propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). La ecuación va de acuerdo a la cantidad de lluvia:

**Table 1. Duration (in days) of the phenological stages of the studied crops.**  
**Cuadro 1. Duración de días de las etapas fenológicas de los cultivos estudiados.**

DURATION OF THE CYCLE / DURACIÓN DEL CICLO							
Crop / Cultivo	Alfalfa		Corn / Maiz		Sorghum / Sorgo	Wheat / Trigo	Barley / Cebada
Stage (days) / Etapa (días)	Sowing / Siembra	PV	O / I				
Beginning / Inicio	13	5	6	23	18	17	16
Development / Desarrollo	27	9	12	31	31	28	26
Middle / Medio	27	9	12	38	35	55	52
End / Final	13	5	5	38	26	33	31
Cycle / Ciclo	80	28	35	130	110	133	125

**Source:** Allen et al. (2006) / **Fuente:** Allen et al (2006)

**Table 2. Unique crop coefficient.**  
**Cuadro 2. Coeficiente único de cultivo.**

FAO 56							
Crop / Cultivo	Alfalfa			Corn / Maíz	Sorghum / Sorgo	Wheat / Trigo	Barley / Cebada
kc	Sowing / Siembra	PV	O/I				
Initial / Inicial	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.7	0.3
Medium / Medio	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.15	1.15
Final	1.15	1.15	1.15	0.35	0.55	0.25	0.25

**Source:** Allen et al. (2006) / **Fuente:** Allen et al. (2006)

der the GPL license (Shelestov et al., 2013), originally developed by Gary Sherman in 2002. The software allows for working with large surface areas and the development of models and predictions in various fields of interest, including agriculture, hydrology, and urbanization.

For spatial interpolation, the inverse distance weighted (IDW) method was chosen because it is based on the mathematical assumption of being a deterministic method aimed at generating information solely from maps.

**Table 3. Proposed sowing dates**  
**Cuadro 3. Fechas de siembra propuestas.**

Crop / Cultivo	Date of Sowing / Fecha de siembra
Corn / Maíz	01-Apr. / 01- Abr.
Sorghum / Sorgo	01-Jun.
Barley	15-Jun.
Wheat	01-Dec. / 01-Dic.
Alfalfa	01-Jan. / 01 Ene.

**Source:** Own elaboration based on information from INIFAP (2017).  
**Fuente:** Elaboración propia a partir de información de INIFAP (2017).

López (1995), as cited by Díaz et al. (2008), states that the highest weight is assigned to the nearest point and decreases with distance, depending on the power coefficient  $\beta$ . Thus, the mathematical model of IDW is given by the following equation:

$$W_i = \frac{N \left( \frac{1}{d_{e-i}} \right)^\beta}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{d_{e-i}} \right)^\beta} \quad (4)$$

$$P_e = P \left( 125 - \frac{2P}{125} \right) \text{ para } P < 250 \text{ mm} \quad (2)$$

$$P_e = \frac{P}{10} + 125 \text{ para } P \geq 250 \text{ mm} \quad (3)$$

Donde:

Pe: precipitación efectiva (mm);

P: precipitación (mm).

#### *Coeficiente de cultivo (Kc)*

La duración de las etapas del ciclo vegetativo de los cultivos está basada en el estudio realizado por Allen et al. (2006), (Cuadro 1), ajustados a la duración del ciclo de acuerdo con lo recomendado por INIFAP (2017); los coeficientes de cultivo (Kc) fueron tomados del mismo estudio que las etapas mencionadas anteriormente. Con estos datos, se generó la curva de Kc para los principales cultivos del estado de Guanajuato (Cuadro 2).

