



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

**ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA DE HIGO (*Ficus carica* L.), EN LOS
ESTADOS DE JALISCO Y PUEBLA**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

PRESENTA

ESTEBAN PARRA ORTUÑO

DIRECTOR DE TESIS

DR. LUIS ANTONIO DOMÍNGUEZ PERALES

CO DIRECTOR

ING. MANUEL OMAR ALEJANDRO ROSAS TAPIA

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Mayo de 2021



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

**ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA DE HIGO (*Ficus carica* L.), EN LOS
ESTADOS DE JALISCO Y PUEBLA**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

PRESENTA

ESTEBAN PARRA ORTUÑO

DIRECTOR DE TESIS

DR. LUIS ANTONIO DOMÍNGUEZ PERALES

CO DIRECTOR

ING. MANUEL OMAR ALEJANDRO ROSAS TAPIA

ASESORES

DR. JUAN MANUEL BARRIOS DÍAZ

DR. SIGFRIDO DAVID MORALES FERNÁNDEZ

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Mayo de 2021

La presente tesis titulada: **Zonificación agroclimática de higo (*Ficus carica* L.), en los estados de Jalisco y Puebla** y realizada por **Esteban Parra Ortuño**, ha sido revisada y aprobada por el siguiente consejo particular, para obtener el Título de:

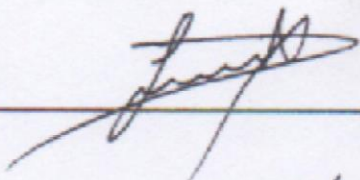
LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias

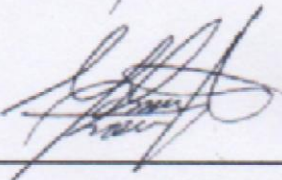
Consejo Particular integrado por:

Firma

Director: Dr. Luis Antonio Domínguez Perales



Co Director: Ing. Manuel Omar Alejandro Rosas
Tapia



Asesor: Dr. Juan Manuel Barrios Díaz



Asesor: Dr. Sigfrido David Morales Fernández



San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Mayo de 2021

El presente trabajo forma parte del Cuerpo Académico denominado: **Agrobiotecnología y Recursos Naturales** y de la Línea de Investigación: **Biotecnología, Conservación y Protección Vegetal** de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica. Dicho trabajo, fue financiado con recursos propios.

DEDICATORIA

A Dios

A ti ser supremo, que cuidas de la gente que quiero y también de mí, que a pesar de todo lo sucedido siempre estuviste ahí para mostrarnos luz y amor, que por tu voluntad has puesto en mi camino personas que tienen un propósito en mi vida y en mi misión en este mundo, que gracias a ti tengo salud y también la tienen las personas más importantes de mi vida y sobre todo por haberme otorgado a la mejor mamá del mundo.

A mi madre

A ti mamá, que me has otorgado la vida y la oportunidad de estar en este mundo, que con tu esfuerzo, orientación, disciplina y enseñanza soy lo que soy, que me has demostrado que se puede seguir adelante a pesar de las adversidades que la vida llega a imponer, que eres mi motor para seguir adelante si algún día llego a caer, por todo lo anterior y muchas razones más, eres mi más grande tesoro. ¡GRACIAS MAMÁ!

A mis hermanas

A ustedes por su paciencia, amor, cariño y apoyo incondicional hacia mí.

A mis abuelos

A ustedes Justina, María†, Antonio† y Maurilio† por haberme transmitido todas sus vivencias, enseñanzas y experiencias cuando más lo necesité. Sé que me acompañan y cuidan de mí en todo momento.

A Lesly

A ti, que siempre estuviste ahí para darme ánimos y motivarme a no rendirme, a ti que siempre permaneciste ahí en mis altibajos y me ayudaste a lidiar con ellos. A ti que creíste en mí cuando nadie más lo hizo, a ti por ayudarme a dar la mejor versión de mí, que por tu ánimo he logrado muchas cosas, a ti por compartir conmigo tantos momentos, por todo lo anterior y muchas más razones eres lo que más quiero.

A todas aquellas personas que hoy se encuentran al frente de batalla ante Covid-19, a todas aquellas personas que se encuentran luchando para vencer esta terrible enfermedad, a todas aquellas personas que lamentablemente no pudieron vencer este terrible mal y a todas aquellas personas que nos pudimos recuperar. En tiempos difíciles, la esperanza es lo que nunca se debe de perder.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por haberme dado la oportunidad de llegar a esta etapa tan importante de mi vida, rodeado de la gente que más quiero y estimo y sobre todo por tener salud ante la crisis mundial sanitaria que actualmente se vive.

A la facultad de ciencias agrícolas y pecuarias

Por ser mi segundo hogar por tantos años y por haberme permitido realizar mi formación universitaria y profesional.

Al Dr. Luis Antonio Domínguez Perales

Por haberme guiado y apoyado durante el trayecto de este trabajo, por compartir conmigo todos sus conocimientos, experiencias, anécdotas y demás. Gracias por todo su tiempo, por su amistad y dedicación que me otorgó en cada momento.

Al Dr. Sigfrido David Morales Fernández

Por su colaboración en este proyecto, por guiarme y aconsejarme cuando más lo necesité y por todas aquellas experiencias compartidas conmigo.

Al Dr. Juan Manuel Barrios Díaz

Por su colaboración en este proyecto, por compartir conmigo todos sus conocimientos, así como sus anécdotas y experiencias únicas en el ámbito profesional y laboral.

Al Ing. Manuel Omar Alejandro Rosas Tapia

Por su colaboración en este proyecto, por compartir todos aquellos conocimientos, experiencias y relatos en cada trayecto del proyecto.

A Verónica, Omar y José Juan

Por haberme permitido iniciar en el ámbito laboral y profesional, por creer en mí y por compartir muchos momentos que me ayudaron a crecer y a madurar.

A la generación 2015

Por haber compartido tantas risas, tristezas, salidas, ocurrencias, eventos, viajes, discusiones y demás; que de alguna manera influyeron en mi formación tanto académica como personal. Me quedo con lo bueno de cada compañero y con aquellas amistades que durarán toda una vida.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRAC	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
III. HIPÓTESIS	5
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	6
4.1 Origen de la higuera.....	6
4.2 Distribución geográfica mundial.....	6
4.3 Producción de higo en el mundo	6
4.3.1 Épocas de producción de los diferentes países productores	7
4.4 El higo en México.....	7
4.5 Descripción taxonómica	8
4.6 Descripción botánica	9
4.6.1 Raíz	9
4.6.2 Tallo o tronco	9
4.6.3 Ramas	9
4.6.4 Yemas.....	10
4.6.5 Hojas	10
4.6.6 Flores	10
4.6.7 Fruto	11

4.7 Tipos de higuera	11
4.7.1 Higueras hembra o domesticas	12
4.7.2 Higueras tipo San Pedro	12
4.7.3 Higueras tipo Esmirna	12
4.7.4 Higueras macho o cabrahigueras	12
4.8 Variedades de higo en México	12
4.9 Producción de higo en México	13
4.10 Ecofisiología de frutales	15
4.11 Requerimientos agroclimáticos	16
4.11.1 Clima	16
4.12 Requerimientos edafológicos	19
4.13 Requerimientos hídricos	19
4.13.1 Calidad del agua	20
4.13.2 Riego	21
4.14 Definición de zonificación agroecológica	22
4.15 Antecedentes de zonificación	22
4.16 Zonificación agroecológica en México	23
4.17 Aplicación de SIG como herramienta para zonificación	24
4.18 Técnicas de análisis espacial	25
4.18.1 Método IDW	26
4.18.2 Método Kriging	26
4.18.3 Método Spline	27
4.19 Uso del método kriging para el análisis espacial de variables	27
V. MATERIALES Y MÉTODOS	29
5.1 Área de estudio	29

5.1.1 Jalisco.....	29
5.1.2 Puebla	29
5.2 Selección y requerimientos bioclimáticos del cultivo de higo	30
5.3 Inventario climático.....	31
5.3.1 Divisiones climáticas mayores	31
5.3.2 Periodo de crecimiento	31
5.3.3 Periodo libre de heladas	32
5.4 Programas de cómputo en la manipulación climatológica y cartográfica	32
5.4.1 Extractor rápido de información climatológica ERIC III.....	32
5.4.2 Elaboración y representación cartografía con ArcGis.....	33
5.5 Selección del método de interpolación para análisis espacial.....	33
5.6 Homogeneización de series climatológicas	33
5.6.1 Población	34
5.6.2 Muestra aleatoria.....	34
5.7 Selección de las estaciones meteorológicas	34
5.8 Base de datos	36
5.9 Elaboración cartográfica	38
5.9.1 Modelo digital de elevación DEM	38
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
6.1 Zonificación del estado de Jalisco para el cultivo de higo	39
6.1.1 Regiones administrativas	39
6.1.2 Temperaturas.....	39
6.1.3 Precipitaciones	39
6.1.4 Delimitación de zonas.....	39
6.1.5 Periodo de crecimiento.....	42

6.1.6 Periodo libre de heladas	42
6.2 Zonificación del estado de Puebla para el cultivo de higo	44
6.2.1 Regiones administrativas	44
6.2.2 Temperaturas	44
6.2.3 Precipitaciones	44
6.2.4 Delimitación de zonas	45
6.2.5 Periodo de crecimiento	47
6.2.6 Periodo libre de heladas	47
6.3 Épocas de establecimiento, desarrollo, cosecha y podas	51
6.3.1 Plantación o establecimiento	52
6.3.2 Crecimiento vegetativo	52
6.3.3 Diferenciación del cultivo	52
6.3.4 Producción	52
6.3.5 Podas	52
VII. CONCLUSIONES	53
VIII. LITERATURA CITADA	54
IX. ANEXOS	60
9.1 Jalisco	60
9.2 Puebla	68

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Página
Cuadro 1. Principales países productores de higo.....	6
Cuadro 2. Descripción taxonómica de la higuera.....	8
Cuadro 3. Tipos de climas para el cultivo de la higuera.	18
Cuadro 4. Temperaturas óptimas para el desarrollo de la higuera.....	19
Cuadro 5. Porcentaje de reducción del rendimiento en función de la ce del suelo.	19
Cuadro 6. Rangos de precipitación óptimas para la higuera.	20
Cuadro 7. Porcentaje de reducción del rendimiento en función de la ce del agua de riego.	20
Cuadro 8. Coeficiente de cultivo Kc de la higuera.	21
Cuadro 9. Relación área sombreada y Kc de la higuera.....	21
Cuadro 10. Zonificación de cultivos a nivel mundial.	22
Cuadro 11. Zonificación agroecológica de cultivos a nivel nacional.....	23
Cuadro 12. Variables climáticas a evaluar.....	30
Cuadro 13. Variables ambientales seleccionadas para zonificación.....	31
Cuadro 14. Variables climatológicas descritas en ERIC III.....	32
Cuadro 15. Número mínimo de años para la obtención de distribuciones de frecuencias estables.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1. Estacionalidad de la fruta de higo en los diferentes países productores.....	7
Figura 2. Infrutescencia de higuera variedad ‘Black Mission’.....	11
Figura 3. Infrutescencia de higuera variedad ‘Brown Turkey’.....	13
Figura 4. Evolución de la producción de higo en México periodo 2003-2019.....	14
Figura 5. Evolución de la superficie cosechada de higo en México periodo 2003-2019. ...	14
Figura 6. Rendimiento promedio de higo por estado periodo 2003-2019.	15
Figura 7. Localización geográfica del estado de Jalisco.....	29
Figura 8. Localización geográfica del estado de Puebla.	30
Figura 9. Identificación de estaciones meteorológicas suspendidas y en operación.....	35
Figura 10. Estación 14310 Ayutla Jalisco.....	36
Figura 11. Estación 14368 Usmajac Jalisco.	36
Figura 12. Base de datos en excel 2016.	37
Figura 13. Vista previa del continuo de elevaciones mexicano.....	38

RESUMEN

Con la finalidad de identificar y delimitar zonas idóneas para el establecimiento de higo (*Ficus carica* L.) en los estados de Jalisco y Puebla, se utilizaron y analizaron series climatológicas históricas que se reportan en el extractor rápido de información climatológica (ERIC III), software desarrollado por el instituto mexicano de tecnología del agua (IMTA), datos que sirvieron para delimitación de zonas no aptas, moderadamente aptas y aptas para el cultivo de la higuera. Para ello se utilizó un sistema de información geográfica, el cual permitió llevar a cabo la manipulación de grandes cantidades de información geográfica georreferenciada para su posterior procesamiento, para este caso el software utilizado para dicho análisis fue ArcGis 10.4. Así pues, se utilizaron datos mensuales de temperaturas máximas, medias, mínimas, precipitaciones y sus promedios de cada estación meteorológica seleccionada con un registro mínimo de 10 años para su posterior interpolación mediante el método kriging. Una vez obtenidos los rásters, se convirtieron a formato vectorial (polígonos), así mismo se obtuvieron datos de elevación proporcionados por continuo de elevaciones mexicano, dicho ráster también fue convertido a formato vectorial para que finalmente se llevara a cabo la superposición combinada de capas para la delimitación final deseada. Los resultados de la identificación y delimitación muestran que para el estado de Jalisco las zonas no aptas representan un 43 % de la superficie, zonas moderadamente aptas un 41 % de la superficie y zonas aptas un 16 % de la superficie estatal total. Para el estado de Puebla los resultados indican que zonas no aptas ocupan un 61 % de la superficie, zonas moderadamente aptas un 35 % de la superficie y zonas aptas solamente un 4 % de la superficie total de la entidad. Con la identificación y delimitación de estas zonas constituye y proporciona una herramienta útil para futuros proyectos relacionados al establecimiento y producción del cultivo, para una mejor planeación en el ciclo productivo del frutal o para llevar a cabo otras delimitaciones agroclimáticas en demás entidades federativas del país.

Palabras clave: *Ficus carica* L., zonificación agroclimática, arcgis, Jalisco, Puebla.

ABSTRAC

In order to identify and delimit suitable zones for fig (*Ficus carica* L.) establishment in the states of Jalisco and Puebla, we used and analyzed historical climatological series reported in the rapid extractor of climatological information (ERIC III), software developed by the Mexican Institute of Water Technology (IMTA), data that were used to delimit unsuitable, moderately suitable and suitable zones for fig tree cultivation. For this purpose, a geographic information system was used, which allowed the manipulation of large amounts of georeferenced geographic information for subsequent processing; in this case, the software used for this analysis was ArcGis 10.4. Thus, monthly data on maximum, average and minimum temperatures, precipitation and their averages from each selected meteorological station with a minimum 10 year record were used for subsequent interpolation using the kriging method. Once the rasters were obtained, they were converted to vector format (polygons), as well as elevation data provided by mexican elevation continuum, this raster was also converted to vector format to finally carry out the combined superimposition of layers for the desired final delimitation. The results of the identification and delimitation show that for the state of Jalisco, unsuitable areas represent 43% of the surface, moderately suitable areas 41% of the surface and suitable areas 16% of the total state surface. For the state of Puebla, the results indicate that unsuitable zones occupy 61% of the area, moderately suitable zones 35% of the area and suitable zones only 4% of the total area of the state. The identification and delimitation of these zones constitutes and provides a useful tool for future projects related to the establishment and production of the crop, for a better planning in the productive cycle of the fruit tree or to carry out other agroclimatic delimitations in other states of the country.

Key words: *Ficus carica* L., agroclimatic zoning, arcgis, Jalisco, Puebla.

I. INTRODUCCIÓN

El higo (*Ficus carica* L.) es la primera planta cultivada en el mundo, precediendo a la domesticación de los cereales. Puede decirse que es un frutal tan antiguo que son quizá mayor número de las referencias históricas a la especie que las científicas (Krislev, 2006). Hace unos 10,000 años que la higuera es importante en la región mediterránea, apreciada y cultivada por distintas civilizaciones, siendo los fenicios, griegos y romanos los que contribuyeron a su difusión por los países ribereños del Mediterráneo y del Adriático, ya que sus frutos eran considerados fundamentales para la alimentación de estas poblaciones (Melgarejo, 1999).

En la actualidad, los principales países productores se localizan en la cuenca del Mediterráneo y su cultivo se ha establecido con éxito en lugares tan distantes como Estados Unidos, Brasil, China, Sudáfrica, Japón y México (López-Corrales, 2014).

En México la superficie de producción se encuentra en 12 estados de la república, siendo Baja California Sur, Morelos, Puebla y Veracruz los estados con mayor superficie plantada y cosechada. Actualmente Morelos es el principal estado productor de higo en México (SIAP-SIACON, 2019).

En la actualidad el principal sistema de producción de higo es establecido a campo abierto, y se caracteriza por plantaciones de edad avanzada, suelos con bajos niveles nutrimentales, precipitaciones erráticas y mal distribuidas, heladas durante los ciclos de producción y cosecha, además de un escaso o nulo manejo agronómico (Morgado-Gonzales *et al.*, 2018).

La higuera se cultiva tradicional y fundamentalmente en secano, por lo que el clima es el principal factor que condiciona el crecimiento y desarrollo de la planta, así como del fruto (Melgarejo, 1999). Los elementos del clima tales como la temperatura, precipitación, heladas, humedad relativa y radiación solar tienen una influencia definitiva sobre el rendimiento de la higuera, ya que afectan el crecimiento de la planta y los procesos fisiológicos relacionados con la formación del fruto (Rajashree *et al.*, 2005).

El clima es el factor principal que determina la salida del reposo o el crecimiento de la planta, por lo que resulta necesario realizar en cada región climática estudios necesarios que permitan vislumbrar con cierta fiabilidad el efecto de la temperatura y de otras variables, que generalmente no son consideradas, y también influyen sobre la salida del reposo y en el crecimiento (Melgarejo, 1999). Mediante el uso de sistemas de información geográfica, es posible agrupar los principales factores ambientales y sus interacciones, y así definir las regiones con mayor aptitud para el desarrollo y aprovechamiento de especies vegetales (Anguiano-Contreras *et al.*, 2003).

Las regiones óptimas para el desarrollo de un cultivo se le denomina zonificación agroecológica (ZAE), y se refiere a la división de la superficie de la tierra y el clima en áreas medianamente aptas, aptas y muy aptas para un determinado cultivo con base en combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas principalmente (FAO, 1997).

Uno de los principales objetivos de la zonificación agroclimática es la identificación y delimitación de ambientes homogéneos desde la perspectiva de un cultivo en particular, proporcionando así la base para la planificación del uso de la tierra, la agronomía y la identificación de desafíos de carácter ambiental (García-Barreda *et al.*, 2019). Martínez *et al.*, (2016) expresa que la zonificación agroclimática del territorio constituye una estrategia de gestión de riesgos y que a la vez guía la implementación de medidas de prevención y adaptación ante condiciones climáticas adversas. También hace mención de que es una herramienta clave para determinar el potencial agrícola, la planificación territorial y el manejo del suelo en las áreas de producción agrícola.

Actualmente no existen estudios relacionados, ni se dispone de una zonificación agroclimática sistemática de *Ficus carica* L. para los estados de Jalisco y Puebla o cualquier otra región de México.

El auge que presenta el cultivo en el país y la creciente demanda nacional e internacional ha despertado el interés por parte de productores, agro inversionistas, industrias de alimentos y demás en este peculiar e innovador cultivo. Es por ello que nace el interés de conocer las zonas

aptas y potenciales para el establecimiento y producción del cultivo, así pues, en el occidente del país; particularmente en el estado de Jalisco han comenzado a establecerse las primeras plantaciones comerciales con producciones destinadas a la exportación por lo que la expansión y crecimiento de la industria del higo será inminente en los siguientes años.

Por otra parte, el estado de Puebla es uno de los principales estados productores, aunado a la diversidad de ecosistemas, topografía y tipos de climas, hacen posible el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo. Por lo que se tiene el interés de identificar las áreas óptimas y potenciales para higo. Por lo anterior el presente estudio tiene como objetivo definir las áreas óptimas y potenciales, así como la generación de mapas en donde se identifiquen las zonas agroclimáticas aptas para el establecimiento del cultivo de higo en los estados de Jalisco y Puebla.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Determinar las zonas con mayor aptitud agroclimática para establecer el cultivo de higo (*Ficus carica* L.), en los estados de Jalisco y Puebla.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar a partir del análisis de las condiciones climáticas (precipitación, temperaturas, altura sobre el nivel del mar) zonas potenciales para el cultivo de higo.
- Analizar factores agroclimáticos para planificar épocas de establecimiento, podas, producción y cosecha.
- Generar un mapeo detallado de las zonas altamente potenciales y aptas para el cultivo de higo en los estados de Jalisco y Puebla.

III. HIPÓTESIS

Es posible identificar áreas idóneas para el cultivo de higo en los estados de Jalisco y Puebla, mediante el análisis de variables agroclimáticas y las necesidades del cultivo.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Origen de la higuera

La higuera (*Ficus carica* L.) es una especie frutal perteneciente a la familia Moraceae, que agrupa a más de 40 géneros, siendo el género *Ficus* el de mayor importancia. Comprende aproximadamente 750 especies distribuidas en su mayoría en las regiones tropicales y subtropicales del planeta (Watson, 2004).

Esta especie ha sido considerada como originaria de Asia menor y la región mediterránea. En el mediterráneo el higo se cultiva desde el año 5000 a.C (Hanelt *et al.*, 2001). Si bien estudios recientes demuestran que *Ficus carica* evolucionó a partir de *Ficus carica var. rupestris*, que se extendió por orillas del mar mediterráneo antes de ser domesticada, existiendo varios puntos simultáneos de selección en dicha área, entre los que se encuentran la Península Ibérica y las Islas Baleares (Khadari, 2009).

4.2 Distribución geográfica mundial

La higuera fue uno de los primeros frutales cultivados en la región del mediterráneo. Turquía, Israel, Arabia Saudita y Siria son los hábitats naturales de la planta, desde allí fue trasladado al norte de África a países como Marruecos, Argelia, Egipto y Túnez. Fue por medio de los romanos y árabes que el frutal llegó a España, Italia, Grecia, Portugal, Croacia y a regiones de Asia menor como India, Irán e Irak. Conforme se llevaba la conquista del nuevo mundo el higo llegó por primera vez la Nueva España en 1520 distribuyéndose así por medio de los españoles a países de Sudamérica como Chile, Perú, Argentina y a Norteamérica específicamente en California (Janick, 2005).

4.3 Producción de higo en el mundo

Según FAOSTAT (2019), los principales países productores de higo son Turquía con 310,000 toneladas anuales seguido por Egipto con 225,295 toneladas, Marruecos con 153,472 toneladas, Irán con 130,328 toneladas y Argelia con 114,092 toneladas. En el cuadro 1 se presentan los 10 principales países productores a nivel mundial.

Cuadro 1. Principales países productores de higo.

País	Producción total (Ton)
Turquía	310,000
Egipto	225,295
Marruecos	153,472

Irán	130,328
Argelia	114,092
España	51,600
República Árabe Siria	43,015
Estados Unidos de América	28,174
Túnez	24,619
Afganistán	24,319

4.3.1 Épocas de producción de los diferentes países productores

Tridge es una plataforma de comercio global líder en productos alimenticios potencializada por la tecnología digital. Recopila y analiza información de productos y mercados de todo el mundo, que incluye precios al menudeo y al mayoreo, estacionalidad de los alimentos, volumen comercial, exportaciones, entre otros temas relacionados, con el fin de ubicar al proveedor más adecuado. Según Tridge (2021) la estacionalidad de higo (épocas de producción) son las que se presentan en la Figura 1.

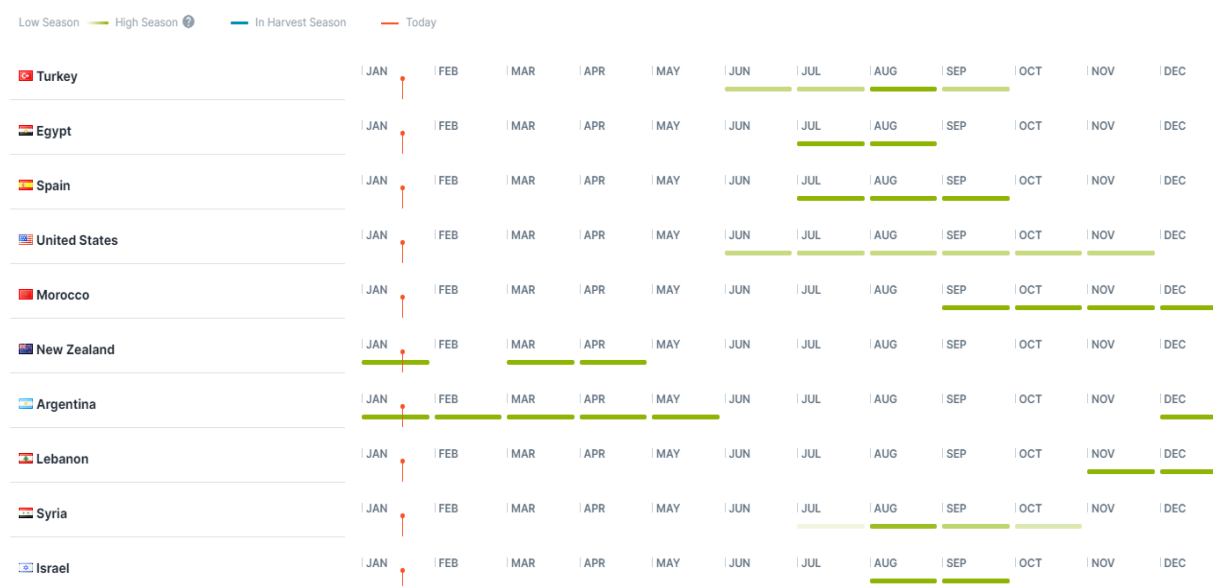


Figura 1. Estacionalidad de la fruta de higo en los diferentes países productores.

4.4 El higo en México

La higuera fue introducida por primera vez en América en 1560 por exploradores españoles en México (Morton, 1987). No fue hasta 1680 que misioneros españoles durante el proceso de evangelización de la nueva España que distribuyeron plantas de higuera en los

estados de Hidalgo, Guanajuato, Morelos, San Luis Potosí y Zacatecas estableciéndolas en los atrios de las iglesias de dichos estados. En 1770 se introdujeron a California desde México por los mismos misioneros. Hoy en día el higo se encuentra distribuido en muchas partes del país en climas cálidos, templados, secos, entre otros (Storey *et al.*, 1985).

4.5 Descripción taxonómica

El higo comestible es un miembro de la familia de las moráceas, que consta de unos 40 géneros y 2000 especies de árboles, arbustos, lianas o raramente hierbas, casi todas con savia lechosa y principalmente de origen tropical o subtropical (Whistler, 2000). La higuera es claramente de gran importancia como fuente de alimento humano y la única especie *Ficus* cultivada por su fruto (Ferguson *et al.*, 1990). Los botánicos discrepan sustancialmente con respecto a la caracterización de las especies *Ficus*, pero se ha informado que el número de especies oscila entre 600 a 2000. Los miembros de este género son difíciles de distinguir entre sí, pero se pueden diferenciar por habito, por la forma de la hoja o simplemente por la forma de la infrutescencia (Whistler, 2000).

El número de cromosomas y la morfología en el género *Ficus* han sido estudiados principalmente por Condit (1955), quien afirma que los cromosomas de las diversas especies de higueras son similares en apariencia; su número somático es $2n = 26$ el cual aplica para todas las especies de higos. En el cuadro 2 se presenta la clasificación taxonómica propuesta por Melgarejo (1999).

Cuadro 2. Descripción taxonómica de la higuera.

División:	Fanerógamas
Subdivisión:	Angiospermas
Subclase:	Arquiclamídeas
Orden:	Urticales
Familia:	Moráceas
Genero:	Ficus
Especie:	Carica
Nombre científico: <i>Ficus carica</i> L.	

4.6 Descripción botánica

La higuera es un cultivo típico de secano en los países mediterráneos. Son árboles o arbustos de madera blanda, de hojas grandes, verdes y brillantes por el haz y grises y ásperas por el envés (García, 2011). El color de su madera cuando es adulta es gris claro, presentando tronco y ramas de gran diámetro, de corteza fina y sin rugosidades. Su savia recibe el nombre de leche, debido a su color; es amarga y astringente. Este látex es típico del género *Ficus* al que pertenece y se espesa al entrar en contacto con el aire. Es un árbol de hoja caduca, en el área mediterránea (Melgarejo, 1999).

4.6.1 Raíz

La higuera tiene un sistema de raíces fibrosas que se extiende hasta tres veces el diámetro del dosel (Flaishman *et al.*, 2008). Su sistema radicular es muy potente y fasciculado, no predominando ninguna raíz principal; carece de raíz pivotante. Las raíces principales son muy abultadas y superficiales, se abren con facilidad. En los suelos donde no se riega explora profundidades mayores en busca de la humedad del subsuelo, mientras que cuando se cultiva y se riega, su sistema radicular es más bien superficial. La facilidad de la raíz de poder explorar grandes superficies y profundidades es lo que le ha permitido a la especie soportar y adaptarse a largos periodos de sequía a los que frecuentemente se ve sometida en muchas regiones del mundo. Es capaz incluso de sobrevivir en grietas de rocas a las que poco a poco va agrietando durante su crecimiento. Esta característica le permite adaptarse a los peores suelos como lo son los salinos, semidesérticos, calizos, pedregosos y pobres (Melgarejo, 1999). La extrema facilidad de enraizamiento de los higos ha facilitado el cultivo durante miles de años y se utiliza habitualmente para establecer nuevos huertos a partir de esquejes (Flaishman *et al.*, 2008).

4.6.2 Tallo o tronco

Por su tendencia basítona y a formarse como arbusto rastrero incluso, frente a algunas condiciones adversas, su tronco suele ser corto y, en condiciones naturales, suele formar varios tallos que nacen desde la inserción del tronco con las raíces. Éstos, aunque al principio crecen como chupones, verticalmente, se ramifican con facilidad; los chupones deben eliminarse en la época de reposo invernal para favorecer el desarrollo del resto del árbol (Melgarejo, 1999).

4.6.3 Ramas

Las ramas primarias de la higuera no suelen ser muy numerosas y son glabras, lisas y de color grisáceo, tienen una fuerte dominancia apical ascendente, pero debido a su poca densidad

suelen arquearse dejando una forma de doble curva sigmoide. Sus ramificaciones secundarias son muy variables, de madera de poca densidad y engrosamiento anual visible, tienen tendencia a crecer en forma de arco, con el ápice creciendo hacia arriba. Esta característica de crecimiento, unida al hecho de que la rama, en grosor y longitud, no es proporcional, hace que las ramas se vayan inclinando hacia el suelo (Costa, 2019).

4.6.4 Yemas

Las yemas de la higuera son terminales y axilares (Melgarejo, 1999). Cada yema terminal generalmente contiene cuatro o cinco hojas primordiales flanqueadas a cada lado por una escama (Flaishman *et al.*, 2008), este tipo de yemas son vegetativas principalmente (Melgarejo, 1999). Las yemas axilares están presentes en la base de las hojas en donde se tiene un primordio vegetativo y dos inflorescencias (Flaishman *et al.*, 2008). Melgarejo (1999) menciona que la yema de inflorescencia originará en su desarrollo un sicono (falso fruto), mientras que la vegetativa dará lugar a una rama mixta (provisto de nuevas yemas vegetativas y de inflorescencia, en las axilas de las hojas, y de una yema terminal vegetativa).

4.6.5 Hojas

La higuera tiene hojas típicas de color verde brillante, individuales, alternas y grandes. Los caracteres de las hojas son bastante estables y sirven como un parámetro importante en la identificación de variedades (Ferguson *et al.*, 1990). Tienen cinco lóbulos más grandes y dos más pequeños, de color verde pálido cuando no están completamente expandidos y de color oscuro cuando están completamente expandidos (Leonel, 2011). En plantas cultivadas en invernadero las hojas alcanzan tamaños extraordinarios, pudiendo superar los 40 cm de longitud y de anchura (Melgarejo, 1999). Las hojas inician su desarrollo a principios de primavera y continuarán formando hojas nuevas hasta que la temperatura descienda en otoño. Hacia el final de la temporada de crecimiento, las condiciones ambientales como bajas temperaturas, fotoperiodo, viento, lluvia, entre otros factores provocan la caída de hojas (Flaishman *et al.*, 2008).

4.6.6 Flores

Las flores de la higuera son unisexuales, muy pequeñas, pediceladas, apétalas, hipóginas, y con un perianto dividido en cinco partes. Se encuentran dentro de un receptáculo carnoso que se llama sicono, insertas en las paredes internas del mismo (Costa, 2019). Según Melgarejo (1999) dependiendo la variedad de la higuera se pueden encontrar sólo flores femeninas, sólo

flores masculinas o ambos tipos de flores. Las flores masculinas sólo pueden verse cuando el sicono ya está maduro, cuando se abren las brácteas del ostiolo; las femeninas, situadas más hacia el interior no pueden verse si no hasta seccionar el sicono.

4.6.7 Fruto

El fruto de la higuera no es un higo, ni una breva, es un aquenio. Un fruto seco indehiscente (no se abre espontáneamente para liberar su semilla), que contiene una sola semilla cuya envoltura externa no está soldada a la misma. Lo que se conoce como fruto (higo o breva) es en realidad un receptáculo carnoso y dulce, denominado sicono, que contiene numerosas flores dirigidas hacia el centro (inflorescencia) (Figura 2). Todas estas flores sufren una transformación volviéndose sus periantios y pedicelos carnosos y dulces; en esos periantios se hallan aquenios (verdaderos frutos), formando todos ellos en conjunto una infrutescencia (Costa, 2019).



Figura 2. Infrutescencia de higuera variedad ‘Black Mission’.

4.7 Tipos de higuera

Originalmente era una especie monoica, es decir, que tenía sobre un mismo pie, separadas, flores de ambos sexos. Con el tiempo y debido a diversos factores de tipo biológico, ambientales y de cultivo se ha transformado en dioica con flores de cada sexo en plantas (pies) separadas (García, 2011). Las higueras se clasifican en cuatro tipos; según el tipo de flor que contiene la inflorescencia y su necesidad o no de polinización (Costa, 2019).

4.7.1 Higueras hembra o domesticas

Son aquellas que tienen todas las flores femeninas longistilas, pueden ser uníferas (solamente dan una cosecha de higos) o bíferas (dan una cosecha de brevas y otra de higos) y no requieren polinización por ser de las denominadas persistentes (falsa partenocarpia). Entre ellas encontramos la mayoría de las higueras cultivadas (Costa, 2019).

4.7.2 Higueras tipo San Pedro

Las brevas se desarrollan de forma partenocárpica (sin necesidad de polinización), mientras que los higos requieren ser polinizados por la avispa del higo (*Blastophaga psenes*), proceso denominado “caprificación” (López-Corrales, 2014).

4.7.3 Higueras tipo Esmirna

Son higueras uníferas, con flores femeninas longistilas y que requieren de polinización obligatoria para la producción de frutos. Los aquenios maduros son oleaginosos, proporcionándole un mayor aroma y sabor. Para secado son consideradas las más sabrosas del mundo (Costa, 2019). Este tipo de higueras son cultivadas fundamentalmente en el Norte de África y Oriente Medio, en California (USA) son conocidas con el nombre de Calymirna (Melgarejo, 1999).

4.7.4 Higueras macho o cabrahigueras

Se les llama higuera macho porque son las únicas que presentan flores masculinas en una de sus tres floraciones, el prohigo (que correspondería a una breva). Se les puede llamar tríferas porque presentan tres floraciones: prohigo (primavera), mamona (verano-otoño) y mama (invierno). Sus flores femeninas son brevistilas, y aunque artificialmente pueden ser polinizadas, en la práctica no lo son porque los órganos masculinos no están sincronizados con los femeninos debido a la protoginia (Costa, 2019). Generalmente los frutos de este tipo de higueras no son considerados comestibles (Hong, 2003).

4.8 Variedades de higo en México

Aproximadamente 607 variedades de *Ficus carica* L., han sido descritas en todo el mundo. De estas, solo 46 son las más cultivadas a nivel mundial (Flaishman *et al.*, 2008). En México no se tiene mucha información acerca de establecimientos comerciales de variedades de higo, así pues, autores como García (2014), Lucero (2018) y Mendoza (2013) mencionan que a nivel nacional solo se cultivan de manera comercial cuatro variedades de higo; Black Mission, Brown Turkey (Figura 3), Nezahualcóyotl y White Kadota.



Figura 3. Infrutescencia de higuera variedad ‘Brown Turkey’.

4.9 Producción de higo en México

Las primeras plantaciones comerciales en México datan de 1995 en Baja California Sur y Sonora. Estas dos entidades fueron los principales estados productores de higo en México bajo riego con 413 ha y 88 ha en condiciones de secano. Los estados de Morelos con 399 ha y la Ciudad de México con 22 ha fueron los más importantes productores en 1998. En 2000 el área total cultivada con higueras era 1,012 ha, de las cuales 574 ha estaban bajo riego y 438 ha estaban en tierras secas (Botti, 2000).

Según SIAP-CIACON (2019), a nivel nacional se sembraron a campo abierto 1,706 hectáreas de las cuales solo fueron cosechadas 1,205 con una producción estimada de 8,169 toneladas. Los principales estados productores hasta el 2019 fueron Morelos con 3,351 toneladas, seguido de Veracruz con 1,980 toneladas, Puebla con 1,199 toneladas, Baja California Sur con 992 toneladas e Hidalgo con 240 toneladas. En la Figura 4 se muestra la evolución de la producción de higo en México durante el periodo 2003-2019.

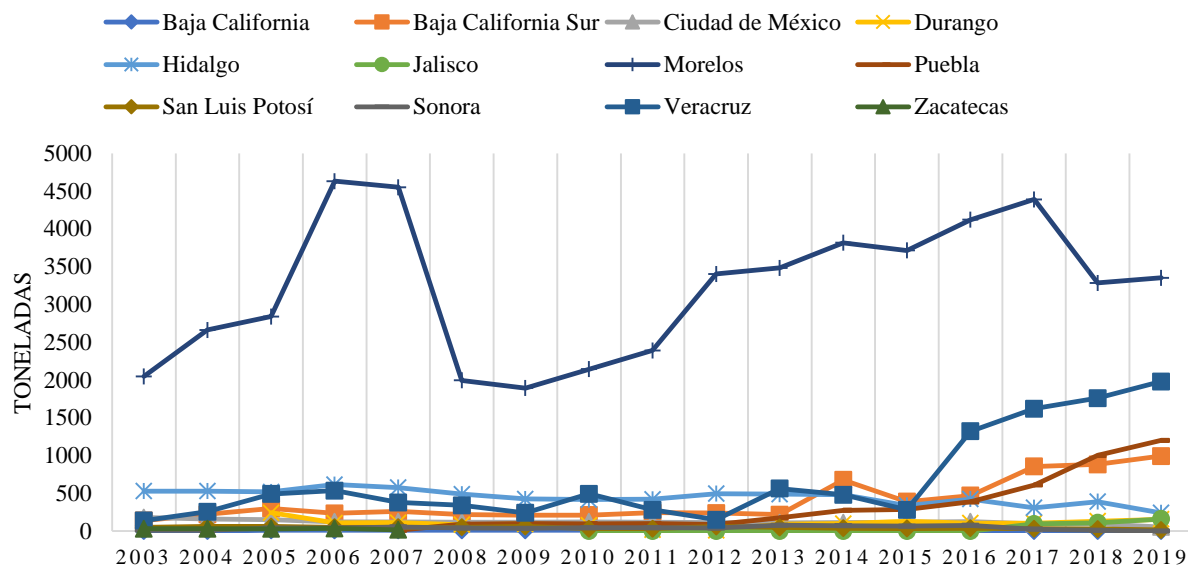


Figura 4. Evolución de la producción de higo en México periodo 2003-2019.

En cuanto a superficie cosechada Morelos con 497 hectáreas, seguido de Baja California Sur con 302 hectáreas, Veracruz con 155 hectáreas, Puebla con 142 hectáreas e Hidalgo con 36 hectáreas (SIAP-CIACON, 2019). En la Figura 5 se presenta la evolución de la superficie cosechada de higo en México durante el periodo 2003-2019.

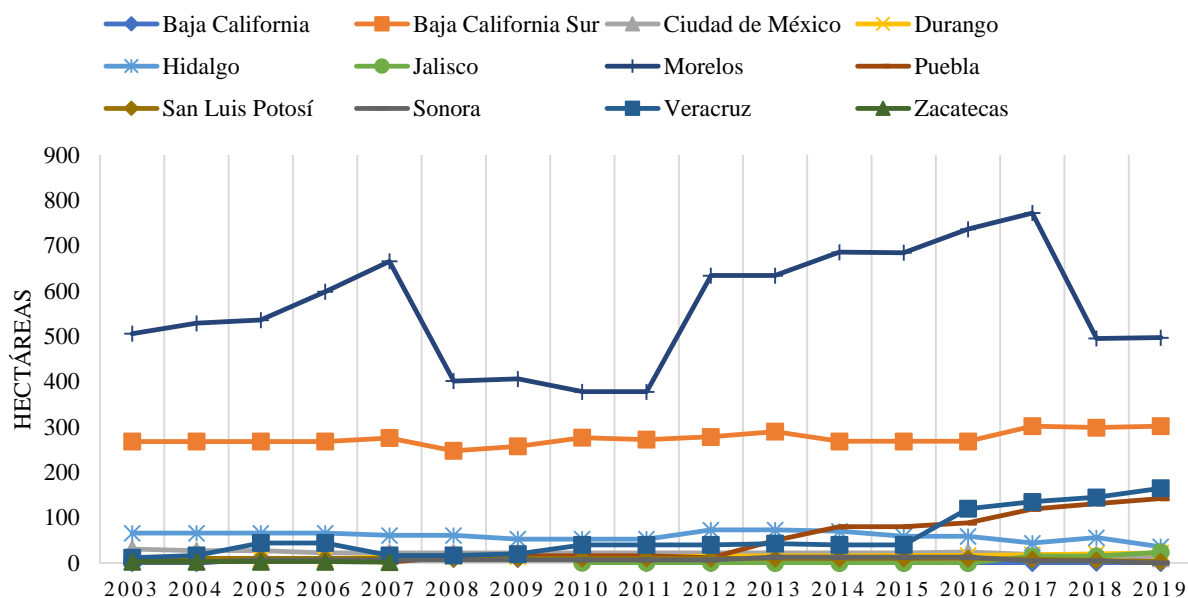


Figura 5. Evolución de la superficie cosechada de higo en México periodo 2003-2019.