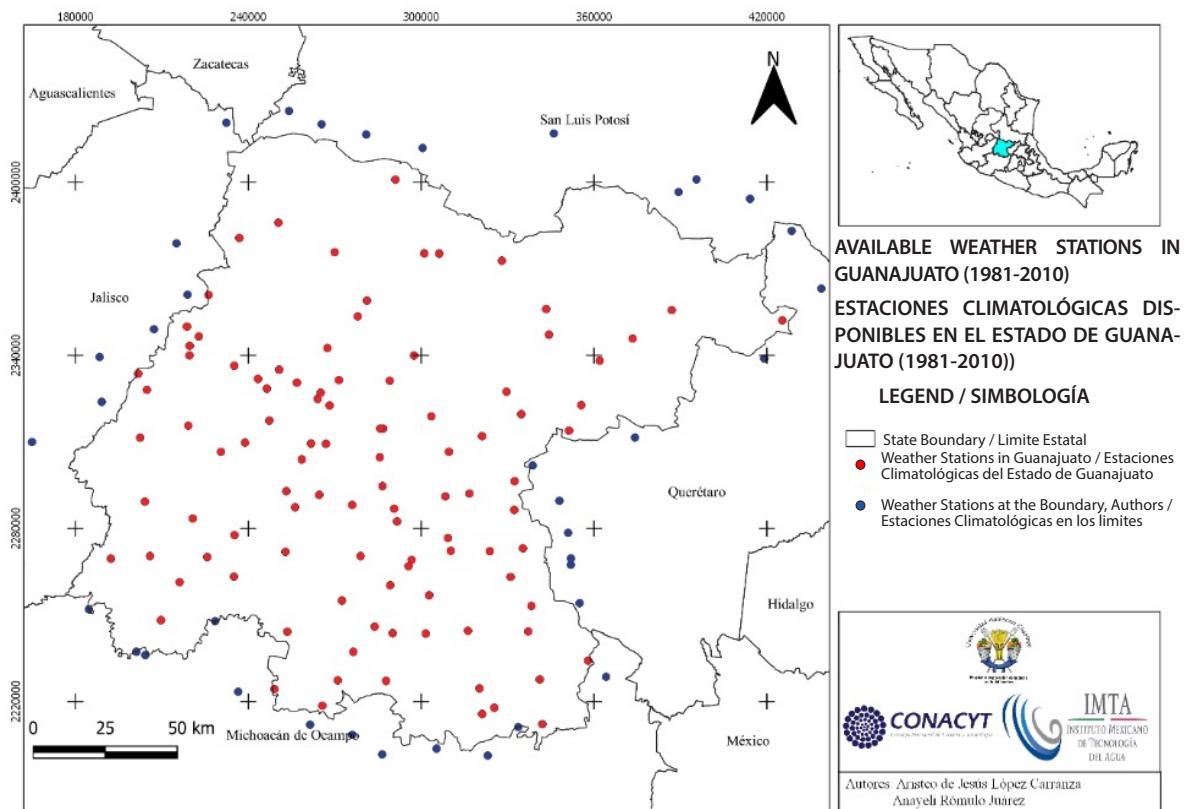
#### *Requerimientos de Riego (RR)*

El RR neto de los cultivos se calcula restando la Pe a la evapotranspiración del cultivo (ETc). La variable ETc se obtiene de multiplicar ETo por el Kc de la etapa correspondiente; si la diferencia es un valor negativo, significa que no es necesaria la aplicación de un riego, ya que la demanda hídrica está siendo satisfecha por las lluvias.

#### *Principales cultivos en el estado y fechas de siembra*

En la agricultura de México, Guanajuato se encuentra dentro de los 10 estados con mayor superficie sembrada, para el cierre agrícola de 2018, estableciendo

**Figure 1. Georeferencing of climatological stations.**  
**Figura 1. Georreferenciación de estaciones climatológicas.**



Where:

$w_i$ : denotes the weight of the station;  $N$ : total number of stations;  $d_{ei}$ : distance between the site to estimate ( $e$ ) and station ( $i$ );  $\beta$ : power coefficient

Villatoro et al. (2008) mention in their study that the coefficient  $\beta$  is the exponent parameter that allows for greater accuracy when applying the above equation. The larger  $\beta$  is, the more weight is assigned to nearby points. As a result, the outcome is smoothed, creating more continuous surfaces.

Additionally, this method is recommended for small datasets, particularly when the variogram parameters are unknown and stations are not evenly distributed (Villatoro et al., 2008).

## Results and discussion

Reference evapotranspiration ( $ETo$ ) and crop evapotranspiration ( $ETc$ ).

From 1980 to 2010, considering that normals represent an average of the observed years of climatologi-

el 4.5 % de hectáreas sembradas a nivel nacional.

Los cultivos con mayor superficie en el estado son: el maíz de grano, sorgo de grano, cebada de grano, trigo de grano ocupando los primeros lugares y en el caso de cultivos perennes, la alfalfa (SIAP, 2018).

Las fechas de siembra (Cuadro 3) fueron propuestas con base en lo recomendado por el INIFAP (2017):

*Interpolación espacial de los requerimientos de riego*  
QGIS es un software SIG de código abierto difundido de acuerdo con las reglas de difusión de la licencia GPL (Shelestov et al., 2013), creado originalmente por Gary Sherman en 2002. El software permite trabajar extensiones de superficie de trabajo significativamente grandes, desarrollar modelos y predicciones en numerosas áreas de interés para la agricultura, hidrología y urbanización, entre otras.

Para la interpolación espacial se optó por utilizar el método de la distancia inversa ponderada (Inverse Distance Weighted Interpolation, IDW), pues éste genera la suposición matemática partiendo de que

cal variables, it was found that the average ETo value for Guanajuato, using 104 stations, is 4.52 mm·day<sup>-1</sup>. To verify the accuracy of this estimate, the variation range was calculated based on the mean and standard deviation, with a lower limit of 4.24 mm·day<sup>-1</sup> and an upper limit of 4.80 mm·day<sup>-1</sup>. In total, 73 stations recorded ETo values within the range, 16 stations recorded values above the upper limit, and 15 stations recorded values below the lower limit (Figure 2). As mentioned above, the ETo variable primarily depends on the atmospheric conditions. Because this study covers an entire state, some regions are characterized by specific climates and ETo levels. For instance, ETo tends to increase in response to rising temperatures in arid regions; the opposite trend occurs in temperate regions.