En cuanto a rendimientos por hectárea, Veracruz es el que obtuvo los mayores rendimientos con 12 ton ha⁻¹, seguido de Zacatecas con 9.7 ton ha⁻¹, Puebla con 8.4 ton ha⁻¹ e Hidalgo con 6.7 ton ha⁻¹ (SIAP-CIACON, 2019). En la Figura 6 se presentan los rendimientos promedio de higo por estado durante el periodo 2003-2019.

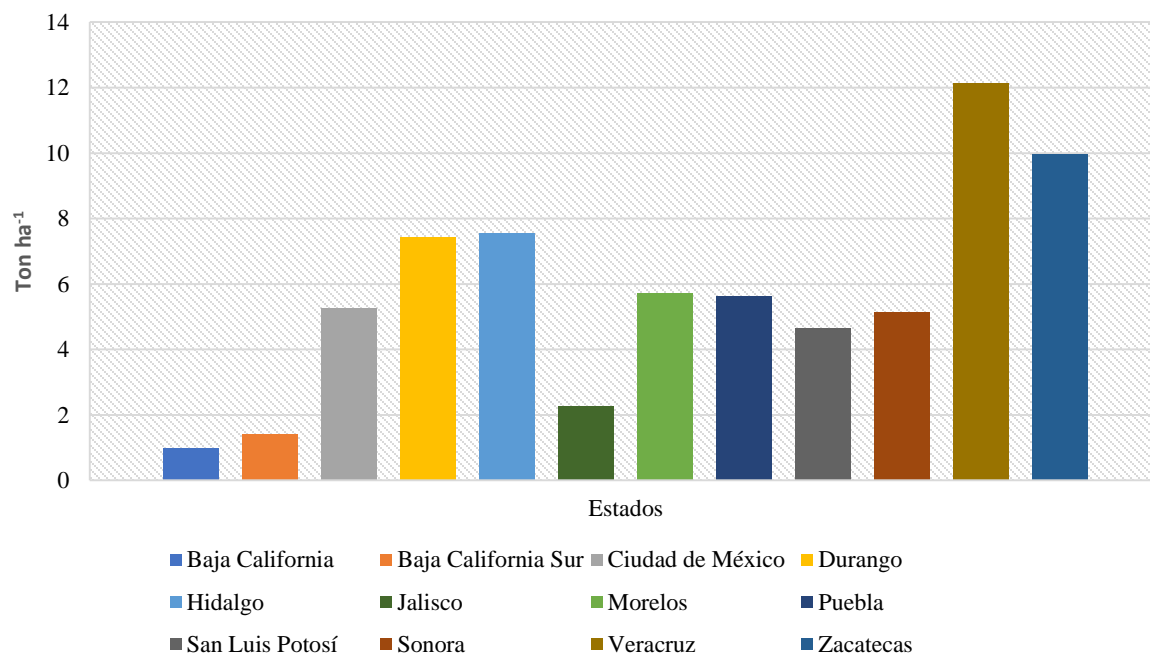


Figura 6. Rendimiento promedio de higo por estado periodo 2003-2019.

4.10 Ecofisiología de frutales

El estudio de los efectos ambientales sobre los procesos fisiológicos de la planta se le denomina ecofisiología; siendo las condiciones ecofisiológicas el factor número uno para el éxito de cualquier cultivo frutal. El ambiente del huerto frutal puede caracterizarse como aquel compuesto por luz, temperatura, agua, nutrición, humedad, viento y rizosfera. Intentar un producto frutícola de alta calidad en un sitio no apto ambientalmente incrementa los costos de producción y reduce las posibilidades de tener éxito económico. Todos los aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas son influenciados directa o indirectamente por las variables ambientales. El rendimiento, en términos de calidad y cantidad, está determinado por las condiciones ambientales de la localidad, municipio, región entre otros, en donde se desarrolla el cultivo. Las condiciones climáticas influyen sobre el tamaño de la planta, su fenología y la duración del tiempo de desarrollo y maduración de los frutos y también, sobre las épocas de cosecha, sobre todo en condiciones tropicales (Fischer, 2012).

4.11 Requerimientos agroclimáticos

El desarrollo, crecimiento y producción de higos dependen en gran medida de las condiciones climáticas. En general, el higo crecerá mejor y producirá fruta de alta calidad en climas mediterráneos secos y templados cálidos. La disminución de la temperatura en otoño, las frías condiciones invernales, las temperaturas óptimas de crecimiento y la lluvia, afectan el crecimiento de la planta y producción de cultivo en general (Flaishman, 2002).

4.11.1 Clima

Los higos son árboles subtropicales caducifolios cuyo crecimiento está más limitado por las bajas temperaturas invernales que por el calor del verano. Las regiones típicas productoras de higos se caracterizan por veranos secos y calurosos, baja humedad relativa e inviernos suaves, la higuera tiene un bajo requerimiento de horas frío. Las temperaturas invernales son un factor limitante, particularmente con árboles jóvenes que pueden ser dañados por las heladas severas (Ferguson *et al.*, 1990). Es una planta con especial afinidad por los climas cálidos, debido a su origen en el área mediterránea; aunque, por su gran adaptabilidad, puede vegetar en una gran diversidad de climas (Costa, 2019). Cuando el higo crece en zonas desérticas calientes, donde la temperatura del invierno es superior a 10 °C se eliminan la defoliación y la latencia de las hojas (Flaishman, 2002).

En Israel alrededor del área del mar muerto, donde las temperaturas invernales de 5 a 17 °C en la variedad Brown Turkey no afectaron a las plantas ya que nunca se defoliaron y continuaron produciendo fruta de noviembre a mayo. Las temperaturas invernales más bajas entre febrero y mediados de marzo (5 a 13 °C) ralentizan la maduración de la fruta durante ese período, mientras que el aumento de la temperatura a fines de marzo (10 a 22 °C) conduce a un crecimiento reanudado y a la maduración del fruto. Bajo condiciones climáticas cálidas, en varias áreas de América del Sur como Brasil, el árbol puede crecer continuamente y ser de hoja perenne. Sin embargo, en climas más fríos el árbol detiene el crecimiento, se deshoja, desarrolla un brote terminal típico y entra en un período de latencia prolongado. La caída de las temperaturas en otoño detendrá el crecimiento de los brotes vegetativos y reproductivos y, por ende, se desarrollará un brote terminal típico. Este proceso afectará la producción de cultivos de otoño tardío. En áreas con temperaturas mínimas superiores a 12 °C, las higueras producen frutos en noviembre, diciembre y enero y la maduración de la fruta continuará hasta la caída de las hojas (Flaishman, 2002).

Cuando la higuera es cultivada en áreas más frías, a menudo se ve afectada por heladas tempranas o tardías que matan ramas más jóvenes y pueden dañar brotes vegetativos y brotes de los siconos (Ferguson *et al.*, 1990). Según Condit (1947) el clima afecta notablemente el sabor, tamaño, forma y el color de la piel, así como la pulpa de los higos. Los climas más fríos producen frutos de pieles más verdes, a diferencia de climas cálidos donde la piel del fruto es más oscura, colores de pulpa más vivos y frutas más grandes y alargadas.

Es sensible a los fríos, y se considera que a partir de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ puede ocurrir la muerte del árbol, peligrando las infrutescencias a partir de $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Costa, 2019). Caso contrario, las altas temperaturas pueden provocar la caída de las infrutescencias, produciendo una falsa madurez; a ello contribuye la falta de riegos y los vientos cálidos. Este efecto se produce con temperaturas superiores a $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Melgarejo, 1999).

Botti *et al* (2003) realizó un estudio en Chile para evaluar el efecto de las condiciones climáticas en los cultivares White Kadota y Kennedy. El estudio demostró fuertes efectos de las condiciones climáticas sobre el rendimiento, el tipo de producción (higo, breva y cultivo principal), producción, rendimientos y calidad del fruto. La comparación del papel del clima en la producción de higos secos y frescos reveló que la producción de higos secos depende en gran medida de las condiciones climáticas y es exitosa principalmente en climas secos y templados cálidos. Sin embargo, los higos frescos se pueden cultivar en una gama más amplia de condiciones ecológicas.

La higuera tolera bien las altas y bajas temperaturas vegetando con normalidad. Es uno de los árboles más resistentes a la sequía, se cultiva tanto en secano como en regadío, aunque tradicionalmente se ha cultivado como frutal más bien de secano por su resistencia a la falta de agua. Cuando se producen periodos de sequía prolongados y no recibe riegos sigue vegetando, aunque en estas condiciones su producción sea prácticamente nula (Melgarejo, 1999).

Los climas lluviosos o los periodos prolongados de lluvia perjudican la calidad de los siconos ya que pueden provocar agrietamiento de fruto, pudrición, entre otros daños. Vientos fuertes durante la época de maduración pueden afectar calidad de fruta ya que el follaje genera fricción contra los siconos lo que puede provocar cicatrices, especialmente en variedades como White Kadota y Brown Turkey. Puede cultivarse hasta los 1,400 m de altitud y su cultivo junto al mar es desaconsejable (Ferguson *et al.*, 1990).

De acuerdo a CABI (2019) los climas favorables para el óptimo desarrollo de la higuera se mencionan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Tipos de climas para el cultivo de la higuera.

Tipo	Descripción	Estado
Af- Clima de la selva tropical	> 60 mm de precipitación por mes	Tolerado
As- Clima de sabana tropical con verano seco	< 60 mm de precipitación en el mes más seco (verano) y $< (100 - [\text{precipitación anual total} \{ \text{mm} \} / 25])$	Privilegiado
Aw- Clima tropical de sabana húmeda y seca	< 60 mm de precipitación en el mes más seco (invierno) y $< (100 - [\text{precipitación anual total} \{ \text{mm} \} / 25])$	Privilegiado
Bs- Clima estepario	> 430 mm y < 860 mm de precipitación anual	Privilegiado
Bw- Clima desértico	< 430 mm de precipitación anual	Tolerado
Cs- Clima templado cálido con verano seco	Temperatura media cálida > 10 °C, temperatura media fría > 0 °C con veranos secos	Privilegiado
Cw- Clima templado cálido con inviernos secos	Clima templado cálido con inviernos secos (temperatura promedio cálida > 10 °C, temperatura promedio fría > 0 °C, con inviernos secos)	Tolerado
Cf- Clima templado cálido con humedad todo el año	Temperatura media cálida > 10 °C, temperatura media fría > 0 °C, humedad todo el año	Tolerado

Así pues, en el cuadro 4 se mencionan los rangos óptimos de temperatura tolerables para la higuera:

Cuadro 4. Temperaturas óptimas para el desarrollo de la higuera.

Parámetro	Límite inferior	Límite superior
Temperatura mínima absoluta (°C)	-10	
Temperatura media anual (°C)	13	25
Temperatura máxima media del mes más caluroso (°C)	18	31
Temperatura mínima media del mes más frío (°C)	3	5

4.12 Requerimientos edafológicos

La higuera es un frutal poco exigente en suelos, aunque prefiere los frescos, ricos, permeables y con un buen drenaje, al menos en el primer metro de profundidad; en éstos se obtienen los mejores resultados, aunque también se puede adaptar a suelos pobres (López-Corrales, 2014). Se adapta bien a la caliza tolerando niveles de pH de 8-8,5, obteniéndose en éstos calidades excelentes para el secado. Como en otros frutales, los suelos arenosos inducen un adelanto de la cosecha, aunque los siconos en estos suelos serán menos dulces (Melgarejo, 1999). Es muy sensible al encharcamiento ya que le provoca asfixia radicular, por lo que hay que descartar el cultivo en suelos muy fuertes y que no drenen bien (López-Corrales, 2014).

Su tolerancia a la salinidad en suelo es alta, situándose análogamente al granado y al olivo (Costa, 2019) lo que hace de ésta un frutal apreciado y aprovechable en zonas salinas, donde no es posible el cultivo rentable de otras muchas especies frutales (Melgarejo, 1999). A continuación, se muestran valores de conductividad eléctrica que afectan el rendimiento de la higuera (Cuadro 5).

Cuadro 5. Porcentaje de reducción del rendimiento en función de la ce del suelo.

Valores de ce en extracto de saturación del suelo para disminución del rendimiento					
dS/m	2.7	3.8	5.5	8.7	14
%	0	10	25	50	100

4.13 Requerimientos hídricos

Las higueras toleran condiciones más secas que la mayoría de los árboles frutales y son un cultivo atractivo para zonas áridas, es por ello por lo que se les ha considerado un frutal tradicionalmente de secano (Melgarejo, 1999). Ha sido considerada, junto a la vid, el almendro

y el olivo, un cultivo de secano, soportando estoicamente la sequía, en cuyo caso tiene un desarrollo vegetativo muy reducido, limitándose a algunas hojas, no dando cosecha alguna (Costa, 2019).

Las higueras pueden estresarse en períodos secos prolongados debido a su sistema radical poco profundo. Sin embargo, la mayoría de los cultivares de higos no se adaptan bien en condiciones de excesiva humedad en el suelo. En tales áreas donde la temporada de lluvias es latente y prolongada, generalmente se producen agrietamientos en los siconos, pudrición en la superficie por *Alternaria alternata*, pudriciones internas por ingreso de agua sobre el ostiolo del sicono y fermentaciones del fruto (Flaishman *et al.*, 2008). De acuerdo a CABI (2019) los niveles óptimos de precipitación tolerados por la higuera se presentan en el cuadro 6.

Cuadro 6. Rangos de precipitación óptimas para la higuera.

Parámetro	Límite inferior	Límite superior	Descripción
Duración de la estación seca	1	5	Numero de meses consecutivos con precipitaciones < 40 mm
Precipitación media anual	700	1250	mm

Sin embargo, Melgarejo (1999) y Costa (2019), mencionan que con precipitaciones de 600 a 700 mm anuales se obtiene una buena productividad con buenos rendimientos.

4.13.1 Calidad del agua

La calidad de las aguas utilizadas para riego es un factor que en muchos casos limita el cultivo de otros muchos frutales. En cuanto a la higuera es menos exigente, llegando a tolerar valores de conductividad eléctrica del agua de hasta 5.5 dS/m (Flores, 1990).

Costa (2019) menciona que ha utilizado aguas con conductividades de 3.7 dS/m desde el inicio del establecimiento del cultivo y también en plantaciones con plena producción llegando a obtener buenos resultados. En el cuadro 7 se menciona la disminución del rendimiento en función de la conductividad eléctrica del agua.

Cuadro 7. Porcentaje de reducción del rendimiento en función de la ce del agua de riego.

Valores de ce del agua de riego para disminución del rendimiento					
dS/m	1.8	2.6	3.7	5.6	14
%	0	10	25	50	100

4.13.2 Riego

Las necesidades de riego del cultivo de la higuera no son grandes, pero cuando las zonas de producción presentan sequías prolongadas con precipitaciones escasas, se debe complementar la falta de agua con un sistema de riego localizado (Costa, 2019). La frecuencia del riego depende en sí del tamaño de la planta, el vigor, el tipo de suelo y la lluvia (Flaishman *et al.*, 2008).

En los inicios de maduración de los siconos se deben evitar los riegos excesivos, los cuales favorecen la podredumbre y mala conservación de los frutos (Costa, 2019). Un aumento repentino en el suministro de agua durante el período de maduración hará que la fruta se divida (Melgarejo, 1996). El exceso de agua en pleno verano causará un crecimiento vegetativo excesivo a expensas de la calidad de la fruta. El suelo húmedo hace que la fruta sea grande, acuosa, propensa a la pudrición y la marchitez (Flaishman *et al.*, 2008).

Valdés (2001), realizó un trabajo para calcular el coeficiente de cultivo (Kc) relacionado con el área sombreada del cultivo (Cuadro 8). Su relación con el área sombreada se presenta en el cuadro 9.

Cuadro 8. Coeficiente de cultivo Kc de la higuera.

Kc de la higuera por mes											
Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	
0.14	0.15	0.16	0.4-0.5	0.55-0.7	0.6-0.65	0.65	0.65	0.65	0.6-0.45	0.22	

Cuadro 9. Relación área sombreada y Kc de la higuera.

Evolución de Kc en relación con el % del área sombreada													
Kc	0.14	0.2	0.27	0.34	0.4	0.47	0.53	0.6	0.67	0.73	0.79	0.86	1
%	5.2	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	68

Assaf (2001), en una publicación sobre técnicas del cultivo de la higuera Nazareth en Israel, recomienda usar un coeficiente entre 0.3-0.4 durante todo el ciclo del cultivo, quedando la dotación ajustada a la evapotranspiración de referencia (ET_o).

Andrade *et al.*, (2014), llega a la conclusión de que un coeficiente de cultivo entre 0.47-0.71 es adecuado para el cultivo, no obstante, un Kc de 0.47 es empleado mayormente en todos los estudios de Brasil.

Navejas-Jiménez *et al.*, (2011), en un estudio realizado para hacer una evaluación de comparación de métodos para estimar la evapotranspiración en el noroeste de México, mencionan que la higuera presenta una evapotranspiración anual de 1100 mm y un Kc de cultivo de 0.65-0.80.

4.14 Definición de zonificación agroecológica

La zonificación agroecológica (ZAE) define zonas en base a combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. Los parámetros particulares usados en la definición se centran en los requerimientos climáticos y edáficos de los cultivos y en los sistemas de manejo bajo los que éstos se desarrollan. Cada zona tiene una combinación similar de limitaciones y potencialidades para el uso de tierras, y sirve como punto de referencia de las recomendaciones diseñadas para mejorar la situación existente de uso de tierras, ya sea incrementando la producción o limitando la degradación de los recursos (FAO, 1997).

Sánchez-Carrillo (1999) expuso que la zonificación es una herramienta útil para la programación de nuevas tierras que van a estar bajo cultivo y también para mejorar el uso de las tierras ya cultivadas, y que la evaluación de los recursos agroclimáticos es un requerimiento fundamental, previo a las proyecciones de las tierras.

4.15 Antecedentes de zonificación

El primer proyecto de ZAE, se desarrolló en 1976 por la FAO, con el propósito de estimar el potencial de producción de alimentos en el mundo en once cultivos estratégicos. Las variables utilizadas han sido principalmente de tipo edafoclimáticas. Posteriormente, esta misma metodología de zonificación agroecológica ha sido aplicada en otros países del mundo, como Kenia, Nigeria, Mozambique, Bangladesh y China. En 1983, el proyecto ZAE, entregó la aptitud de tierra estimada para 11 cultivos a una escala de cinco grandes regiones del mundo (Rodríguez, 2007). En el cuadro 10 se presentan algunos estudios de zonificación agroecológica llevados a cabo por la FAO (1994).

Cuadro 10. Zonificación de cultivos a nivel mundial.

País	Proyecto	Escala
Bangladesh	Recomendación sobre fertilización y aspectos tecnológicos	1:125 000
China	Sostenimiento de población y planificación de los recursos	1:1 000 000 a 1:5 000 000
Etiopia	Potencialidad pradera y ganadería en África Occidental	1:5 000 000

Etiopia	Zonificación agroecológica	1: 2 000 000
Granada	Evaluación del uso de tierras	1:15 000
Kenia	Planificación de desarrollo agrícola	1:1 000 000
Nepal	Planificación de desarrollo agrícola	1:50 000
Nigeria	Evaluación de riesgo de degradación de tierras	1:250 000

4.16 Zonificación agroecológica en México

A nivel nacional se han realizado estudios de zonificación para múltiples cultivos agrícolas. En el cuadro 11 se mencionan los más importantes:

Cuadro 11. Zonificación agroecológica de cultivos a nivel nacional.

Año	Proyecto	Ubicación
2003	Caracterización edáfica y climática del área productora de aguacate <i>Persea americana</i> CV. "Hass" en Michoacán, México	Michoacán
2007	Determinación de áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones de Sotol (<i>Dasyilirion cedrosanum</i> Trel.) en el estado de Coahuila	Coahuila
2007	Determinación de zonas agroclimáticas para la producción de mango (<i>Mangifera indica</i> L. "Manila") en Veracruz, México	Veracruz
2008	Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo del Tamarindo (<i>Tamarindus indica</i> L.) en el estado de Tabasco	Tabasco
2009	Áreas con potencial productivo y protocolo para el establecimiento de plantaciones de Jojoba en Baja California Sur, México	Baja California Sur
2010	Zonificación productiva cañera en Huasteca Potosina, México	Huasteca Potosina
2012	Áreas potenciales para el cultivo del agave (<i>Agave americana</i> L.) en la Meseta Comiteca, Chiapas	Chiapas
2012	Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz) en el estado de Tabasco, México	Tabasco
2014	Zonificación edafoclimática para el cultivo de <i>Jatropha curcas</i> L., en Tabasco, México	Tabasco

2015	Áreas con potencial agroecológico para el cultivo de Higuierilla (<i>Ricinus communis</i> L.) en el estado de Chiapas	Chiapas
2016	Zonificación agroecológica del <i>Coffea arabica</i> en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México	Atoyac de Álvarez, Guerrero
2017	Zonificación agroecológica del pasto (<i>Pennisetum purpureum</i> Schumach), variedad Taiwán en Chiapas, México	Chiapas
2018	Áreas potenciales y vulnerabilidad del cultivo de café tipo robusta (<i>Coffea canephora</i> P.) al cambio climático en el estado de Tabasco, México	Tabasco
2018	Áreas potenciales para el cultivo de girasol en condiciones de temporal en Guanajuato, México	Guanajuato
2018	Identificación de áreas aptas para la agricultura de temporal con maíz y frijol en la Cuenca de Autlán, Jalisco, México	Jalisco
2019	Zonificación forestal bajo el concepto de áreas de respuesta homogénea en el centro de México	Centro de México

4.17 Aplicación de SIG como herramienta para zonificación

Hasta el desarrollo reciente de los sistemas computarizados, la integración de datos numéricos y cartográficos era muy limitada, tanto desde el punto de vista operacional, como de los resultados. El investigador o responsable de desarrollo, confrontado a exigencias de esta naturaleza, era obligado a utilizar procedimientos de integración muy rudimentarios como la sobreposición de mapas, el uso de transparencias u overlays, el dibujo manual de isolíneas de productividad de factores, construcción de tablas cruzadas entre factores, la cuantificación de áreas con planímetros. El surgimiento de los sistemas de información geográfica ha cambiado completamente esa realidad. No solamente por facilitar tareas manuales, antes complejas y lentas en su ejecución, más sobre todo al abrir posibilidades de integración entre datos espaciales y numéricos impensables en el pasado (Cano, 2007).

Un sistema de información geográfica es una colección organizada de equipo de cómputo (hardware), datos geográficos y personal; diseñado para capturar, almacenar,

actualizar, manipular, analizar y desplegar eficientemente todas las formas de información geográficamente referenciada (ESRI, 1995).

El objetivo principal de un SIG no es representar la realidad a través de un mapa, sino analizar los datos contenidos en los mismos para crear nuevos mapas a partir de los ya existentes. No son una ciencia en sí misma, sino una herramienta al servicio de muchas y variadas disciplinas, cualquiera que emplee información espacial (Cano, 2007).

La zonificación agrícola permite, a partir del conocimiento de las variables climáticas (como precipitación, evapotranspiración de referencia, entre otros) y de su espacialización regional por medio SIG's, definir regiones de aptitud climática y épocas más adecuadas de siembras como forma de disminuir los efectos causados por el clima (Da Silva, 2000).

4.18 Técnicas de análisis espacial

El análisis espacial se puede llevar a cabo utilizando múltiples técnicas basadas en la ayuda de estadísticas y sistemas de información geográfica. Los SIG's son capaces de facilitar la interacción de atributos con datos geográficos espaciales para mejorar la precisión de la interpretación y la predicción del análisis espacial. El análisis espacial que está involucrado en los SIG's puede generar datos geográficos y la información resultante será más informativa que los datos recopilados no organizados. De acuerdo con el requisito del usuario final, se puede elegir una técnica geoespacial adecuada para implementarse con SIG's. La selección de la técnica geoespacial definirá la clasificación y el método de análisis a utilizar (Paramasivam, 2019).

En lo que se refiere a la palabra "análisis" es únicamente a la consulta de datos y la manipulación de estos, mientras que el "análisis espacial" se enfoca más al análisis estadístico basado en patrones y procesos subyacentes. Es un tipo de análisis geográfico que aclara patrones de características personales y apariencia espacial en términos de geoestadística y geometría, que se conocen como análisis de ubicación. Implica técnicas estadísticas y de manipulación, que podrían atribuirse a una base de datos geográfica específica (Paramasivam, 2019).

Burrough (2001) menciona que una base de datos SIG's pueden calcular la ubicación espacial, distribución y la relación entre los datos. Básicamente, el análisis espacial es un conjunto de métodos que producen resultados refinados con correlación espacial. Se pueden observar enlaces espaciales entre datos geométricos y temáticos y se identifican los atributos en los componentes de datos. En la actualidad, todo software SIG tiene módulos diseñados para

manejar y procesar gran cantidad de datos espaciales y geográficos. Se entiende como interpolación al proceso de generar una superficie continua en un espacio geográfico con base a una serie de puntos ubicados en diferentes situaciones geográficas de ese mismo espacio (Díaz *et al.*, 2008). A continuación, se describen los tipos de interpolación más conocidos y usados en estudios de este tipo.

4.18.1 Método IDW

Distancia inversa ponderada, por sus siglas en inglés (IDW), es un método de interpolación considerado simple y fácil de usar. Aquí las ubicaciones utilizadas tienen valores identificados u otras ubicaciones no identificadas tienen valores calculados. Este método se utiliza para pronosticar valores no identificados para cualquier dato de ubicación geográfica, por ejemplo; precipitación, altura, profundidad, concentraciones de parámetros químicos, niveles de contaminación, entre otros (Paramasivam, 2019).

Setianto (2013) manifiesta que se puede identificar un vecindario para el punto interpolado y se toma un promedio ponderado dentro de este vecindario. Los pesos observados lo muestran como una función decreciente de la distancia. Sin embargo, el usuario puede controlar la forma matemática de la función de ponderación y el tamaño del vecindario (expresado como un radio o un número de puntos) y hay otras opciones disponibles.

El interpolador IDW supone que cada punto de entrada está influenciado localmente, lo que disminuye con la distancia. Asigna pesos mayores a los puntos más cercanos a la celda de procesamiento que a los que están más lejos. Se puede usar un número especificado de puntos o todos los puntos dentro de un radio especificado para determinar el valor de salida de cada ubicación. La presunción es que la variable mapeada disminuye en influencia con su distancia desde la ubicación muestreada (Paramasivam, 2019).

4.18.2 Método Kriging

Según Paramasivam (2019) Kriging es una técnica de interpolación geoestadística que considera tanto la distancia como el grado de variación entre los puntos de datos conocidos al estimar valores en áreas desconocidas. Kriging es un proceso de varios pasos; que comienza con el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de semivariogramas o variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de una superficie de varianza. El método Kriging será más exitoso cuando la distancia espacialmente correlacionada o el sesgo direccional sea presente en los datos. Se aplica ampliamente en ciencias del suelo, geología,

entre otras ciencias a fines. Kriging es similar a IDW en que asigna pesos a los valores medidos circundantes al derivar una predicción para una ubicación no medida.

Rufo *et al* (2018) describe Kriging como una técnica estocástica ya que utiliza una combinación lineal de pesos en puntos conocidos para estimar el valor en un punto desconocido, en contraste con los métodos IDW y Spline, que son métodos deterministas. Kriging es un método geoestadístico que ofrece una solución al problema de estimar la superficie teniendo en cuenta la correlación espacial. Para este fin, utiliza un semivariograma, una medida de correlación espacial entre dos puntos en los que los pesos varían de acuerdo con la disposición espacial de las muestras. El semivariograma puede ser una función de la distancia y la dirección y, por lo tanto, puede explicar la variabilidad dependiente de la dirección.

4.18.3 Método Spline

En esta técnica, los valores se calculan utilizando una función matemática que minimiza la curvatura total de la superficie. El punto resultante muestra una superficie lisa que pasa exactamente a través de los puntos de entrada dados. Este método se puede adaptar a superficies que varían suavemente como la elevación, las alturas de la capa freática o la contaminación. Este método de interpolación espacial encuentra los datos en un área continua y pronostica puntos desconocidos utilizando los datos observados para completar los datos que faltan o no se pueden obtener. Se pueden esperar errores en casos de distribución desigual (Paramasivam, 2019). Xiao *et al* (2016) expresa que en general, las interpolaciones tipo spline pueden ser aplicadas en una amplia cantidad de interpolaciones de datos. Los resultados obtenidos a través de este método están estrechamente alineados con los de los métodos de kriging.

4.19 Uso del método kriging para el análisis espacial de variables

González-Mancillas *et al* (2015) utilizaron el método de interpolación kriging para la zonificación edafoclimática de *Jatropha curcas* L., en Tabasco, México. Los resultados muestran que el estado de Tabasco es óptimo para el establecimiento del cultivo ya que no se detectaron zonas con aptitud marginal.

Plouffe *et al* (2015) hicieron un estudio comparativo de cuatro métodos de interpolación espacial para el mapeo mensual de las precipitaciones en Sri Lanka. Los métodos de interpolación utilizados fueron IDW, spline, kriging ordinario y kriging bayesiano. Los resultados obtenidos indican que el mejor método de interpolación para el mapeo de precipitaciones en Sri Lanka es el método kriging bayesiano ya que los resultados obtenidos en

las interpolaciones fueron comparados con imágenes de detección remota y sensores TRMM siendo kriging bayesiano el que mejor se aproximó a los datos obtenidos por satélite.

En un estudio realizado por Hsu (2017), en la ciudad de Taipéi, Taiwán; se utilizaron nueve métodos de interpolación espacial con el fin de evaluar la evolución y distribución espacial de la temperatura urbana local en esa ciudad. Los métodos evaluados se dividieron en dos grupos; técnicas no geoestadísticas que incluyen los métodos spline, TSA (análisis de superficie de tendencia), IDW y vecino natural. El segundo grupo fue; técnicas geoestadísticas que incluyen los métodos kriging ordinario (OK), kriging universal (UK), kriging simple (SK), kriging bayesiano empírico (EBK) y cokriging original (OCK). Los resultados finales demostraron que las técnicas de interpolación geoestadísticas tuvieron un mejor desempeño general de predicción que las técnicas no geoestadísticas ya que las técnicas geoestadísticas son métodos estocásticos que proporcionan una evaluación de los errores y que incluyen una familia de algoritmos de kriging que utilizan la regresión generalizada de mínimos cuadrados para estimar atributos continuos, mientras que las técnicas no geoestadísticas son métodos deterministas puesto que no cuentan con una evaluación de errores con los valores predichos.

Vázquez-González (2017) desarrolló la zonificación agroecológica del pasto Taiwán en Chiapas, México. Utilizó el método de interpolación kriging para definir las áreas aptas y no aptas para el establecimiento del pasto en el estado.

Bhunia *et al* (2018) realizaron una comparación de métodos de interpolación para conocer la distribución espacial del carbono orgánico en el suelo, estudio llevado a cabo en Medinipur, India. Los métodos comparados fueron IDW, interpolación polinómica local (LPI), función de base radial (RBF), kriging ordinario y kriging bayesiano empírico. Los resultados indican que el mejor método para la predicción es el kriging ordinario ya que es un método geoestadístico en el que se incorpora autocorrelación espacial y optimiza estadísticamente los pesos de los datos.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

5.1.1 Jalisco

El estado de Jalisco se localiza en la región occidente de la República Mexicana (Figura 7), ubicado en las siguientes coordenadas geográficas extremas: al norte $22^{\circ}45'01''$, al sur $18^{\circ}55'33''$ de latitud norte; al este $101^{\circ}30'38''$, al oeste $105^{\circ}41'43''$ de longitud oeste. El estado representa el 4% de la superficie del país. Jalisco colinda al norte con Nayarit, Zacatecas y Aguascalientes; al este con Zacatecas, Guanajuato y Michoacán de Ocampo; al sur con Michoacán de Ocampo, Colima y el Océano Pacífico; al oeste con el Océano Pacífico y Nayarit (INEGI, 2017).



Figura 7. Localización geográfica del estado de Jalisco.

5.1.2 Puebla

El estado de Puebla se localiza en la región centro de la República Mexicana (Figura 8), ubicado en las siguientes coordenadas geográficas extremas: al norte $20^{\circ}50'24''$, al sur $17^{\circ}51'39''$ de latitud norte; al este $96^{\circ}43'29''$, al oeste $99^{\circ}04'14''$ de longitud oeste. El estado representa el 1.7% de la superficie del país. Puebla colinda al norte con Hidalgo y Veracruz de Ignacio de la Llave; al este con Veracruz de Ignacio de la Llave y Oaxaca; al sur con Oaxaca y Guerrero; al oeste con Guerrero, Morelos, México, Tlaxcala e Hidalgo (INEGI, 2017).

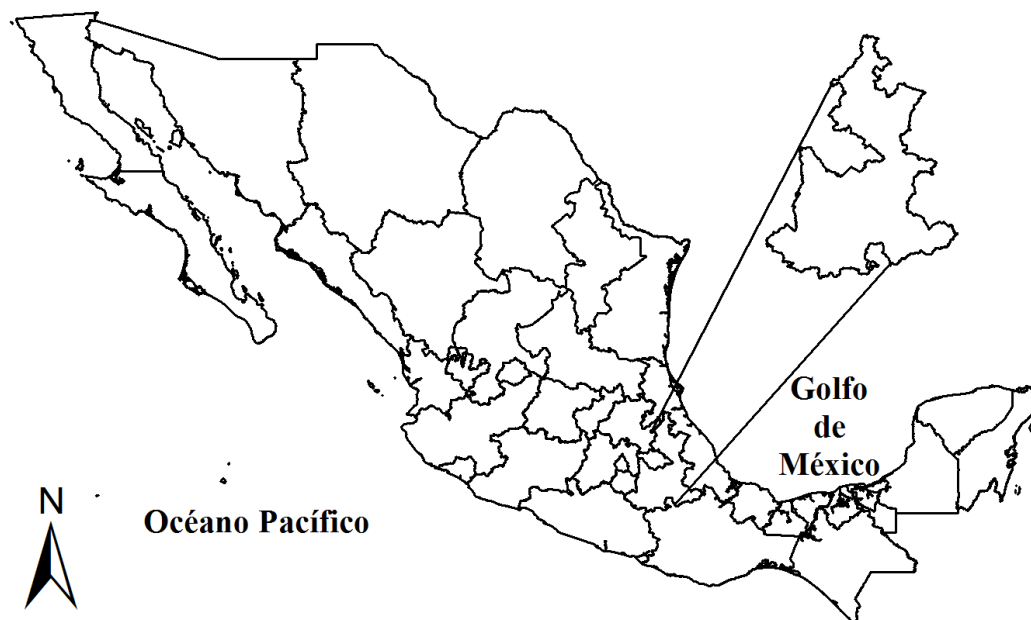


Figura 8. Localización geográfica del estado de Puebla.

5.2 Selección y requerimientos bioclimáticos del cultivo de higo

Debido a que el cultivo de higo requiere temperaturas mínimas de 12 °C para la salida de reposo, las variables que se evaluarán para determinar las zonas potenciales fueron principalmente las climáticas (Cuadro 12), por la relación directa que guardan con el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de higo.

Cuadro 12. Variables climáticas a evaluar.

Variable	Unidad
Altura sobre el nivel del mar	m
Temperaturas mínimas mensuales	°C
Promedio anual de temperatura mínima	°C
Temperaturas medias mensuales	°C
Promedio anual de temperatura media	°C
Temperaturas máximas mensuales	°C
Promedio anual de temperatura máxima	°C
Precipitaciones mensuales	mm
Precipitación anual acumulada	mm

m = metros; °C = grados Celsius; mm = milímetros

Para determinar las zonas agroclimáticas para el higo se tomaron valores óptimos establecidos por varios autores (Al Hadi, 2002), (CABI, 2019), (Costa, 2019), (Flaishman, 2002), (Ferguson *et al.*, 1990), (Flores, 1990), (Melgarejo, 1999) y (López-Corrales, 2014), que se presentan en el cuadro 13.

Cuadro 13. Variables ambientales seleccionadas para zonificación.

Clima	Óptima		Suelo	Óptima	
	Mínima	Máxima		Mínima	Máxima
Temperatura (°C)	12	38	pH	7	8.5
Precipitación (mm)	600	700	Fertilidad	Pobre	Rica
Altitud (msnm)	10	1400	Salinidad (dS/m)	5.5	
Luminosidad (Klux)		40	Drenaje	Excelente drenaje	
Fructificación (Días)	120	150	Textura	Media y ligera	

5.3 Inventario climático

La elaboración del inventario climático se realizará de acuerdo con lo establecido por FAO (1997), lo cual constará de estas etapas:

- Definición de las divisiones climáticas mayores
- Obtención del periodo de crecimiento del cultivo
- Obtención periodo libre de heladas

5.3.1 Divisiones climáticas mayores

Las divisiones climáticas se definirán con base en los requerimientos térmicos del cultivo, que limitan su distribución a escala global. Para establecer las divisiones climáticas mayores, se considerará la altitud y el relieve (Rivera-Hernández *et al*, 2012).

5.3.2 Periodo de crecimiento

Para estimar el periodo de crecimiento desde el inicio hasta el final, en días, para el cultivo de higo, se utilizó la metodología propuesta por Pájaro y Ortiz (1988), esta metodología se aplica para la república mexicana, usando solamente precipitación total anual (PTA) en mm, el cual es:

$$PC = (0.24089 * PTA) - (0.0000372 * PTA^2) - 33.1019$$

Donde:

PC= Periodo de crecimiento (Días)

PT= Precipitación total anual (mm)

5.3.3 Periodo libre de heladas

Para la estimación del periodo libre de heladas desde el inicio hasta el final, en días, para el cultivo de higo, se utilizó la metodología propuesta por Pájaro y Ortiz (1988), que consiste en hacer una predicción para la ocurrencia de la primera helada, así como de la última mediante el uso de temperaturas mínimas medias anuales, la cual se expresa en el siguiente modelo:

$$PLH= 1.7713 + (31.0214 * T_{min}) - (0.6361 * T_{min}^2)$$

Donde:

PLH= Periodo libre de heladas (Días)

T_{min}= Temperatura mínima media anual (°C)

5.4 Programas de cómputo en la manipulación climatológica y cartográfica

5.4.1 Extractor rápido de información climatológica ERIC III

Las variables climáticas se obtuvieron a partir del software desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el cual contiene registros diarios de variables climatológicas en un total de 5,272 estaciones climatológicas tradicionales (IMTA, 2016). Cada estación reporta información diaria de variables climatológicas (Cuadro 14).

Cuadro 14. Variables climatológicas descritas en ERIC III.

Variable	Unidades/Significado
Temperatura observada	°C (a las 8 hrs.)
Temperatura mínima	°C
Temperatura máxima	°C
Precipitación 24 hrs	mm (de 8 a.m. a 8 a.m.)
Evaporación 24 hrs	mm (de 8 a.m. a 8 a.m.)
Tormenta	0=no hubo; 1= si hubo
Granizo	0=no hubo; 1= si hubo
Niebla	0=no hubo; 1= si hubo
Cobertura del cielo	0=despejado; 1=medio nublado; 2=nublado

5.4.2 Elaboración y representación cartografía con ArcGis

Para la elaboración y representación cartográfica se utilizó el software ArcGis 10.4. Mediante un sistema de mapeo computarizado que relacionó lugares con información agroclimática igual a la del cultivo de higo. Con este programa informático se construyeron mapas de temperaturas mínimas (anuales), promedio de temperatura mínima (anuales), promedio anual de temperatura mínima, temperatura media anual, promedio anual de temperatura máxima, precipitación total anual utilizando el método de interpolación espacial, el cual utiliza puntos de un valor conocido para estimar los valores de otros puntos.

5.5 Selección del método de interpolación para análisis espacial

Para la generación de mapas de temperatura, precipitación, periodos de crecimiento y periodos libres de heladas, en este trabajo se utilizó el método de interpolación kriging ya que según González-Mancillas *et al.*, (2015), Plouffe *et al.*, (2015), Hsu (2017), Vázquez-González, (2017) y Bhunia *et al.*, (2018) obtuvieron resultados favorables y confiables al utilizar este método de interpolación. Este método se representa mediante la siguiente expresión (Díaz *et al.*, 2008):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 N_{(h)} \sum [Z_{(x)} - Z_{(x+h)}]^2}$$

Donde:

$\gamma(h)$ y N_h = semi varianza para todas las muestras localizadas en el espacio y el número total de pares de muestras separado por el intervalo de distancia, respectivamente, ambos se encuentran separados por una distancia h .

$Z_{(x)}$ = valor de la muestra en una localización x

$Z_{(x+h)}$ = valor de la muestra a la distancia h desde x

5.6 Homogeneización de series climatológicas

Castillo *et al.*, 2001 expresan que al momento de obtener series climatológicas de las estaciones resulta así un trabajo tedioso ya que se tienen datos tan voluminosos que resulta imprescindible hacer uso de la estadística para la obtención de la información deseada. La correlación que existe entre dos o más variables climáticas puede no tener un carácter aleatorio por existir una dependencia física entre ellas muchas veces conocida, en estos casos no se justifican técnicas estadísticas. Así pues, mencionan que el tratamiento de datos climatológicos

aplica principalmente en los pluviométricos puesto que, para fines de diseño y dimensionamiento de obras de ingeniería especialmente civil e hidráulica, si aplican pruebas estadísticas rigurosas y con series de datos de al menos 30 años.

5.6.1 Población

Es una agrupación de datos climatológicos que van adquiriendo un único y específico valor en cada año de muestra; por ejemplo, temperatura media del mes más frío del año, precipitación del mes más seco del año, número de días nublados al mes, entre otros (Castillo *et al.*, 2001).

5.6.2 Muestra aleatoria

Es un subconjunto de la población constituida por términos consecutivos cronológicamente; también llamada serie climatológica. Durante la práctica es muy común no contar con series climatológicas de 30 años o más, por lo que hay que disponer y analizar series más cortas, que según el elemento considerado serán más o menos representativas de la población (Castillo *et al.*, 2001). En el cuadro 15 se presentan los años mínimos para estudiar el elemento clima de un lugar específico.

Cuadro 15. Número mínimo de años para la obtención de distribuciones de frecuencias estables.