The ETc values depend not only on ETo but also on the crop coefficient Kc, which varies throughout the growing cycle. The greatest amount of water is consumed during the mid-development stage when plants exert the most effort to grow.

#### *Effective precipitation*

The average annual Pe from the 104 stations in the state is 505.12 mm. Statistically, two stations recorded values above 650 mm and four stations recorded values below 350 mm. These variations are likely due to local atmospheric conditions, as the calculation is based solely on precipitation, which varies according to the climate type.

Since the values were interpolated, when visualizing the corresponding maps, these figures affected the continuity of the generated surfaces, causing abrupt changes that are not uniform even when considering that averages for the period are being used.

#### *Irrigation requirements*

First, alfalfa is a perennial crop with an average IR of 1,061.66 mm for its first year of production. Barley, maize, sorghum, and wheat require 176.09, 323.2, 136.9, and 445.6 mm per cycle, respectively, as shown in Figures 5 to 9.

#### *Spatial interpolation*

Vargas et al. (2010) recommend using stations outside the area of interest to reduce the uncertainty of

es un método determinístico y lo que se pretende es generar únicamente información a partir de mapas. López (1995) citado por Díaz et al. (2008), refiere que se asigna el peso más grande al punto más cercano y este peso disminuye a medida que aumenta la distancia dependiendo del coeficiente potencia  $\beta$ , dicho esto, el modelo matemático de IDW está dado por la siguiente ecuación:

Donde:

$$W_i = \frac{N \left( \frac{1}{d_{e-i}} \right)^\beta}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{d_{e-i}} \right)^\beta} \quad (4)$$

$w_i$ : denota el peso de la estación; N: número total de estaciones;  $d_{e-i}$ : distancia entre el sitio a estimar e y la estación i;  $\beta$ : coeficiente de potencia

Villatoro, et al. (2008) mencionan en su estudio que el coeficiente  $\beta$  es el parámetro del exponente que permite tener una mayor precisión al momento de aplicar la ecuación mencionada anteriormente, mientras más grande sea  $\beta$ , mayor será el peso que se dará a los puntos cercanos y con ello, el resultado se suaviza creando superficies más continuas

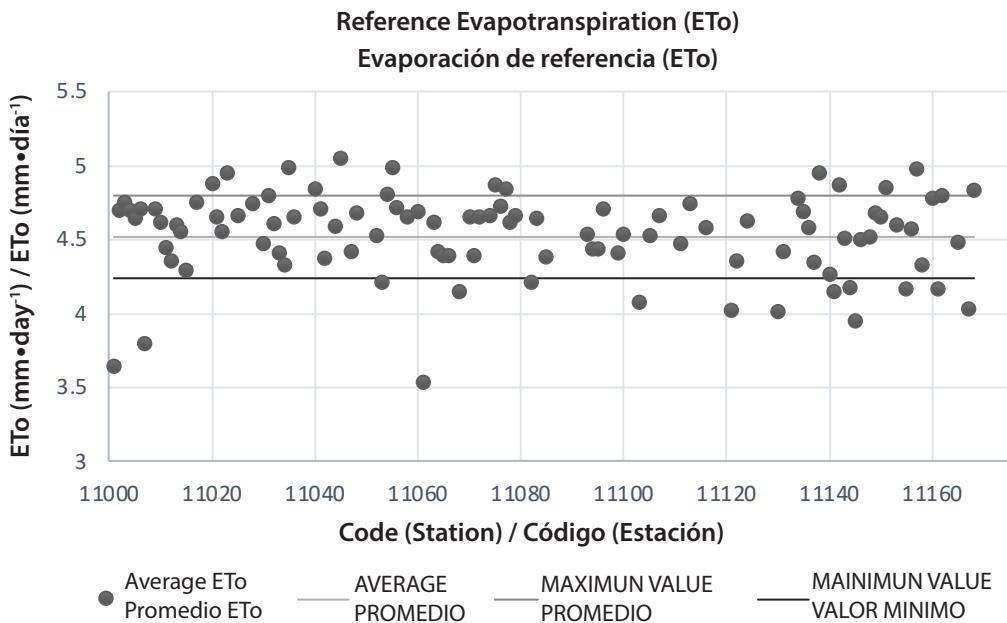
Además, se recomienda este método para bases de datos pequeñas, añadiendo aun el hecho de no conocer los parámetros del variograma y que las estaciones no están distribuidas de manera uniforme (Villatoro et al., 2008).