Elemento climático	Islas		Costas		Llanuras		Montañas	
	ET	T	ET	T	ET	T	ET	T
Precipitación	25	30	30	40	40	40	50	50
Temperatura	10	5	15	8	15	10	25	15
Visibilidad	5	3	5	3	5	4	8	6
Nubosidad	4	2	4	3	8	4	12	6
Humedad	3	1	6	2	5	3	10	6
ET= extra tropical					T= tropical			

5.7 Selección de las estaciones meteorológicas

Siguiendo lo establecido por Castillo *et al* (2001); se seleccionaron todas las estaciones meteorológicas posibles con datos climatológicos suficientes para el análisis e interpolación de los mismos. Primeramente, se realizó la identificación de las estaciones que se encuentran en

operación y después las que se encuentran suspendidas, información proporcionada por el sistema meteorológico nacional (Figura 9).

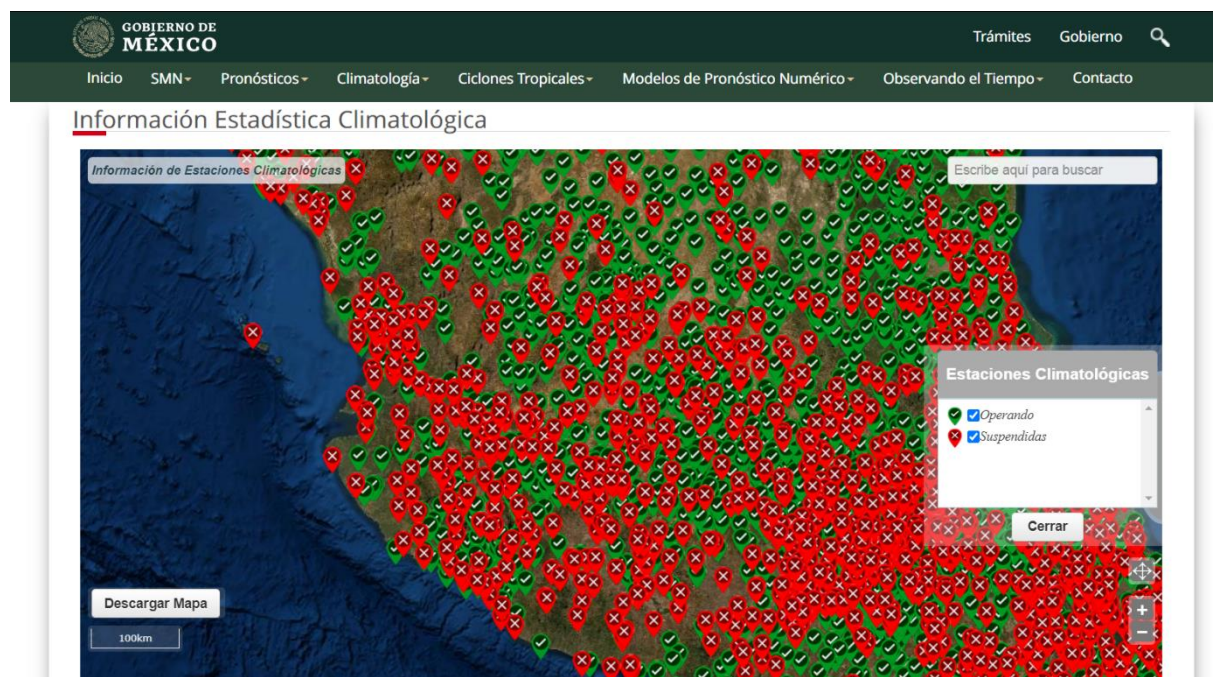


Figura 9. Identificación de estaciones meteorológicas suspendidas y en operación.

Al identificar las estaciones que se encuentran suspendidas mediante el programa ERIC III, se identificaron aquellas que tuvieran poblaciones y muestras aleatorias suficientes para el análisis. Conforme a la extracción de datos; se identificaron estaciones suspendidas que contaban con registros mínimos de 10 años o más lo cual era suficiente para tomarlas en cuenta, de otro modo aquellas estaciones que no cumplían los parámetros se fueron descartando.

Este procedimiento se realizó de manera manual y se analizaron todas las estaciones suspendidas posibles; tanto del estado propio como todas las estaciones ubicadas en zonas aledañas con el fin de abarcar toda la superficie posible del territorio estatal. En la Figura 10 se presenta un ejemplo de estación meteorológica suspendida con inconsistencia de datos.

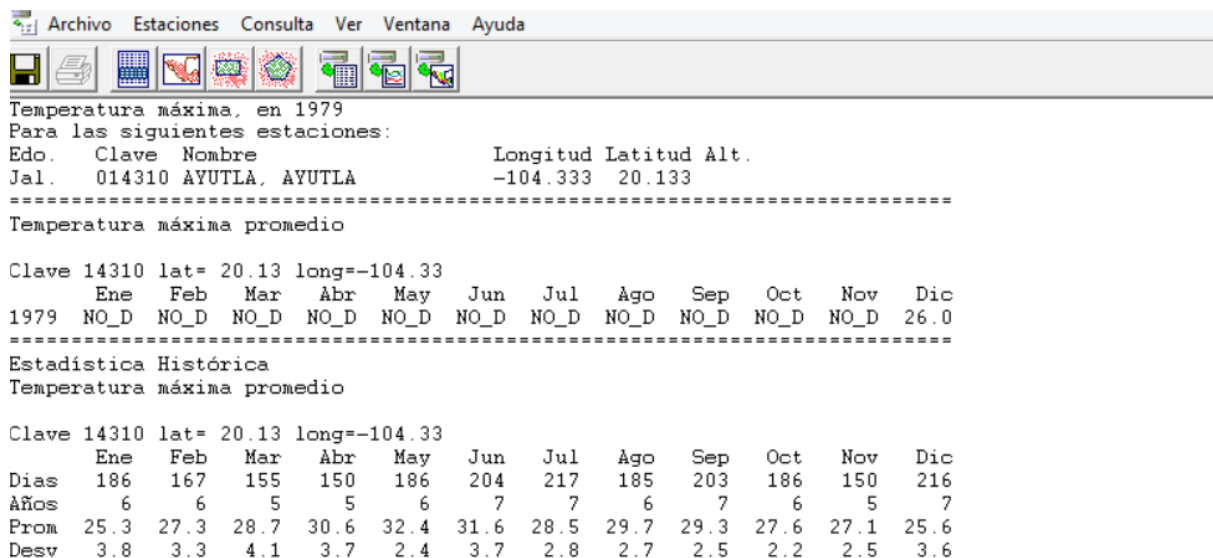


Figura 10. Estación 14310 Ayutla Jalisco.

Una vez terminado la sección de estaciones que se encuentran suspendidas, se procedió a la selección de estaciones en funcionamiento, en donde se identificaron aquellas que presentaban inconsistencia en sus registros (Figura 11), las cuales de igual manera fueron descartadas para el proceso de análisis.

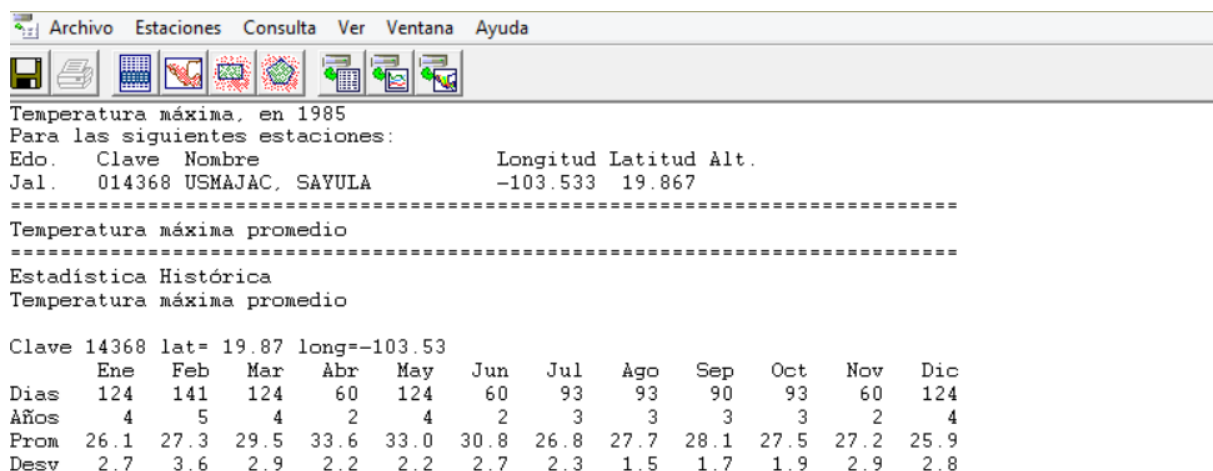


Figura 11. Estación 14368 Usmajac Jalisco.

5.8 Base de datos

Una vez terminada la selección de estaciones meteorológicas, se procedió a la creación de una base de datos con la ayuda del programa Excel 2016. En la base de datos se registraron

las variables: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación. Las cuales sirvieron para la creación de mapas y posteriormente la delimitación de las zonas agroclimáticas (Figura 12).

CLAVE	NOMBRE	COORDENADAS			MESES												MAX PROM
		LONGITUD	LATITUD	ALTITUD	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	
14002	ACATLAN DE JUAREZ	-103.583	20.433	1366	26.6	28.3	30.7	32.7	33.8	31.3	28.7	28.4	28.3	28.4	28.2	27	29.4
14004	AGOSTADERO,S.J.DE LOS L.	-102.3	21.417	1875	24.7	26.1	28.7	30.9	32.7	30.8	28.2	28.1	28.1	27.9	27.4	24.9	28.2
14005	AHUJULLO, TECALITLAN	-103.15	19.083	725	34.3	36	38.3	39.4	39.8	37.7	35.8	35.4	35.6	35.6	35.9	34.4	36.5
14006	AJIJUACAR, TEOCALICHE	-102.4	21.417	1745	24.9	26.9	29.6	31.7	33	30.8	28	28.1	27.8	27.9	27.1	25.2	28.4
14007	ALCHIUTLI, PURIFICACION	-104.567	19.933	900	31.7	32.6	33.5	35.6	38	36.1	33.9	33.8	33.6	33.8	32.7	32.3	34.0
14008	AMACUECA (DGE)	-103.433	20.033	1485	25.9	27.1	29.7	31.3	32.3	30.6	28.9	28.2	28.1	28.2	27.3	26	28.6
14009	AMECA	-104.05	20.55	1248	26.9	29	31.2	33.2	34.4	32.8	30.4	30.2	30	29.4	27.2	30.4	
14010	ANTONIO ESCOBEDO SMN	-103.95	20.767	1360	25.4	27.2	29.7	32.5	33.4	30.9	27.6	27.6	27.6	27.5	26.7	25.3	28.5
14011	APAZULCO, LA HUERTA	-104.883	19.3	500	32.2	32.6	32.8	33.2	34.1	34.5	34.2	34.1	33.4	33.8	33.3	32.4	33.4
14013	ATEMAJAC DE BRISUELA	-103.7	20.183	2065	19.2	20.5	22.7	25.2	26.9	25	22.7	22.3	21.7	21.3	20.3	19.2	23.2
14014	ATENGO (SMN)	-104.25	20.283	1300	26.4	27.6	28.9	30.9	32.4	31.5	29.4	29.6	29.3	29	27.9	27.1	29.2
14015	ATENGUILLO	-104.517	20.4	1320	28.1	29.5	31.7	33.6	34.7	32.1	29.3	29.7	29.4	29.6	29.2	27.8	30.4
14016	ATEQUIZA (CHAPALA)	-103.083	20.417	1521	25.5	27.5	30.2	32.3	33.3	30.6	27.7	27.6	27.4	27.6	27.1	25.6	28.5
14017	ATOTOMILCO	-102.517	20.567	1600	25.1	27	29.3	31.5	32.5	30.7	28	27.8	27.9	27.9	27	25.3	28.3
14018	ATOYAC	-103.517	20	1408	27.9	29.5	31.6	33.6	34.4	31.6	28.6	28.6	28.3	29	28.9	27.7	30.0
14019	AUTLAN	-104.367	19.767	688	28.1	29.2	31.3	32.9	33.6	32.1	30.7	30.5	30.4	30.5	29.8	28.2	30.6
14020	AYO EL CHICO	-102.333	20.533	1650	26.4	28	30.6	32.5	33.4	31	28.2	28.4	28.5	29.3	28.1	26.9	29.3
14021	AYOTITLAN, CUAUTITLAN	-104.2	19.5	1630	27.6	28.2	29	30.5	31.8	30.4	29.5	29.2	29	28.8	28.9	28.2	29.3
14023	BOLAÑOS	-103.8	21.817	850	29.6	32.2	35.2	37.5	39.2	37	33.3	33.3	33.4	33.7	32	29.4	33.8
14024	CAJON DE PEÑA, TOMATLAN	-105.067	20.033	35	31.3	32.6	33.8	35.1	35.8	35.1	33.7	33.4	32.9	33	32.4	31.3	33.4
14025	CALERA, TEOCALICHE	-103.15	20.467	1840	22.8	24.3	26.7	29.1	30.9	29.1	26	25.6	25.4	25.4	24.7	23.2	26.1
14026	CASA LLANTA, COLOTLAN	-103.367	22.05	1775	23.6	25.3	27.8	30.3	32.2	31.4	28.1	28.1	28.1	27.7	26.4	24	27.8
14027	CASIMIRO CASTILLO	-104.433	19.617	400	34.8	36.2	37.6	39.3	39.7	37.5	35.3	34.9	34.6	35.1	35.4	34.8	36.3
14028	CHIUTLAN (DGE)	-104.583	19.233	13	31.4	31.5	31.3	31.8	32.8	33.4	33.4	32.8	33.2	32.8	31.9	32.5	
14029	CONCEP. DE BUENOS AIRES	-103.3	20.1	2126	21.8	23.1	24.8	26.3	27	24.9	22.5	22.3	22.3	22.4	22.4	21.8	23.5
14030	CD, GUZMAN	-103.465	19.731	1515	25.3	27.6	29.1	30.6	32.7	30.5	28.6	27.8	27.4	27.9	27.3	25.3	28.3
14031	VENUSTIANO CARRANZA	-103.767	19.75	1250	27.9	29.4	31.4	33.3	33.8	31.1	28.8	29	28.8	29.4	29.4	28.1	30.0
14033	COMANUA DE CORONA	-101.75	21.317	1942	20.9	22.6	25.9	27.9	29.4	26.6	24	23.9	23.4	23.3	22.7	21.2	24.3

Figura 12. Base de datos en excel 2016.

Para la zonificación agroclimática del estado de Jalisco se seleccionaron 316 estaciones meteorológicas con un registro mínimo de 10 años. Esta selección está conformada por 220 estaciones del estado de Jalisco, 11 estaciones del estado de Aguascalientes, 7 estaciones del estado de Colima, 14 estaciones del estado de Guanajuato, 23 estaciones del estado de Michoacán, 11 estaciones del estado de Nayarit y 30 estaciones del estado de Zacatecas (Anexo 1).

Para la zonificación agroclimática del estado de Puebla se seleccionaron 227 estaciones meteorológicas con un registro mínimo de 10 años. Esta selección está conformada por 137 estaciones del estado de Puebla, 4 estaciones del estado de Guerrero, 7 estaciones del estado de Hidalgo, 5 estaciones del estado de México, 9 estaciones del estado de Morelos, 17 estaciones del estado de Oaxaca, 12 estaciones del estado de Tlaxcala y 36 estaciones del estado de Veracruz (Anexo 9).

5.9 Elaboración cartográfica

Para la elaboración de mapas, se utilizó el método kriging para la interpolación de las variables antes mencionadas, así pues, se obtuvieron valores de isotermas e isoyetas que posteriormente fueron convertidos a formato ráster para su mejor manipulación. Posteriormente los formatos ráster creados fueron reclasificados y convertidos a polígonos para llevar a cabo la superposición combinada de capas con el fin de determinar y delimitar todas aquellas zonas aptas, moderadamente aptas y no aptas para el cultivo de higo.

5.9.1 Modelo digital de elevación DEM

El modelo digital de elevación (DEM) fue elaborado para Jalisco y Puebla (Anexo 3 y 11) a partir de información tipo ráster proporcionada por el instituto nacional de estadística y geografía (INEGI), específicamente del continuo de elevaciones mexicano (CEM). El archivo tipo ráster contiene información topográfica que representa la superficie del terreno mediante coordenadas X, Y, Z. El ráster utilizado cuenta con una resolución espacial de 15 m, el cual es suficiente para representar elevaciones de cada entidad federativa (Figura 13).

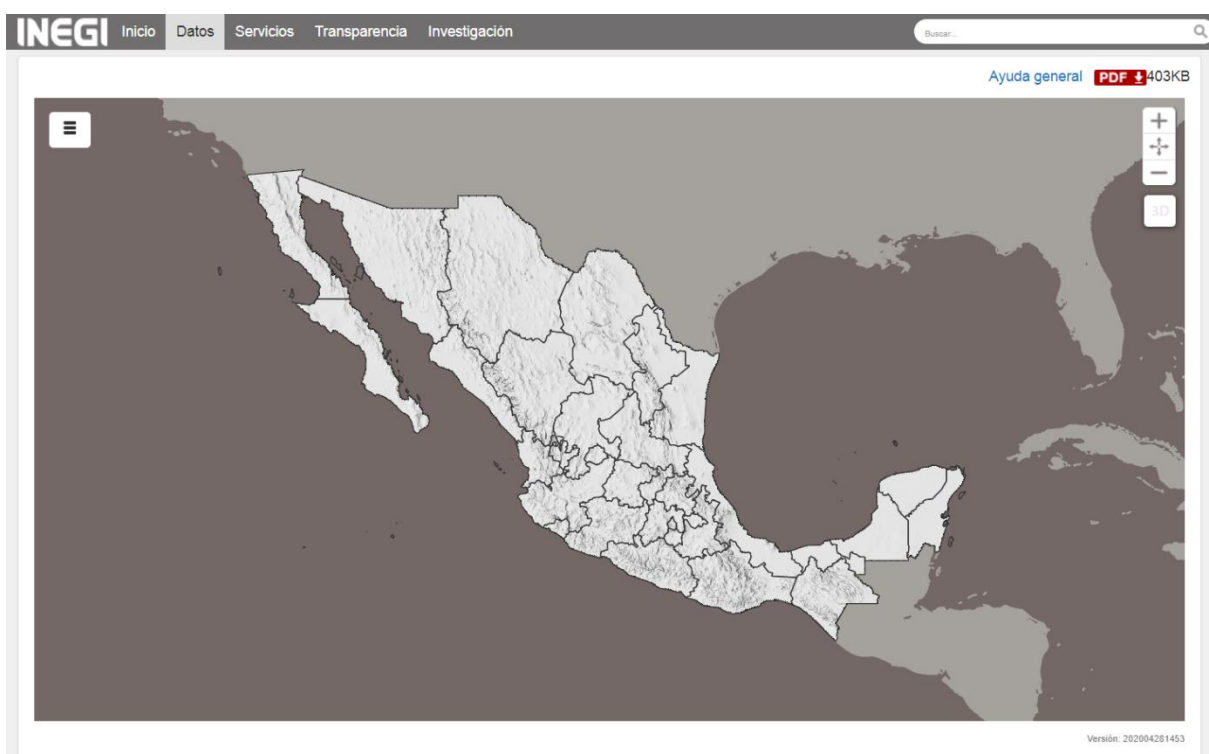


Figura 13. Vista previa del continuo de elevaciones mexicano.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Zonificación del estado de Jalisco para el cultivo de higo

6.1.1 Regiones administrativas

El estado de Jalisco cuenta con 12 regiones administrativas propuestas y delimitadas por el gobierno de ese estado (Anexo 2); regiones que sirven para identificar las áreas de estudio y delimitación de las zonas agroclimáticas para el cultivo de higo.

6.1.2 Temperaturas

6.1.2.1 Máximas

Para el estado de Jalisco los meses de mayo y junio son los más calurosos del año, presentando temperaturas máximas de 38.1 °C principalmente en las regiones de la Costa Sierra-Occidental, Costa Sur, Sierra de Amula, Valles y Sur (Anexo 4).

6.1.2.2 Medias

De igual manera los meses de mayo y junio son lo que mayores temperaturas medias presentan; con rangos de 32.1 °C a 27.5 °C principalmente en las regiones Costa Sierra-Occidental, Costa Sur, Sierra de Amula, Valles y Sur (Anexo 5).

6.1.2.3 Mínimas

Así mismo los meses de diciembre y enero son los que presentan menores temperaturas mínimas; con rangos de 4.7 °C a -0.8 °C principalmente en las regiones Altos Norte, Altos Sur, parte noroeste de la región Norte, parte norte de la región Ciénega y parte noreste de la región Costa-Sierra Occidental (Anexo 6).

6.1.3 Precipitaciones

El periodo de lluvias inicia a partir del mes de junio y concluye en el mes de octubre, presentando precipitaciones acumuladas de 400 mm por mes; principalmente en la región Costa Sierra-Occidental y la región Costa Sur (Anexo 7).

6.1.4 Delimitación de zonas

6.1.4.1 Zonas no aptas

Las zonas consideradas como no aptas para el cultivo (Figura 14) presentan temperaturas mínimas mensuales de -0.8 a 6 °C durante los meses de otoño e invierno, siendo el mes de enero el más crítico en cuanto a temperaturas mínimas registradas y probabilidades altas de heladas.

Estas zonas se encuentran más allá de los 2000 msnm. De acuerdo con el análisis realizado se categorizaron como zonas agroclimáticamente no aptas 3,404,739 ha, lo que representó un 43 % de la superficie estatal total. En estas zonas no se recomienda establecer el cultivo de higo a campo abierto, debido a que se busca la obtención de producción en la temporada invernal. Siendo así necesario establecer el cultivo bajo cubierta plástica o invernadero, con el fin de proteger la infrutescencia.

6.1.4.2 Zonas moderadamente aptas

Las zonas moderadamente aptas (Figura 14) se definen por presentar temperaturas mínimas mensuales entre 6 a 12 °C durante la época de otoño e invierno. La probabilidad de heladas para estos territorios es moderada por lo que será necesario hacer valorizaciones más específicas a nivel municipio, ejido, localidad o predio para decidir si el cultivo se puede establecer a campo abierto o bajo cubierta plástica (invernadero o macro túnel). Estas zonas oscilan entre los 1500 a 1900 msnm. De acuerdo con los datos obtenidos se consideró una superficie de 3,202,343 ha, como moderadamente apta, lo que representó un 41 % de la superficie estatal total.

6.1.4.3 Zonas aptas

Se considera como zonas aptas (Figura 14) aquellas que presentan temperaturas mínimas mensuales mayores a 12 °C durante otoño e invierno y con probabilidades bajas de heladas. Por otro lado, el rango de precipitación acumulada para estas zonas es de 600 a 700 mm anuales y una altura sobre el nivel del mar no mayor a los 1400 metros. De acuerdo con los parámetros anteriores se clasificaron como zonas agroclimáticamente aptas 1,251,890 ha, lo que representó un 16 % de la superficie estatal total. Estas zonas se caracterizan por permitir que la planta tenga un constante crecimiento y por ende una mayor duración del ciclo productivo, evitando así que la planta entre en reposo.

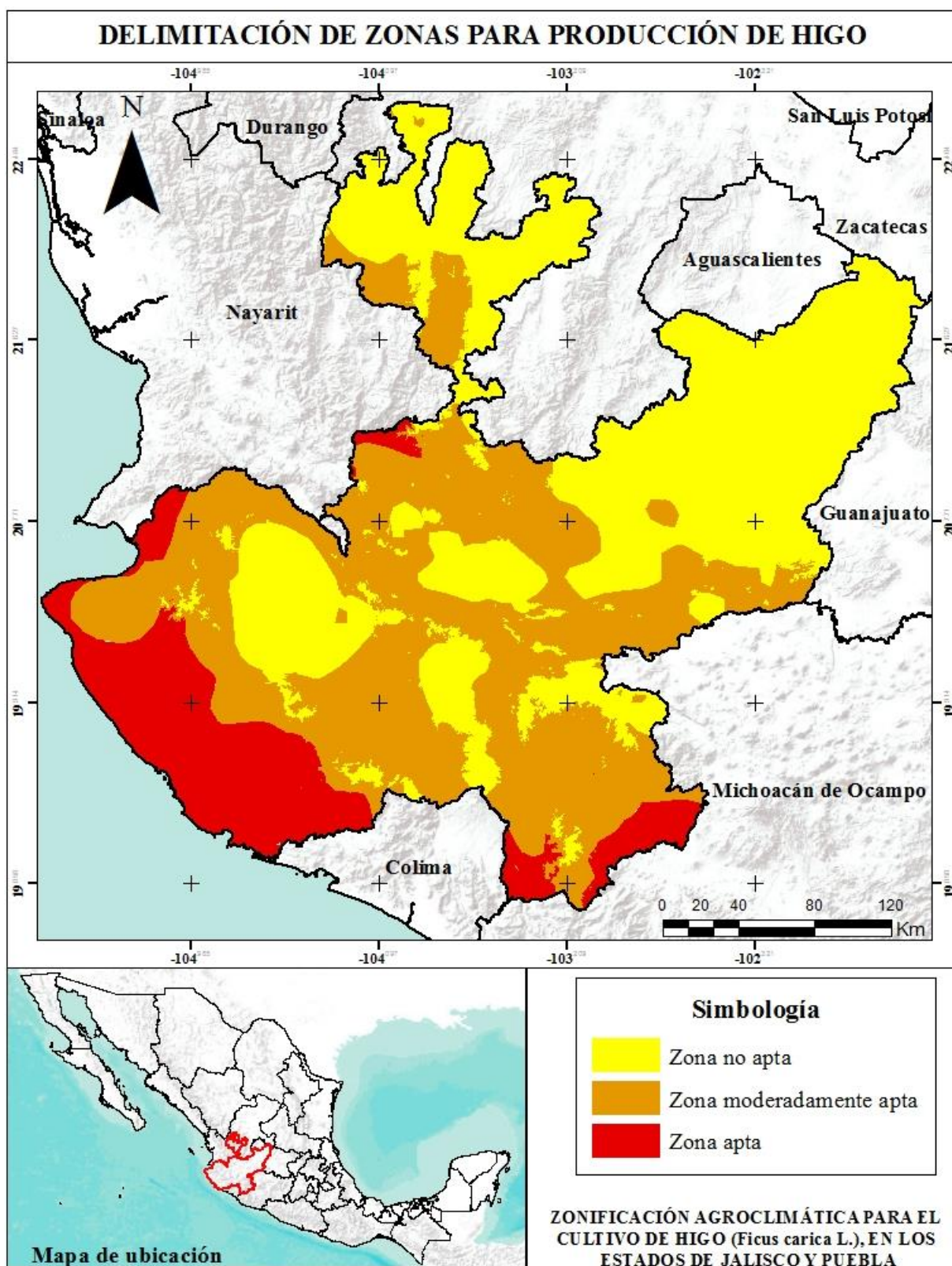


Figura 14. Delimitación de zonas para producción de higo en el estado de Jalisco

6.1.5 Periodo de crecimiento

Dentro de la distribución espacial del número de días de periodo de crecimiento, la región costa sur presenta el mayor número de días, con un rango entre 139 - 242 días (Figura 15-A).

6.1.6 Periodo libre de heladas

Por otro lado, se muestra la distribución espacial del número de días de periodo libre de heladas (Figura 15-B). La región costa sur del estado tiene una probabilidad de incidencia de heladas baja con entre 313 - 359 días sin heladas.

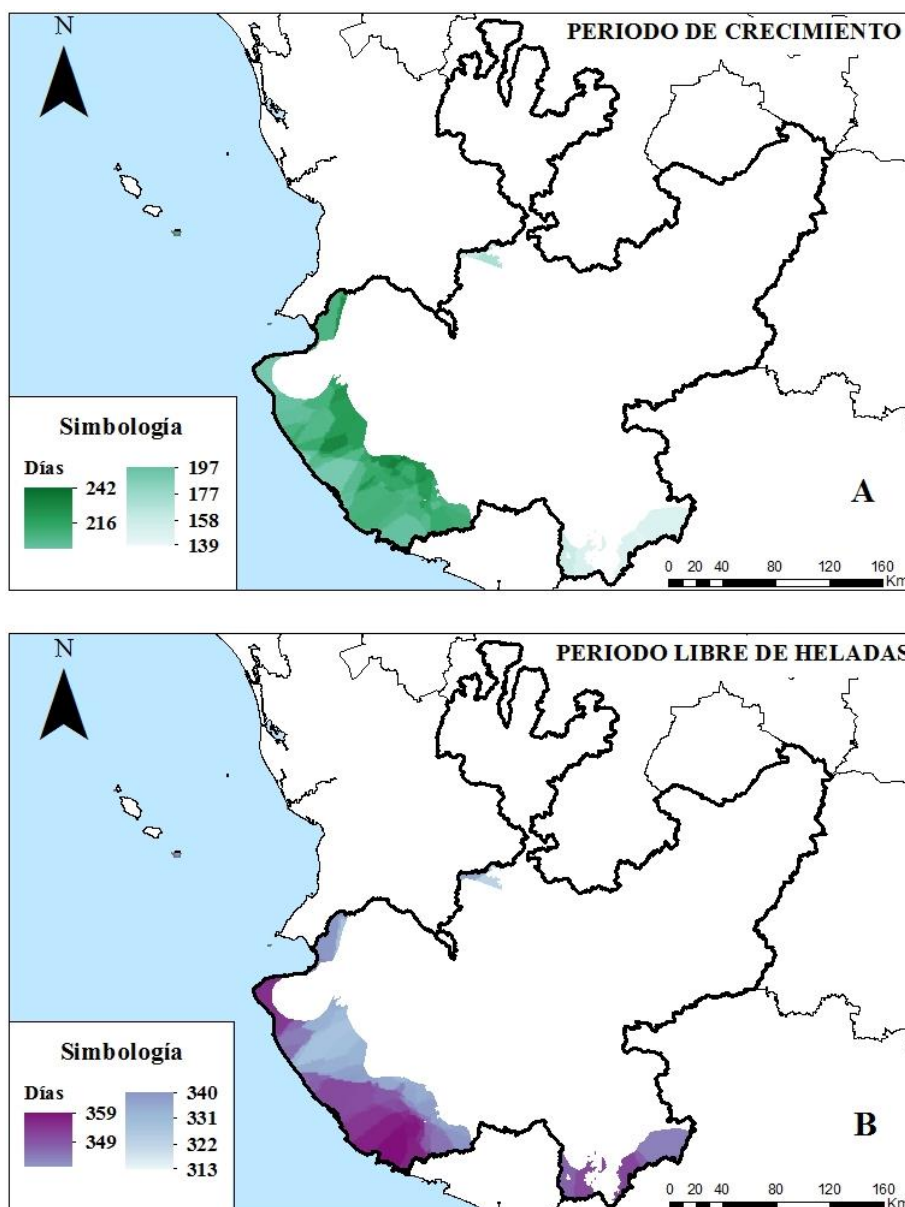


Figura 15. Distribución espacial del periodo de crecimiento y periodo libre de heladas

Ferguson *et al* (1990) expresan que el crecimiento de la higuera está más limitado por bajas temperaturas invernales que por el calor del verano ya que las bajas temperaturas son un factor limitante, particularmente en arboles jóvenes que puedan no resistir cambios drásticos de temperaturas (heladas). Comúnmente las regiones productoras se caracterizan por veranos secos y calurosos, con baja humedad relativa e inviernos benignos. Así mismo, se indica que cuando se cultiva en áreas más frías, a menudo se ve afectada por heladas tempranas o tardías que matan ramas más jóvenes y pueden dañar brotes vegetativos y brotes de los siconos.

Flaishman (2002) menciona que las temperaturas invernales bajas (5 a 10 °C) ralentizan la maduración de la fruta durante ese período, mientras que el aumento de la temperatura a inicios de la primavera (13 a 22 °C) conduce a un crecimiento reanudado y a la maduración del fruto. También manifiesta que la caída de las temperaturas en otoño detendrá el crecimiento de los brotes vegetativos y reproductivos por lo que se desarrollará un brote terminal típico. Este proceso afectará la producción de cultivos de otoño tardío. En áreas con temperaturas mínimas superiores a 12 °C, las higueras producen frutos de noviembre a enero y la maduración de la fruta continuará hasta la caída de las hojas.

Según Condit (1947) el clima afecta notablemente el sabor, tamaño, forma y el color de la piel, así como la pulpa de los higos. Los climas más fríos producen frutos de pieles más verdes, a diferencia de climas cálidos donde la piel del fruto es más oscura, colores de pulpa más vivos y frutas más grandes y alargadas. Khemira (2017) argumenta que en climas templados los entrenudos de la planta se acortan y por consecuencia la planta adquiere una forma tupida y no es capaz de llenar el espacio asignado para su crecimiento. También hace mención de que en estos climas los frutos son de tamaño medio a pequeño (<45 g) y de sabor ligeramente amargo por lo que este tipo de frutos solo pueden ser comercializados a nivel local. Melgarejo (1999) argumenta que a temperaturas superiores a 38 °C pueden provocar caída de siconos produciendo una falsa madurez del fruto.

6.2 Zonificación del estado de Puebla para el cultivo de higo

6.2.1 Regiones administrativas

El estado de Puebla cuenta con siete regiones administrativas; las cuales fueron delimitadas por el gobierno de dicha entidad (Anexo 10), regiones utilizadas para identificar las áreas de estudio y delimitación de las zonas agroclimáticas para el cultivo de higo.

6.2.2 Temperaturas

6.2.2.1 Máximas

Para el estado de Puebla los meses de junio y julio son los más calurosos del año, presentando temperaturas máximas de 39.1 °C principalmente en zonas de la parte baja del norte del estado, en los límites con el estado de Veracruz (Sierra Norte y Sierra Nororiental), así como la parte suroeste en la región Mixteca, Valle de Atlixco y Matamoros (Anexo 12).

6.2.2.2 Medias

De igual manera los meses de mayo, junio y julio son los que mayores temperaturas medias presentan; con rangos de 25.7 °C a 30.1 °C, principalmente en zonas de la parte baja del norte del estado, zonas aledañas con el estado de Veracruz (Sierra Norte y Sierra Nororiental), así como las regiones de la Mixteca, Valle de Atlixco y Matamoros (Anexo 13).

6.2.2.3 Mínimas

Por otro lado, los meses de diciembre y enero son los que presentan menores temperaturas mínimas; con rangos de -0.7 a 4.1 °C principalmente en la parte norte de la región Angelópolis limítrofe con el estado de Tlaxcala y en gran parte de la región Serdán y Valles Centrales (Anexo 14).

6.2.3 Precipitaciones

El periodo de lluvias inicia a partir del mes de junio prolongándose hasta el mes de noviembre, presentando el mayor volumen de precipitaciones en los meses de julio, agosto y septiembre en donde se tienen lluvias acumuladas mayores a 600 mm; esto se presenta en municipios que pertenecen a la región Tehuacán y Sierra Negra (Coyomeapan, Eloxochitlán, San Sebastián Tlacotepec y Zoquitlán) (Anexo 15).

6.2.4 Delimitación de zonas

6.2.4.1 Zonas no aptas

Las zonas consideradas como no aptas para el cultivo (Figura 16) presentan temperaturas mínimas mensuales de -0.7 a 6 °C durante los meses de otoño e invierno siendo el mes de diciembre el más crítico en cuanto a temperaturas mínimas registradas y probabilidades altas de heladas. Lo que limita el establecimiento de cultivo a campo abierto en estas zonas, debido a que una de las ventanas más importantes de venta se centra en este periodo, siendo necesario establecer el cultivo bajo cubierta plástica o invernadero, con el único fin de proteger el “fruto”. Estas zonas se encuentran sobre los 2000 msnm. Las zonas agroclimáticamente no aptas acumulan una superficie de 2,136,435 ha, lo que representa un 61 % de la superficie total del estado.

6.2.4.2 Zonas moderadamente aptas

Las zonas moderadamente aptas (Figura 16) se definen por presentar temperaturas mínimas mensuales entre los 6 a 12 °C durante la época de otoño e invierno. La probabilidad de heladas para estos territorios es moderada por lo que será necesario hacer valorizaciones más específicas a nivel municipio, ejido, localidad o predio para decidir si el cultivo se puede establecer a campo abierto o bajo cubierta plástica (invernadero o macro túnel). Estas zonas oscilan entre los 1500 a 1900 msnm. Las zonas moderadamente aptas comprenden una superficie de 1,213,480 ha, lo que representa un 35 % de la superficie total del estado.

6.2.4.3 Zonas aptas

Una zona apta para el cultivo de higo (Figura 16) se caracteriza por presentar temperaturas mínimas mensuales mayores a 12 °C durante otoño e invierno y con probabilidades bajas de heladas; lo cual permite que la planta siga en constante crecimiento y por ende la producción de esta no se detendrá, evitando así que la planta entre a estado de reposo. Así mismo el rango de precipitación acumulada para estas zonas es de 600 a 700 mm anuales y una altura sobre el nivel del mar no mayor a los 1400 metros. El estado de Puebla cuenta con una superficie de 139,589 ha considerada como apta para el cultivo de higo, lo que representa un 4 % de la superficie estatal total.

Cabe resaltar que la delimitación de estas zonas (no aptas, moderadamente aptas y aptas) para el cultivo de higo se realizó tomando en consideración un periodo de alta demanda de producción, lo que representa una de las ventanas de mejor precio del mercado. Sin embargo,

hay que considerar que el ciclo del cultivo puede adaptarse, dependiendo de la región y a las mejores condiciones climáticas presentes.

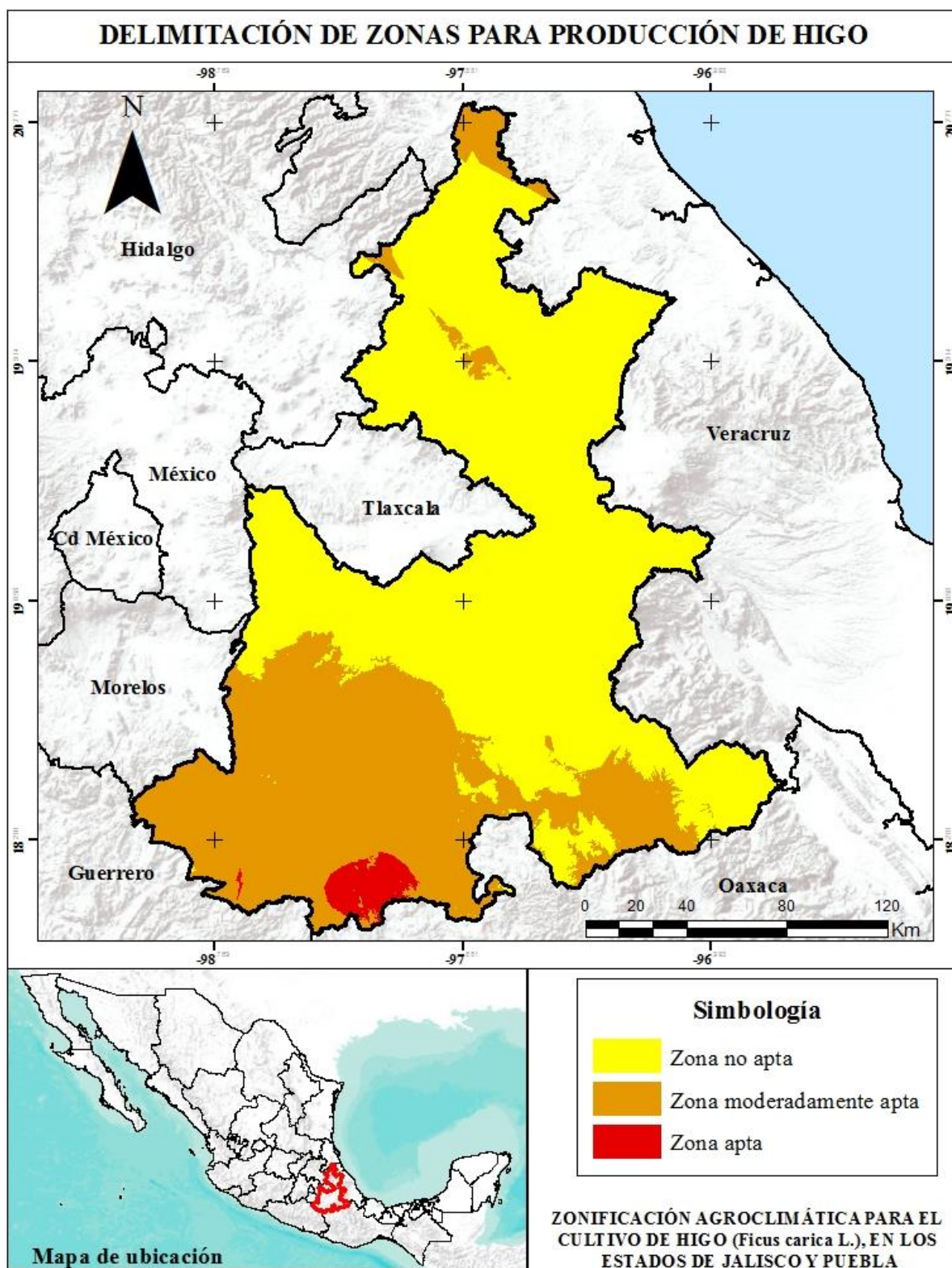


Figura 16. Delimitación de zonas para producción de higo en el estado de Puebla

6.2.5 Periodo de crecimiento

En la Figura 17-A se muestra la distribución espacial del número de días de periodo de crecimiento, donde parte de la región mixteca se presentan mayor número de días los cuales van desde 86-128 días.

6.2.6 Periodo libre de heladas

Por otro lado, se muestra la distribución espacial del número de días de periodo libre de heladas (Figura 17-B). Parte de la región mixteca tiene probabilidades de incidencia de heladas relativamente baja con entre 276-361 días sin heladas.