## **Resultados y discusión**

### *Evapotranspiración de referencia (ETo) y evapotranspiración del cultivo (ETc).*

Para el periodo que va del año 1980 a 2010, considerando que las normales consideran un promedio, los años observados de las variables climatológicas, se encontró que el valor de la ETo promedio, para Guanajuato, utilizando 104 estaciones, es de 4.52 mm·día<sup>-1</sup>. Para verificar la centralidad de la estimación, se calculó un rango de variación delimitado por la media y la desviación estándar, fijando un límite inferior en 4.24 mm·día<sup>-1</sup> y un límite superior en 4.80 mm·día<sup>-1</sup>. En total, se cuantificaron 73 estaciones con una ETo dentro del rango, 16 estaciones con valores por encima del límite superior y 15 con valores por debajo del límite inferior (Figura 2). Como se

**Figure 2. ETo calculated for Guanajuato for the period 1980-2010.**  
**Figura 2. ETo calculada para Guanajuato, para el periodo 1980-2010.**



the interpolated data at the border of Guanajuato. Therefore, this study considered stations in Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí, and Querétaro, increasing the number of points and values outside the state of interest and improving the interpolation estimates at the edges. Once the interpolation was complete, the “clipping” operation in QGIS removed any unnecessary spatial information outside the study area.

The following describes the results of the spatial interpolation. First, a map generated using daily ETo interpolation and its monthly average is presented. Figure 3 shows how evapotranspiration ranges from 2.3 to 6.6 mm·day<sup>-1</sup>, with May having the highest ETo followed by April and June. This is consistent with climatological data, as the highest temperatures of the year occur during these months.

Figure 4 shows that Pe ranges from 290 mm to 887 mm annually. In the northern part of the state, effective precipitation decreases, falling below 432 mm. The highest precipitation occurs in June, July, August, and September, whereas the opposite is true from January to April and in November and December.

For the spatial distribution of the monthly IR for alfalfa in Guanajuato (Figure 5), it is observed that the IR is highest in March, April, and May, as these months

mencionó previamente, la variable ETo depende principalmente de las condiciones atmosféricas y dado que este estudio consideró toda una entidad federativa, hay regiones caracterizadas por un clima y una ETo predominante. Se observa, por ejemplo, que en lugares áridos la ETo aumentará, respondiendo al incremento de temperatura, a diferencia de lugares templados, donde ocurre lo contrario.

Respecto a la ETc, los valores no solo dependieron de la ETo, también interfirió el coeficiente de cultivo Kc, ya que este se presenta durante todo el ciclo vegetativo, siendo el desarrollo medio donde se consume mayor cantidad de agua, ya que es aquí donde la planta hace mayor esfuerzo para desarrollarse.

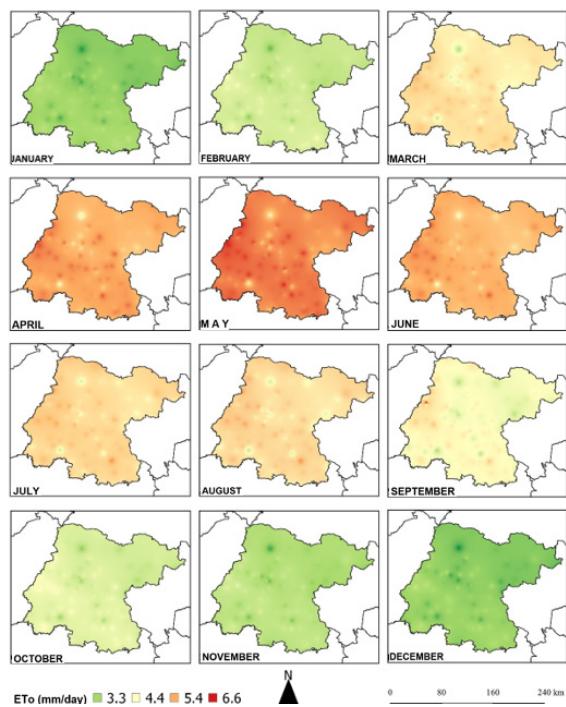
#### Precipitación efectiva

El promedio de las 104 estaciones utilizadas para calcular Pe en la entidad es de 505.12 mm anuales; estadísticamente, dos estaciones registran valores superiores a los 650 mm y otras cuatro están por debajo de los 350 mm. Los valores señalados sugieren que se debe a las condiciones atmosféricas del lugar, ya que el cálculo involucra únicamente la precipitación y, ésta varía por el tipo de clima.

Dado que los valores se interpolaron, al momento de visualizar los mapas correspondientes, estas ci-

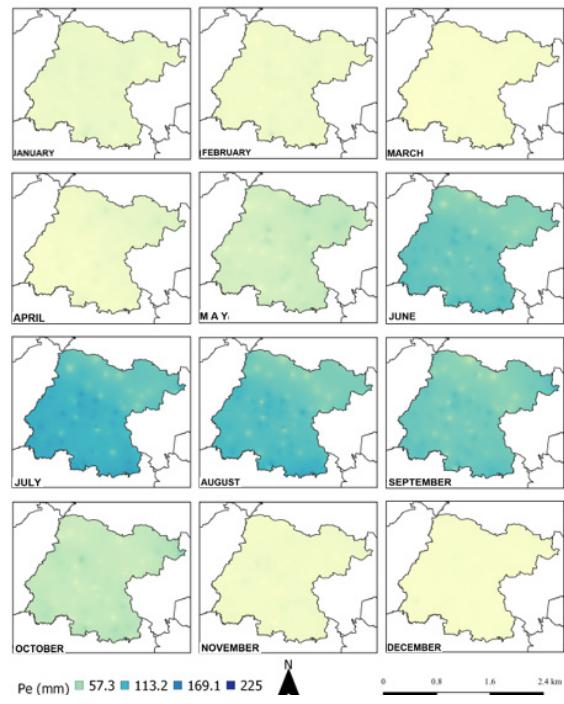
**Figure 3. Monthly distribution of average ETo in Guanajuato.**