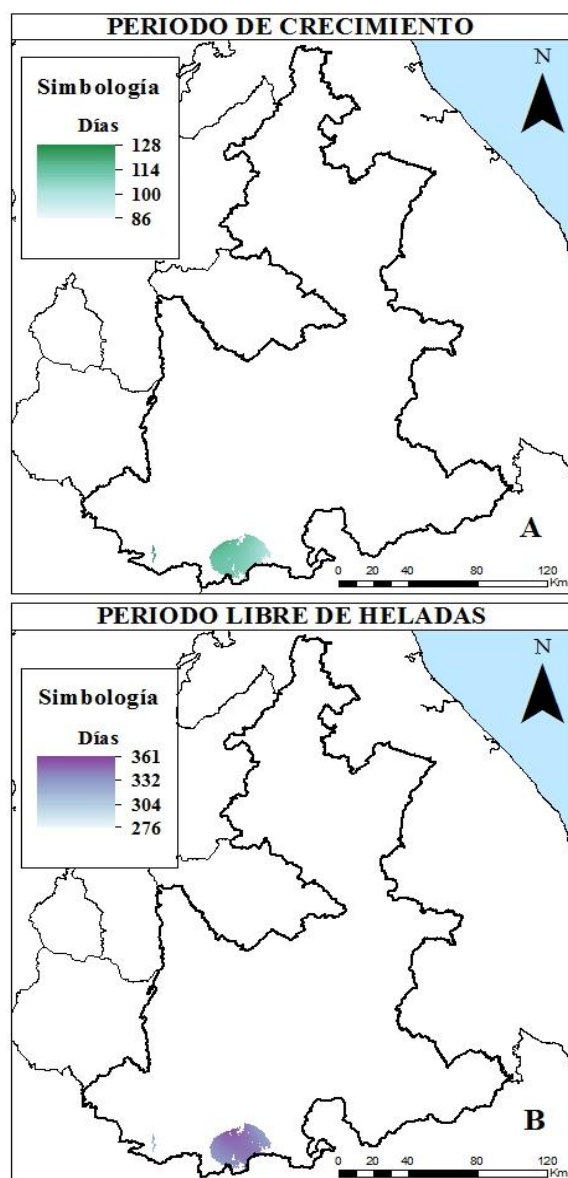


Figura 17. Distribución espacial del periodo de crecimiento y periodo libre de heladas

El aspecto más difícil de discutir y que tiene relación directa sobre el crecimiento, desarrollo y productividad de las especies frutales es el clima ya que este se encuentra en constante cambio durante todo el ciclo del cultivo. Todos los aspectos del crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas son influenciados directa o indirectamente por las variables ambientales. Las condiciones climáticas influyen sobre el tamaño de la planta, fenología, duración del tiempo de desarrollo, maduración y tamaño de los frutos, así como las épocas de producción y cosecha (Fischer, 2012).

El clima conlleva una serie de riesgos previsible derivados de las relaciones planta-atmosfera, como el régimen de lluvias, sequias, temperaturas, humedad relativa, entre otros, pero también conlleva otros derivados de situaciones extremas y, por tanto, imprevisibles, como heladas, tormentas, granizadas y que si no son tomadas en cuenta pueden ser un limitante grave para el cultivo y por ende inviable económicamente (Agustí, 2010).

Agustí (2010) menciona que la latitud y altitud son los principales factores que condicionan todas las variables climáticas, es decir al aumentar la latitud la duración del día y de la noche cambian, los días de verano son tanto más largos y los de invierno tanto más cortos cuanto mayor es la latitud, y estas variaciones modifican sensiblemente el régimen térmico. Pero junto a la influencia de la temperatura, debe incluirse la importancia de la longitud del día, ya que algunas especies exigen un acortamiento de la duración del día a finales de verano para que los mecanismos de abscisión foliar, de reposo y de endurecimiento invernal puedan actuar. Si no fuera así, esas especies no podrían sobrevivir a heladas moderadas de principios de invierno; del mismo modo, algunas otras especies de hoja caduca cultivadas en los trópicos a poca altitud tienden a ser de hoja perenne, ya que no reciben las señales ambientales necesarias para desprenderse de sus hojas y entrar en latencia.

El efecto de la temperatura sobre el crecimiento y la productividad de las especies frutales es el más complejo de la ecofisiología, ya que este factor interviene en todos los procesos metabólicos y fisiológicos de la planta (Gariglio *et al.*, 2007). El aumento o descenso puede desencadenar en una serie de procesos fisiológicos y metabólicos que alteran así la productividad de la planta, tal y como lo menciona Fischer (2012) en donde el aumento de las temperaturas a más de 35 °C, tanto la fotosíntesis como la respiración son inhibidas, pero en la medida en que aumenta la temperatura las tasas fotosintéticas disminuyen antes que las respiratorias. En zonas muy cálidas los rendimientos pueden verse afectados por el cuajamiento

insuficiente de los frutos o por el aumento de su caída. Así mismo en estas zonas los frutos presentan un desarrollo morfológico-bioquímico acelerado, pueden tener un calibre mayor, acidez y aroma elevados, pero son más propensos a una degradación rápida en almacenamiento, comparados con frutos de zonas más templadas. Temperaturas de 25 a 30 °C se consideran óptimas para la actividad fotosintética, mientras que temperaturas inferiores a 15 °C o superiores a 35 °C la reducen progresiva y significativamente (Agustí, 2010).

Las temperaturas altas durante las últimas semanas del crecimiento del fruto favorecen la degradación de los ácidos orgánicos en él; en la medida en que la temperatura en el huerto incrementa, los ácidos orgánicos sirven como sustrato de respiración, sin degradar los carbohidratos, originando frutos de poco sabor; este fenómeno es todavía más acentuado cuando existe estrés. Así mismo, las temperaturas nocturnas elevadas causan una degradación rápida de las sustancias elaboradas de los fotoasimilados, disminuyendo el llenado y la calidad del fruto (Fischer, 2012).

Las altas temperaturas también aumentan el déficit de presión de vapor y, por ende, se incrementa la transpiración. Si la situación descrita se mantiene en el tiempo, provoca un cierre parcial o total de estomas, un aumento de la temperatura foliar y el agravamiento del estrés por altas temperaturas. En estos casos, normalmente con temperaturas por encima de los 35 °C, se puede producir el marchitamiento de brotes y hojas tiernas, que posteriormente se necrosan, toman una coloración atabacada, y finalmente se caen (Gariglio *et al.*, 2007). En el caso de que se cultiven frutales en sitios más cálidos que los recomendados o cuando se presentan épocas largas con altas temperaturas, el crecimiento vegetativo de la planta se hace más acentuado, con un costo para la producción y calidad de frutos (Fischer, 2012).

Sin embargo, los cambios bruscos de temperatura ejercen igual o mayor influencia sobre el comportamiento de las plantas. El factor ambiental más limitante para los frutales tropicales son las bajas temperaturas ya que estas condicionan su correcto crecimiento y desarrollo. Temperaturas inferiores a 10 °C pueden afectar a plantas sensibles al frío, y aquellas plantas susceptibles o no; heladas de 0 °C pueden dañar órganos de importancia o quemarlos completamente. El periodo térmico diario es un factor importante en la pigmentación del fruto, siendo las zonas con climas más frescos las más idóneas para producir los frutos mejor coloreados. Uno de los efectos más notorios de las bajas temperaturas es en el desarrollo y

cuajado de frutos puesto que temperaturas de 0 °C afectan seriamente la permeabilidad cuticular del fruto, quemaduras del fruto, deformaciones y caídas de estos (Agustí 2010).

En general, con el aumento de la latitud, la altura sobre el nivel del mar y la distancia de la costa se disminuyen las temperaturas y se incrementa la ocurrencia del frío y por consiguiente heladas; sin embargo, estos factores macroclimáticos influyentes pueden ser modificados por la topografía y la vegetación del terreno. Otros factores que modifican la influencia de las bajas temperaturas son el viento, humedad relativa, morfología de la planta y la densidad de plantación (Fischer, 2012).

La resistencia al frío de las diferentes especies frutales se halla ligada al proceso de adaptación que la especie ha sufrido en el hábitat donde se encuentra; tal es el caso de las especies de hoja caduca, las cuales son las más resistentes a las bajas temperaturas, pero en cambio las especies de hoja perenne y aquellas cuyos frutos maduran en invierno son las más sensibles. La resistencia al frío durante el invierno depende de factores nutricionales, fisiológicos y ambientales, por lo que resulta muy difícil establecer la respuesta de la planta a una escala de temperaturas que es variable, por otro lado, entre especies y hasta entre variedades.

En general, las especies bien adaptadas y con el ambiente climático favorable, será posible predecir etapas fenológicas sin hacer un seguimiento estricto de la evolución de las temperaturas. Pero cuando algunas especies adaptadas a latitudes y altitudes bajas se establecen y cultivan en zonas de heladas primaverales, el peligro de que la cosecha se pierda es elevado ya que estas especies son capaces de romper su latencia tras un corto periodo de elevación de las temperaturas, por lo que brotan demasiado pronto para la zona en que se encuentran, con lo que las hojas, yemas, brotes vegetativos, flores, frutos se hielan a menudo. La situación se agrava si, además, la especie es poco exigente en frío (Agustí, 2010).

Así pues, la precipitación también surte efecto positivo o negativo en el crecimiento y producción de los frutales, Agustí 2010 menciona que, en años de lluvia escasa, los frutos son de tamaño reducido, así como el crecimiento y características internas del mismo. Pueden verse afectados la acidez libre y el contenido en sólidos solubles totales se reducen cuando se presentan lluvias intensas durante los meses anteriores y durante la recolección. Así mismo cuando las lluvias coinciden con la plena floración, la polinización puede verse comprometida, particularmente si estas se llegan a prolongar, las abejas reducen su actividad y debido a las condiciones de alta humedad la proliferación de hongos principalmente afecta directamente la

calidad y cantidad de fructificación; otro problema directo con las lluvias son los agrietamientos de frutos (Agustí, 2010).

Si la precipitación es en forma de granizo, los frutos, flores, hojas, tallos, ramas son heridos por impactos bruscos que son variables con el tamaño del granizo, pueden llegar a poner en riesgo la integridad de la planta o árbol, principalmente los más jóvenes, en estado de floración y con frutos recién cuajados. Después de este fenómeno existe el grave peligro de enfermedades fungosas y bacterianas, como consecuencia del gran número de lesiones y del alto nivel de humedad en el ambiente luego de las granizadas. Cuando las precipitaciones llegan a ser escasas la fotosíntesis se reduce, el desarrollo vegetativo se detiene, el fruto apenas crece y en casos extremos puede verse comprometida la vida del árbol. Para estas situaciones es cuando se acude a suplir esas demandas hídricas con el empleo del riego (Fischer, 2012).

Otro elemento importante para considerar es la humedad relativa del ambiente ya que es un factor decisivo de la producción, principalmente en el cuajado de frutos, los cuales exigen humedades relativas moderadas (Agustí, 2010). En los frutales una HR de 60-80% es adecuada para la mayoría de las especies. Una HR elevada mayor al 90% dificulta la transpiración, originando una absorción deficiente de los nutrientes; también afecta la aspersión correcta de agroquímicos, la transferencia del polen y el vuelo de las abejas; mientras que una HR menor al 40% combinada con vientos calurosos, causa marchitez de las flores, deshidratación, disminución de la fotosíntesis y muerte de brotes tiernos. Humedades ambientales altas crean condiciones favorables para la propagación y mayor incidencia de enfermedades fungosas, bacterianas y de múltiples plagas. Cuando se tengan periodos prolongados de HR alta, es aconsejable establecer plantaciones con un marco de plantación mayor para garantizarles mayor aireación a los árboles (Fischer, 2012).

6.3 Épocas de establecimiento, desarrollo, cosecha y podas

Para poder tener producción en la ventana de exportación de invierno y primavera, se propone establecer y manejar el cultivo en forma de arbusto (ciclo de producción más corto); para ello se hace la propuesta de las siguientes épocas para el ciclo productivo de la higuera. Cabe mencionar que esta propuesta es netamente informativa y puede variar dependiendo la región climática, altura sobre el nivel del mar, incidencia de heladas, entre otras variables ambientales. Esta propuesta está detallada para todas aquellas zonas agroclimáticamente aptas.

6.3.1 Plantación o establecimiento

El establecimiento del cultivo se puede llevar a cabo en la segunda semana de mayo, más específicamente en la semana 20 del año.

6.3.2 Crecimiento vegetativo

Posterior al establecimiento, se tienen 11 semanas de crecimiento vegetativo que comprenden desde la semana 21 hasta la semana 32 (mediados de mayo hasta inicios de agosto) en donde la planta comienza a desarrollar ramas y hojas nuevas, que a su vez van desarrollando brotes o chupones que también serán productivos, pero de menor importancia que las ramas principales, en esta etapa se pretende hacer crecer la planta a una altura máxima de 1.8 metros, con entrenudos de 7 cm en promedio y dejando de 5 a 6 ramas productivas principales. Una altura de 1.8 metros se considera óptima para facilitar labores de cosecha, aplicaciones foliares, raleos, tutoreo, entre otras actividades relacionadas al cultivo. Así mismo en esta etapa del cultivo las ramas principales y productivas se lignificarán con el fin de tener troncos firmes y maduros listos para iniciar la siguiente etapa del cultivo.

6.3.3 Diferenciación del cultivo

La diferenciación del cultivo será cuando la planta cambie de vegetativo a la brotación de las infrutescencias, esta etapa comprende desde la semana 33 a la semana 49 (segunda semana de agosto hasta segunda semana de diciembre), es decir 16 semanas activas en donde la infrutescencia crecerá y se desarrollará para posteriormente iniciar cosecha del cultivo.

6.3.4 Producción

La producción del cultivo se dará desde la semana 50 (mediados de diciembre) hasta mayo del siguiente año, es decir se tienen aproximadamente 22 semanas productivas en donde la cosecha del cultivo será constante y con producción uniforme.

6.3.5 Podas

Las podas serán condicionadas por la demanda del fruto a nivel internacional, es decir las podas se pueden programar dependiendo los tiempos que la comercializadora establezca, esta poda se puede proponer para llevarse a cabo los meses de junio y julio.

VII. CONCLUSIONES

Según la combinación y delimitación de variables ambientales idóneas y específicas del higo, agroclimáticamente las mejores zonas para poder establecer el cultivo de la higuera (*Ficus carica* L.) son aquellas que reúnen todas las características de climas mediterráneos, es decir inviernos benignos, con pocas probabilidades de heladas y con temperaturas estables durante todo el año, las cuales permiten que el cultivo siga en constante crecimiento y desarrollo. Para el estado de Jalisco estas condiciones se tienen principalmente en las regiones costa sur, parte baja de la región costa sierra-occidental y parte baja de las regiones sur y valles representando un 16 % de la superficie estatal total. Para el estado de Puebla se tiene la parte más baja de la región mixteca representando solamente un 4 % de la entidad.

Con el uso y aplicación de sistemas de información geográfica fue posible agrupar y delimitar todas aquellas zonas óptimas para el establecimiento de este frutal, que sirve como base para la identificación de dichas zonas y que puede ser una herramienta de gran ayuda para futuros proyectos relacionados al cultivo que permitan tener una mejor planeación referente al ciclo de producción, y que además deja disponible el conocimiento sobre la ecofisiología del higo lo que permite establecer los principios básicos para otras delimitaciones en demás estados productores, regiones, municipios, ejidos, localidades y predios.

VIII. LITERATURA CITADA

- Agustí M. 2010. Fruticultura. Vol 1. Agustí M. 2^{da} edición. Ediciones mundi prensa. España. pp: 49-68.
- Andrade, I., Carvalho, D., Almeida, W., Gonçalves, J., Duarte, L. 2014. Water requeriment and yield of fig tree under different drip irrigation management. *Engenieria Agricola*. V. 34. pp: 17-27.
- Anguiano-Contreras, J., Coria-Avalos, V.M., Ruíz-Corral, J.A., Chávez-León, G., Alcántar-Rocillo, J.J. 2003. Caracterización edáfica y climática del área productora de aguacate *Persea americana* cv. "hass" en Michoacán, México. Proceedings V World Avocado Congress (Actas V Congreso Mundial del Aguacate). pp. 323-328.
- Assaf, R. 2001. Selección des varietes locales et techniques de culture du figuier en Israel. *Fruits*. 56 (2): 101-121.
- Bhunja, G. S., Shit, P. K., Maiti, R. 2018. Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. King Saud University & Saudi Society of Agricultural Sciences, 17(2), pp. 114–126.
- Botti C., Muchnik, E. 2000. Fig production in Latin America. Fac. Ciencias Agrarias y Forestales Fac. Agronomía e Ingeniería Forestal Universidad de Chile Pontificia Universidad Católica Casilla 1004, Santiago Casilla 306, Santiago. pp: 37-41.
- Botti, C., Franck, N. L., Prat, D., Ioannidis C. N., Morales. B. 2003. The effect of climatic conditions on fresh fig fruit yield, quality and type of crop. *Acta Hort*. 605:37–44.
- Burrough, P.A., 2001. GIS and geostatistics: essential patners for spatial analysis. In: *Environmental and Ecological Statistics*. Burrough P.A. (ed.) Vol. 8. Kluwer Academic Publishers, pp: 361–377.
- CABI. 2019. Invasive Species Compendium. Detailed coverage of invasive species threatening livelihoods and the environment worldwide. *Ficus carica* (Common Fig). En línea: <https://www.cabi.org/isc/datasheet/24078#toclimate> Consultado: Enero de 2019.
- Cano, P. A., Martínez, B. O. U. 2007. Determinación de áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones de sotol (*Dasyilirion cedrosanum* trel.) en el estado de Coahuila. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Saltillo. Folleto Técnico Núm. 31. Coahuila, México. 48 p.

- Castillo, F. E., Sentís, F. C., Bosch, S. A., Cusidó, F. J. A., Sánchez, J. J., Ferreres, S. E., Gómez-Arnau, A., López, G. F., Martínez, C. J. A., Pérez, G. P. J., Porta, C. J., Porta, M. P., Villar, M. J. 2001. Agrometeorología. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida. Ediciones Mundi-Prensa. 2ª edición. pp: 447-450.
- Costa, A. 2019. El cultivo de la higuera en el campo de Albaterra. Arganda del Rey, Madrid, España. Ediciones Nobel, S. A. Newton Publicaciones.
- Condit, I. J. 1947. The fig. Massachusetts: Chronica Botanica Waltham, MA.
- Condit, I. J. 1955. Fig varieties: a monograph; *Hilgardia*. Vol: 23. Pp: 323-538.
- Da Silva, G.B., Azevedo, P.V. 2000. Potencial edafoclimático da “Chapada Diamantina” no estado da Bahia para cultivo de Cítrus. *Rev. Brasileira de Agrometeorología* 8: 133-139.
- ESRI, 1995. Understanding GIS: The Arc/Info Method Self-study workbook PC version. Environmental Systems Research Institute. USA. Chapter: p. 1-10.
- FAO. 1994. AEZ in Asia. Proceedings of the regional workshop on Agro-Ecological Zones Methodology and Applications. Bangkok, Thailand, 17-23 November 1991. World Soil Resources Report 75. Rome, FAO.
- FAO. 1997. Zonificación Agroecológica, guía general. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Servicio de recursos, manejo y conservación de Suelos boletín de suelos número 73. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas.
- FAOSTAT. 2019. Producción mundial de cultivos. En línea: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>. Consultado: 1 de diciembre de 2020.
- Ferguson, L., Michailides, T.J., Shorey, H.H. 1990. The California fig industry. *Horticulture Rev*: 12. pp: 409 – 411.
- Fischer G., J.O. Orduz-Rodríguez. 2012. Ecofisiología en frutales. *In*: Manual para el cultivo de frutales en el trópico. Fischer G., J.O. Orduz-Rodríguez. (ed). Primera edición. Bogotá, Colombia. pp: 54-72.
- Flaishman, M. A., Al Hadi, F.A. 2002. Fig growth in Israel. *Alon Hanotea*. Vol: 56. pp 56–57.
- Flaishman, M. A.; V. Rodov; E. Stover. 2008. The fig: botany, horticulture, and breeding. *Horticultural Reviews*. 34: 113-196.
- Flores, D. A. 1990. La higuera. Frutal mediterráneo para climas calidos Mundi-Prensa. Madrid. 190 pp.