**Figura 3. Distribución mensual de ETo promedio en Guanajuato.**



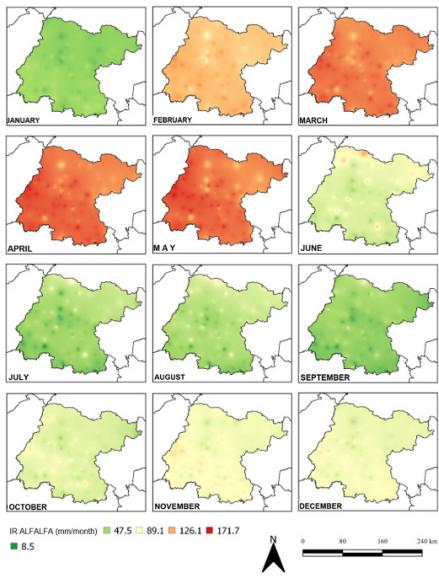
**Figure 4. Spatial distribution of monthly Pe in Guanajuato.**

**Figura 4. Distribución espacial de Pe mensual en Guanajuato.**



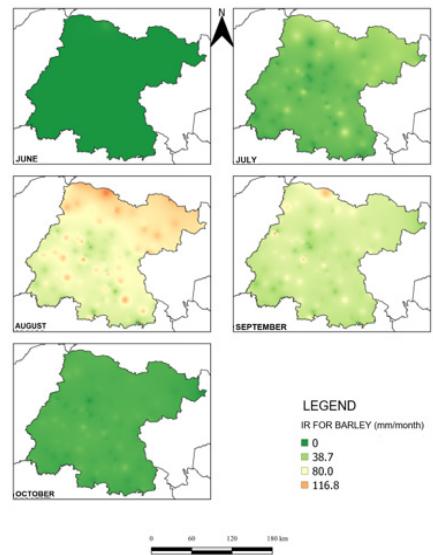
**Figure 5. Spatial Interpolation of Monthly IR for Alfalfa.**

**Figura 5. Interpolación Espacial de RR Mensual para Alfalfa.**



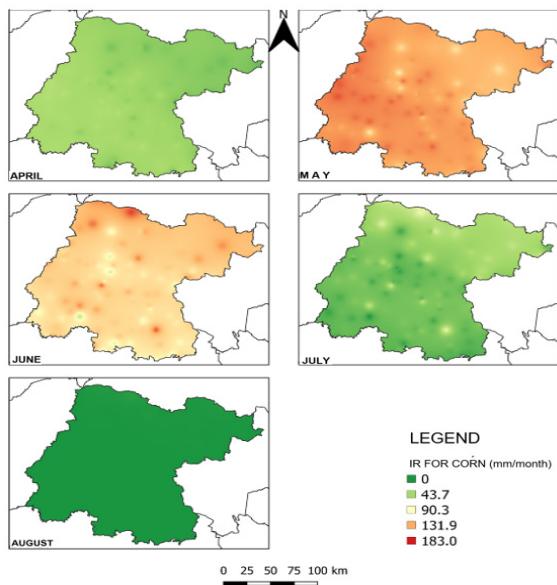
**Figure 6. Spatial Interpolation of Monthly IR for Barley.**

**Figura 6. Interpolación Espacial de RR Mensual para Cebada.**



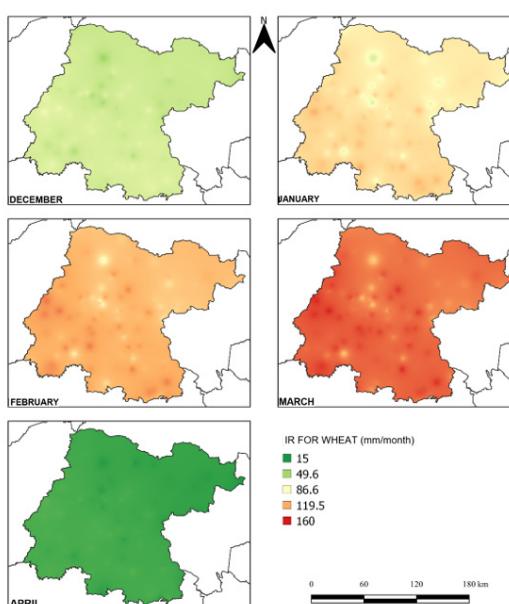
**Figure 7. Spatial Interpolation of Monthly IR for Corn.**

**Figura 7. Interpolación Espacial de RR Mensual para Maíz.**



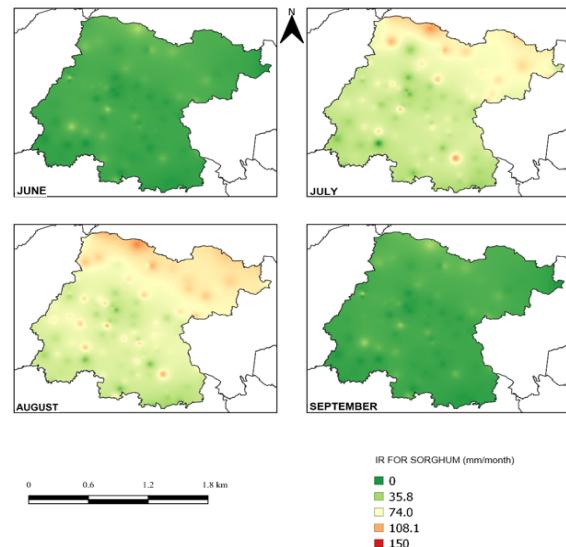
**Figure 9. Spatial Interpolation of Monthly IR for Wheat.**

**Figura 9. Interpolación Espacial de RR Mensual para Trigo.**



**Figure 8. Spatial Interpolation of Monthly IR for Sorghum.**

**Figura 8. Interpolación Espacial de RR Mensual para Sorgo.**



fras impactaron en la continuidad de las superficies generadas, haciendo cambios abruptos, que no son uniformes aun considerando que se están manejando los promedios en el periodo.

#### *Requerimientos de riego*

En primer lugar, la alfalfa por ser un cultivo perenne, se encontró una media de RR de 1 061.66 mm para su primer año de producción. La cebada, maíz, sorgo y trigo requieren de 176.09, 323.2, 136.9 y 445.6 mm por ciclo, respectivamente, véase en las Figuras 5 a 9.

#### *Interpolación espacial*

Vargas et al. (2010) recomiendan utilizar estaciones localizadas fuera de la zona de interés con la finalidad de disminuir la incertidumbre de los datos interpolados en la frontera del estado de Guanajuato. Por lo anterior, en este trabajo se consideraron estaciones en los estados de Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí y Querétaro, ampliando la cantidad de puntos y valores fuera del estado de interés y mejorando la estimación de la interpolación en los extremos. Una vez realizada la interpolación, la operación de "corte" de QGIS eliminó la información espacial no requerida que se encontraba fuera de la zona de estudio.

experience increased evapotranspiration and insufficient effective precipitation to meet the IR. Additionally, because the calculation is for the first year of planting, these months correspond to the crop's peak development of the Kc coefficient, leading to increased plant efforts and higher water requirements.

The IR of barley is significant, with some areas in the northern part of Guanajuato exceeding 218 mm. At the same time, in the central and southern regions, it ranges between 133 and 218 mm per cycle. Figure 6 shows that the irrigation requirement is highest in August in the northern areas of Guanajuato, reaching up to 116 mm, whereas no irrigation is needed in June.

Regarding maize, Figure 7 shows that the highest irrigation is required in May, whereas in August (only the first nine days are considered), the crop's water needs are fully met by precipitation. The crop is in its final development phase and no longer requires significant water input.

For sorghum, which is planted at the beginning of June when the highest precipitation occurs, the northern part of the state requires the most water to adequately meet the crop's water needs (Figure 8). However, irrigation requirements throughout the state are less than 74 mm in June and September.

The highest water demand for wheat occurs in March, as shown in Figure 9. For this crop, the distribution of water needs across Guanajuato is uniform. For instance, in December, low temperatures result in low evapotranspiration rates, allowing the crop to retain the required moisture. In January and February, temperatures remain low, but the crop stages require more water. By April, when the crop is harvested, irrigation is no longer needed.

## Conclusions

The data required to calculate reference evapotranspiration can be found in weather stations. However, in some parts of Mexico, there is insufficient instrumentation to measure all necessary climatological variables, or the stations are not operational, limiting access to this information.

Using the Cropwat methodology and the data processing sequence in QGIS, the irrigation requirements for the five representative crops of Guanajuato were effectively calculated. This generated data can benefit regional producers when planning irrigation

A continuación, se describen los resultados obtenidos para la interpolación espacial. Primeramente, se presenta el mapa generado con la interpolación de la ETo diaria y su promedio de manera mensual. En la Figura 3 se observa cómo va cambiando la evapotranspiración en un rango que varía desde 2.3 a 6.6 mm·día<sup>-1</sup>, donde mayo es el mes donde hay una mayor ETo, seguida por los meses de abril y junio. Esto es consistente con la información climatológica, ya que las mayores temperaturas del año se presentan en estos meses.

En la Figura 4 se observa que la Pe varía desde los 290 mm hasta 887 mm anuales. En la parte norte del estado disminuye la cantidad de precipitación efectiva, estando por debajo de los 432 mm. En los meses de junio, julio, agosto y septiembre se presenta la mayor precipitación; de enero a abril, y en noviembre y diciembre ocurre lo contrario.

Para la distribución espacial del RR mensual de la alfalfa en el estado (Figura 5), se observa que éste es mayor en los meses de marzo, abril y mayo, ya que son los meses donde la evapotranspiración aumenta y no hay suficiente precipitación efectiva que pueda cubrir el requerimiento. Además, ya que el cálculo está hecho para el primer año de siembra, en esos meses es donde el cultivo llega a su punto máximo en el desarrollo del coeficiente Kc, por lo que los esfuerzos de la planta aumentan, requiriendo mayores aportaciones hídricas.

Respecto a la cebada, se observa que su RR es significativo, ya en algunas zonas del norte del estado rebasa los 218 mm, mientras que en la parte centro y sur se mantiene entre los 133 y 218 mm por ciclo. En la Figura 6 se observa que el requerimiento de riego será mayor en el mes de agosto en las zonas localizadas en la parte norte del estado, requiriendo hasta 116 mm, mientras que en junio no es necesario aplicar ningún riego.

En cuanto al maíz, en la Figura 7 permite identificar que en el mes de mayo se requiere una mayor aportación de riego, mientras que en el mes de agosto (solo se consideran los primeros 9 días) el cultivo satisface sus necesidades hídricas con lo aportado por la precipitación. En este punto, el cultivo se encuentra en la etapa final de desarrollo, lo que ya no implica demanda de agua.

Para el cultivo de sorgo, establecido a principios de junio, época donde se presenta la mayor precipita-

schedules because the current study presents net irrigation requirements based on the planting dates recommended by INIFAP experts.

Although the crop coefficients used were derived from Allen et al. (2006), it is recommended that these coefficients be adjusted and calibrated for different regions in Mexico to obtain more representative values and facilitate comparison.

Regarding spatial interpolation, the IDW method was chosen due to its simplicity, especially concerning the input data for the QGIS software, which allowed for a visible and somewhat continuous surface in the spatial distribution of interpolated values. However, this method can produce significant concentrations at specific points where no other sample points are nearby. As Villatoro et al. (2008) noted: "when the spacing is too large, variograms cannot be obtained, making Kriging no longer an option, and comparatively, IDW emerges as a better method."

Finally, the proposed hypothesis proved valid, as the resulting maps show new estimated values from the spatial interpolation, making the irrigation requirements reliable in agricultural regions lacking nearby meteorological stations to perform the necessary calculations for irrigation scheduling.

*End of English version*

---

## References / Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia.
- Arteaga, R. R., Ángeles, M. V., & Vázquez, P. A. (2010). Programa Cropwat para planeación y manejo del recurso hídrico. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, (pp. 179-195).
- Cañada, M., Moreno, J. A., Fernández, F., Gómez, N., Prieto, M., Rodríguez, E. J., & Martínez, P. (2007). Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS.
- Conde, C.; Ferrer, R. M.; Araujo, R.; Gay, C.; Magaña, V.; Pérez, J. L.; Morales, T. y Orozco, S. 1999. El niño y la agricultura. In: Magaña R., V. O. (ed.). Los Impactos de El niño en México. Instituto Nacional de

ción, se observa que en la parte norte del estado es donde se necesita mayor volumen de agua para poder satisfacer de forma correcta las necesidades hídricas del cultivo (Figura 8). Sin embargo, para el mes de junio y septiembre, se observa que, en todo el estado, las necesidades de riego están por debajo de los 74 mm.

En el caso del trigo, el mes con mayor demanda de agua se da en marzo, como se puede ver en la Figura 9. Para este cultivo, la distribución de las necesidades de agua en el estado es uniforme; por ejemplo, en diciembre, al ser un mes con bajas temperaturas, la evapotranspiración no es significativamente alta para dejar sin la humedad requerida al cultivo; en enero y febrero las temperaturas siguen la misma tendencia de diciembre, solo que en estos meses las etapas del cultivo exigen mayor demanda hídrica. En el mes de abril es cuando se cosecha, por lo que ya no se requiere riego.

## Conclusiones

Los datos necesarios para calcular la evapotranspiración de referencia se pueden encontrar en estaciones climatológicas, pero en algunos lugares de México no se cuenta con la suficiente instrumentación para medir todas las variables climatológicas requeridas, o las estaciones no están en funcionamiento, de tal forma que su acceso es limitado.

Con la metodología empleada a través de Cropwat y la secuencia de procesamiento de datos en QGIS, se calcularon efectivamente los requerimientos de riego para los cinco cultivos representativos del estado. Los datos generados pueden beneficiar a los productores de la entidad al momento de programar los riegos que se deben realizar, ya que en la presente investigación se expresan las láminas del requerimiento de riego neto con base en las fechas de siembra que se propusieron de acuerdo a lo recomendado por expertos de INIFAP, aunque los coeficientes de cultivo provienen de Allen et al. (2006), se recomienda hacer un ajuste y calibrar los coeficientes para las regiones de México, con el fin de obtener valores representativos y hacer una comparación.

Respecto a la interpolación espacial, el método IDW fue elegido debido a la simplicidad que éste presenta, sobre todo, en la cuestión de datos de entrada del software QGIS, lo que permitió obtener una superficie visible y ligeramente continua en la distribución

- Ecología, SEMARNAP. México. p. 103–132.
- Díaz, P. G., Sánchez, C. I., Quiroz, R., Garatuza, P. J., Watts, T. C., & Cruz, M. I. (2008). Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México. *Agricultura Técnica en México*, 34(3), 279–287.
- Dressler, K. A., Fassnacht, S. R., Bales, R. C., Davis, R. E., Lampkin, D., & Myers, D. E. (2000). Geostatistical interpolation of point-measured SWE in the Colorado River Basin. *EOS Transactions, American Geophysical Union, Fall Meet. Suppl.*, 81(48), F397.
- FAO. (2014). AQUASTAT Perfil de País - México. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, Italia.
- FAO. (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, y Mundiprensa, Madrid.
- Ferreira, G. A. (2005). Técnicas de interpolación espacial utilizadas en la evaluación de reservas geológicas. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Recuperado el 5 de febrero de 2020 de [http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-1500/UCH1803\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-1500/UCH1803_01.pdf)
- Hernández, C. M. (2013). Estimación de la evapotranspiración de referencia en regiones con datos limitados. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de México, México.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2019). Recuperado de <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM11guanajuato/mediofisico.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA 2017). Conociendo el campo de México, Resultados. Conferencia de Prensa 25 de Julio del 2018.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2017). Agenda Técnica Agrícola de Guanajuato. Ciudad de México.
- Jiménez, C. B., Torregrosa, A. M., & Aboites, A. L. (2010). El agua en México: Cauces y encauces. México.
- León, M. B., Robles, R. B., Ángeles, H. J., Ángeles, M. V.,

espacial de los valores interpolados. No obstante, este método genera concentraciones significativamente fuertes en puntos específicos al no encontrarse cerca otros puntos muestrales. También, tal como lo señala Villatoro et al. (2008): "cuando el distanciamiento es muy grande, los variogramas no son posibles de obtener, entonces el Kriging deja de ser una opción y comparativamente el IDW se perfila como un mejor método".

Finalmente, la hipótesis planteada demostró ser válida, ya que en los mapas obtenidos se aprecia la presencia de nuevos valores estimados a partir de la interpolación espacial, de forma que los requerimientos de riego se pueden considerar confiables en las regiones agrícolas donde no se cuenta con estaciones meteorológicas cercanas que permitan realizar los cálculos pertinentes para la programación de riego.

*Fin de la versión en español*

- 
- Arteaga, T. R., Arroyo, C. V., & Sánchez, C. I. (2007). Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos.
- Miranda, S. M., & Condal, R. A. (2003). Importancia del análisis estadístico exploratorio en el proceso de interpolación espacial: caso de estudio Reserva Forestal Valdivia. *Bosque (Valdivia)*, 24(2), 29-42.
- Ojeda, B. W., & Flores, V. J. (2015). Calendarización de riego: Teoría y práctica (2da ed.). México, Morelos.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2017). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). Recuperado el 16 de diciembre de 2020 de <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-24-irrigated-land/>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). Datos abiertos: Estadística de producción agrícola de 2018. Recuperado de <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2019). Guanajuato infografía agroalimentaria. Recuperado de [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2019/Guanajuato-Infografia-Agroalimentaria-2019](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2019/Guanajuato-Infografia-Agroalimentaria-2019)
- Shelestov, A. Y., Kravchenko, A. N., Skakun, S. V., Voloshin, S. V., & Kussul, N. N. (2013). Geospatial information system for agricultural monitoring. *Cybernetics and Systems Analysis*. <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9492-5>
- Torres, L. M., Fernández, G. E., & Reyes, T. M. (2018). Historia, identidad y estrategia de desarrollo del Distrito de Riego 011, Alto Lerma, Guanajuato. V Congreso de la Red-Issa: Agua, Ciudades y poder. Universidad de Guanajuato. Recuperado de <https://redissa.files.wordpress.com/2018/04/historia-identidad-y-estrategia-de-desarrollo-del-distrito-de-riego-011-alto-lerma-guanajuato.pdf>
- Vargas, A., Santos, A., Cárdenas, E., & Obregón, N. (2010). Análisis de la distribución e interpolación de las lluvias en Bogotá, Colombia. *Dyna*, 167(78), 151-159. Recuperado el 3 de febrero de 2020 de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49622358017>
- Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de Ph, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*. Recuperado de <http://repositorio.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/13843/6773-9341-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>