- García-Barreda, S., Sánchez, S., Marco, P., Serrano-Notivol, R. 2019. Agro-climatic zoning of Spanish forests naturally producing black truffle. Unidad de recursos forestales, centro de investigación y tecnología agroalimentaria de Aragón (CITA), Instituto Alimentario de Aragón – IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza). *Agricultural and Forest Meteorology* 269-270.
- García, S. F. 2011. Cultivos de uso recreativo adaptado a colectivos con discapacidad. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Politécnica Superior de Gandía. pp: 72-78.
- García, R. M.T. 2014. Caracterización morfológica y genética de variedades mexicanas de higo (*Ficus carica* L.). Colegio de postgraduados. Tesis de doctorado.
- Gariglio N.F., Pilatti R.A., Agustí M.F. 2007. Requerimientos ecofisiológicos de los árboles frutales. *In: Árboles frutales: ecofisiología, cultivo y aprovechamiento*. Sozzi G.O.(ed.). Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina. pp: 43-78.
- González-Mancillas, R., Juárez-López, J. F., Aceves-Navarro, L. A., Rivera-Hernández, B., Guerrero-Peña, A. 2015. Zonificación edafoclimática para el cultivo de *Jatropha curcas* L., en Tabasco, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Vol: 86. pp. 25-37.
- Hanelt, P., Buttner, R., Mansfeld R. 2001. Mansfeld's encyclopedia of agricultural and horticultural crops. Berlin, Germany. Pp 102-104.
- Hong, P., Chen, I. 2003. Pollination and syconium set in fig (*Ficus carica* L.). *J. Chinese Soc Hort Sci*, Vol: 49. pp: 151-153.
- Hsu, S., Mavrogianni, A., Hamilton, I. 2017. Comparing Spatial Interpolation Techniques of Local Urban Temperature for Heat-related Health Risk Estimation in a Subtropical City, *Procedia Engineering*. The Author(s), 198(September 2016), pp. 354–365.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2016. Sistema de Información Geográfica del Extractor Rápido de Información Climatológica (SIG ERIC) v 1.0. Manual de usuario. En línea: http://hidrosuperf.imta.mx/sig_eric/Documentos/Manual.pdf. Consultado: Junio, 2019.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2017. Anuario estadístico y geográfico de Jalisco. Gobierno del estado de Jalisco. En línea: <https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/Anuario%20Estad%C3%A>

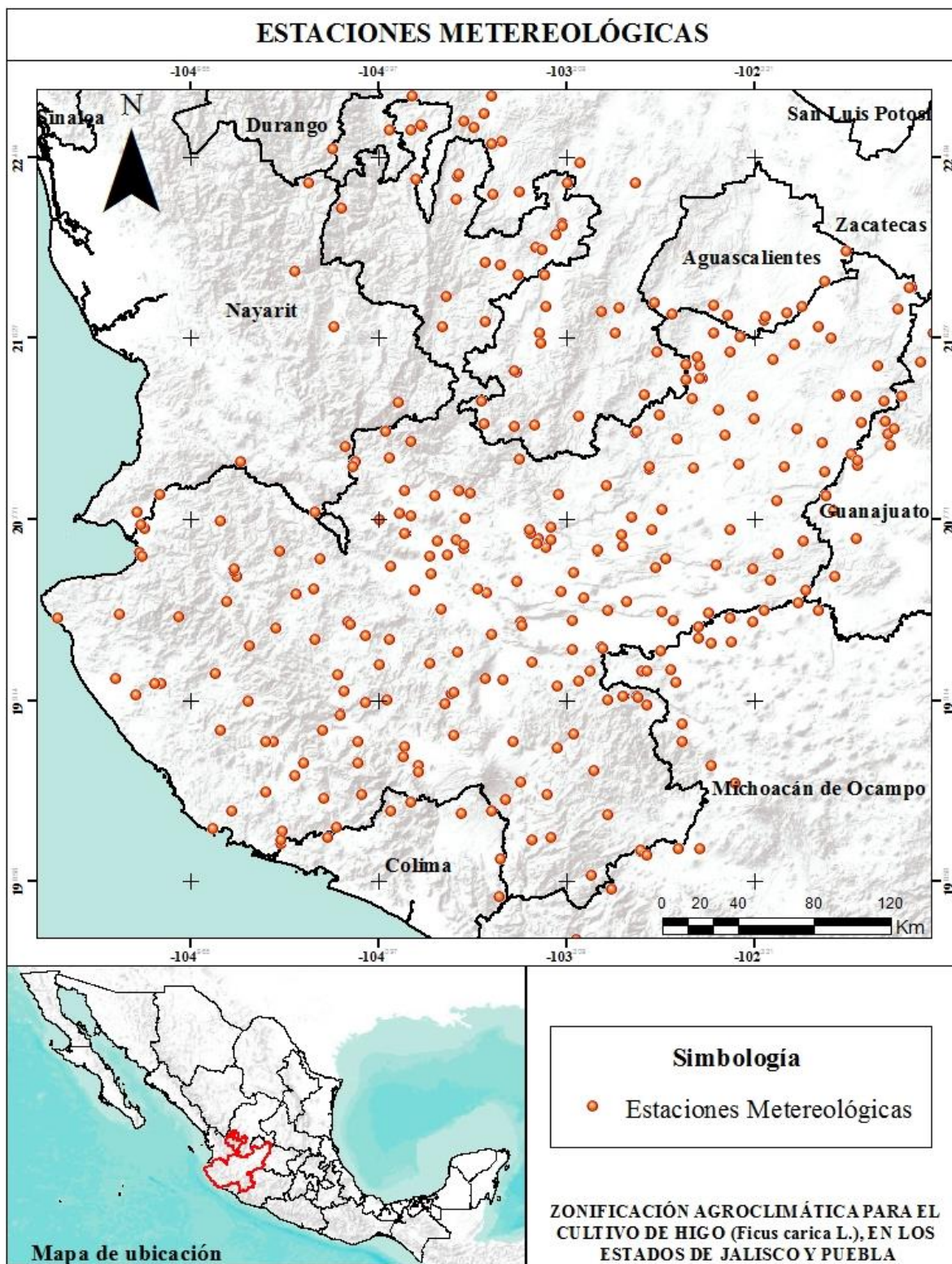
- [Dstico%20y%20Geogr%C3%A1fico%20de%20Jalisco%202017.pdf](#). Consultado: junio de 2020.
- Janick, Y.J. 2005. El origen de las frutas, la fruticultura y la cría de fruta. Rev. Plant Breeding. Vol 25. pp: 255-320.
- Khadari, B. y Kjellberg, F. 2009. Tracking the genetic signature to identify fig origins: insights for evolution before and during domestication processes. IV International Symposium on Fig. Méknes, Marruecos.
- Khemira H., M, Mars. 2017. Fig production in subtropical south-western Saudi Arabia. Acta Hortic. (1173): 169-172.
- Krislev, M.E.A., Hartman O.B. 2006. Early domesticated fig in the Jordan Valley. Science 312(5778): 1273-1275.
- Lopez-Corrales, M., Balas, F. 2014. La fruticultura del siglo XXI en España. Cajamar Caja Rural. pp: 241-260.
- Lucero, V. G. 2018. Diseño de un sistema de riego mediante difusores subterráneos y su efecto en la ecofisiología y productividad del agua en higuera (*Ficus carica* L.). Centro de investigaciones biológicas del noroeste, S.C. Programa de estudios de posgrado. Tesis de doctorado.
- Martínez, M. F. B., Deantonio, F. L. Y., Araujo, C. G. A., Rojas, E. O., Gómez-Alatorre, D. A., Alzate, D. F., Ortiz, L. A., Aguilera, E. G., Boshell-Villamarín, J. F. 2016. Metodología de zonificación agroclimática para sistemas de producción agrícola en la región caribe seco de Colombia. Agronomía colombiana. Vol: 3. Edición: 34. pp: 374-384.
- Melgarejo, M. P. 1996. La higuera (*Ficus carica* L.). Universidad Politécnica de Valencia. Orihuela, España.
- Melgarejo, M. P. 1999. Frutales de zonas áridas: El cultivo de la higuera (*Ficus carica* L.). Ediciones Madrid Vicente. Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Mendoza, C. V. M. 2013. Fisiología y manejo de la higuera (*Ficus carica* L.) en producción forzada bajo cubierta plástica. Colegio de postgraduados. Tesis de doctorado.
- Morgado-González, A., Becerril-Román, A.E., Calderón-Zavala, G., García-Villanueva, E., Velasco-Cruz, C., Alberto-Villa, J. 2018. Bioestimulantes y nutrimentos foliares en la

- producción de higo (*Ficus carica* L.) 'café de turquía'. *Agroproductividad*: Vol. 11, Núm. 9. pp: 15-19.
- Morton, J. 1987. *Fig In fruits of warm climates*. Miami. Florida. Pp 47-49.
- Navejas-Jiménez, J., Nieto-Garibay, A., Fraga-Palomino, H. C., Rueda-Puente, E. O., Ávila-Serrano, N. Y. 2011. Comparación de métodos para estimar la evapotranspiración en una zona árida citrícola del noroeste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, Yucatán, México. Vol. 13. Núm: 2. pp. 147-155.
- Pájaro, H. D., Ortiz, S. C. A. 1988. Estimación del periodo de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la República Mexicana. Centro de edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Paramasivam, C. R., Venkatramanan, S. 2019. *An Introduction to Various Spatial Analysis Techniques, GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. Elsevier Inc. doi: 10.1016/b978-0-12-815413-7.00003-1.
- Plouffe, C. C. F., Robertson, C., Chandrapala, L. 2015. Comparing interpolation techniques for monthly rainfall mapping using multiple evaluation criteria and auxiliary data sources: A case study of Sri Lanka, *Environmental Modelling and Software*. Elsevier Ltd, 67, pp. 57–71.
- Rajashree, M., Wandile, Maya, M., Rahul, Swati, V., Washimakr and Bharti, S. B., 2005, Residual effect of long-term application of N, P, Zn and FYM on soil properties of Vertisols, yield, protein and oil content of soybean. *J. Soils and Crops*, 15(1): 155- 159.
- Rivera-Hernández, B., Aceves-Navarro, L. A., Juárez-López, J.F., Palma-López, D.J., González-Mancillas, R., González-Jiménez, V. 2012. Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México. Universidad de Colima. Colima, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 16, núm. 1, 2012, pp. 29-47.
- Rufo, M. *et al.* 2018. Optimization and comparison of three spatial interpolation methods for electromagnetic levels in the AM band within an urban area, *Environmental Research*. Elsevier Inc., 162(January), pp. 219–225.
- Sánchez-Carrillo, J. 1999. *Agroclimatología. Innovación Tecnológica*. Caracas, Venezuela.

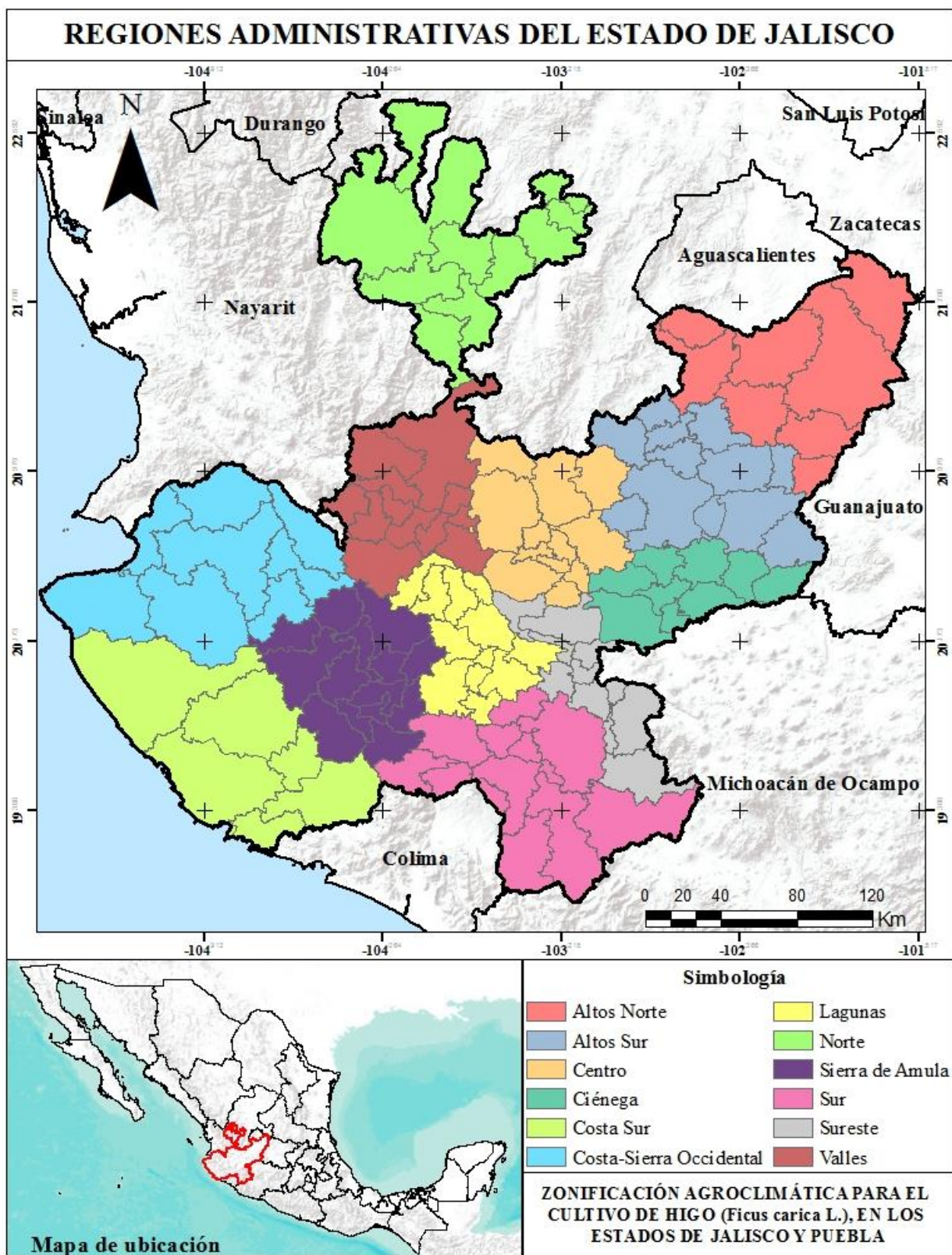
- SIAP-CIACON (Servicio de Información Agroalimentaria de Consulta). 2019. Software desarrollado por SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>
- Setianto A., T. Triandini. 2013. Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis. *J. Southeast Asian Appl. Geol.* 5 (1):21-29.
- Tridge. 2021. Centro de abastecimiento global de alimentos y agricultura. En línea: <https://www.tridge.com/> Consultado: Enero de 2021.
- Valdés, G., Rodríguez, J. 2001. Riego de la higuera. *Revista Comunidad Valenciana Agraria.* pp:33-38.
- Vázquez-González, A., González-Mancillas, R. 2017. Zonificación agroecológica del pasto (*Pennisetum purpureum* Schumach), variedad Taiwán en Chiapas, México. *Universidad Popular de la Chontalpa. Agroproductividad.* Vol: 10, Núm: 2. pp: 25-32.
- Watson, L., Dallwitz, M. J. 2004. The families of flowering plants: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. Vol. 12. pp:12-16.
- Whistler, W.A. 2000. *Tropical ornamentals: A guide.* Portland, O.R. USA: Timber press. pp 542-546.
- Xiao, Y., Gu, X., Yin, S., Shao, J., Cui, Y., Zhang, Q., Niu, Y., 2016. Geostatistical interpolation model selection based on ArcGIS and spatio-temporal variability analysis of groundwater level in piedmont plains, Northwest China. *Springer Plus* 5 (425):1-10.

IX. ANEXOS

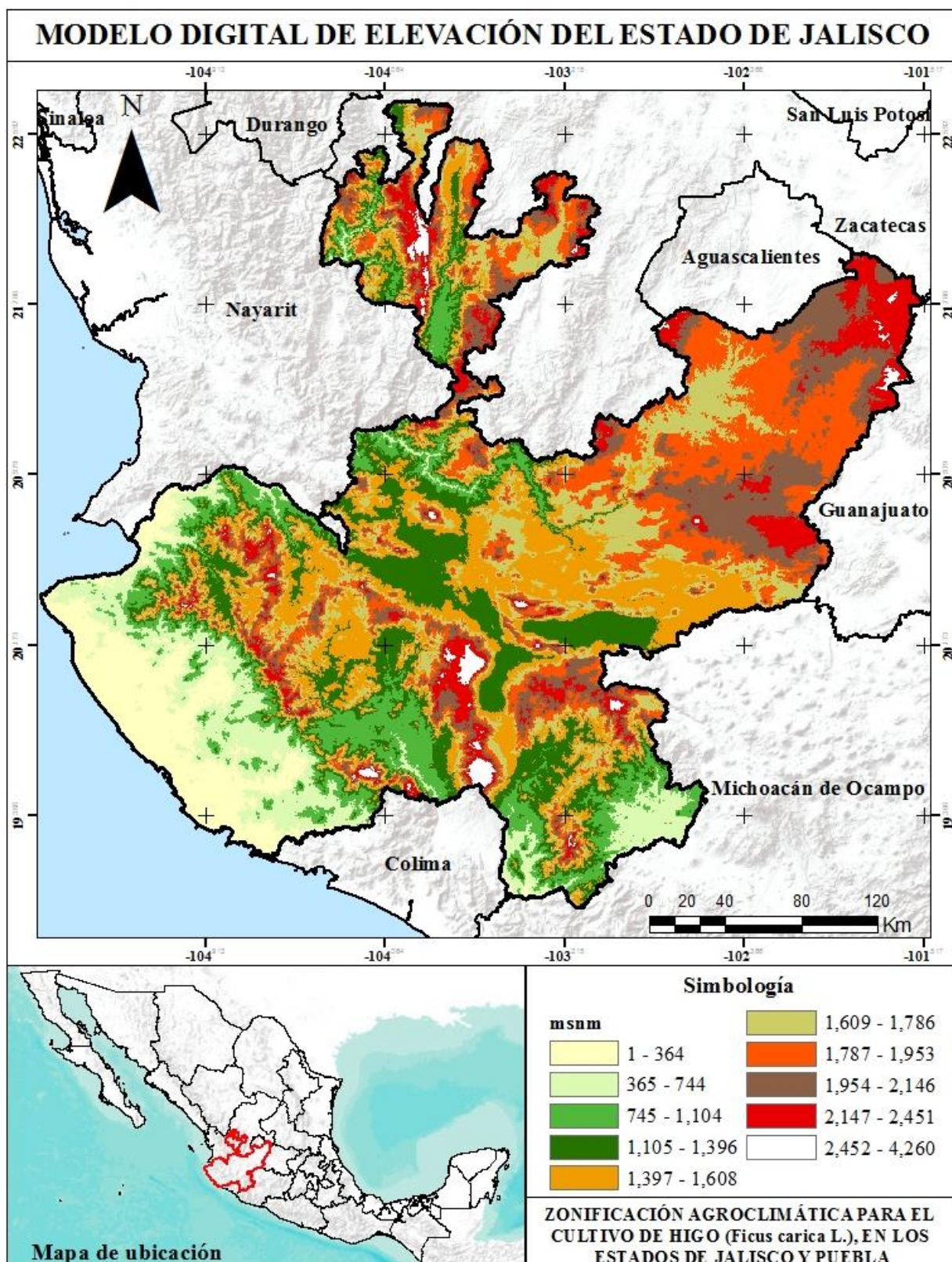
9.1 Jalisco



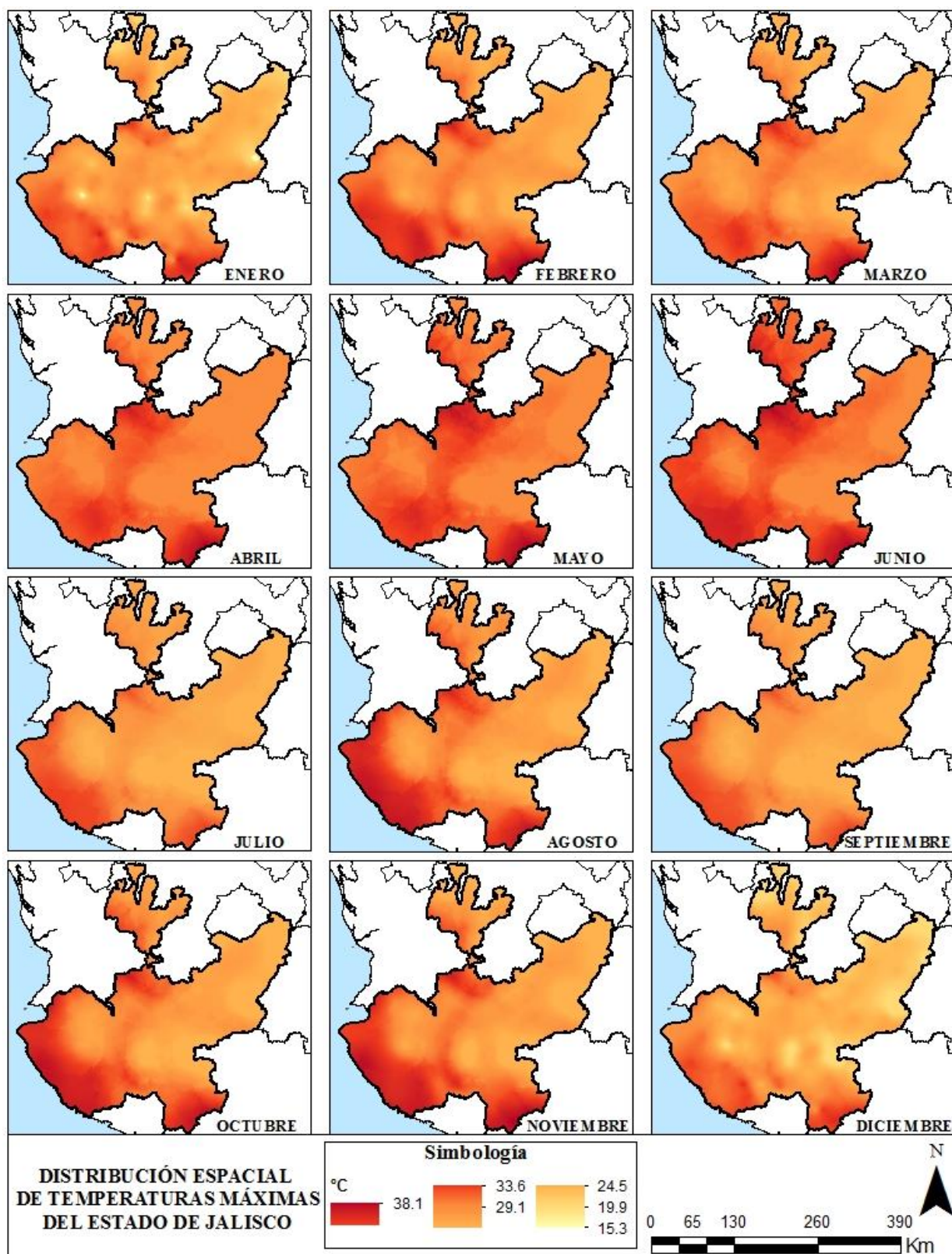
Anexo 1. Estaciones meteorológicas seleccionadas para el estado de Jalisco.



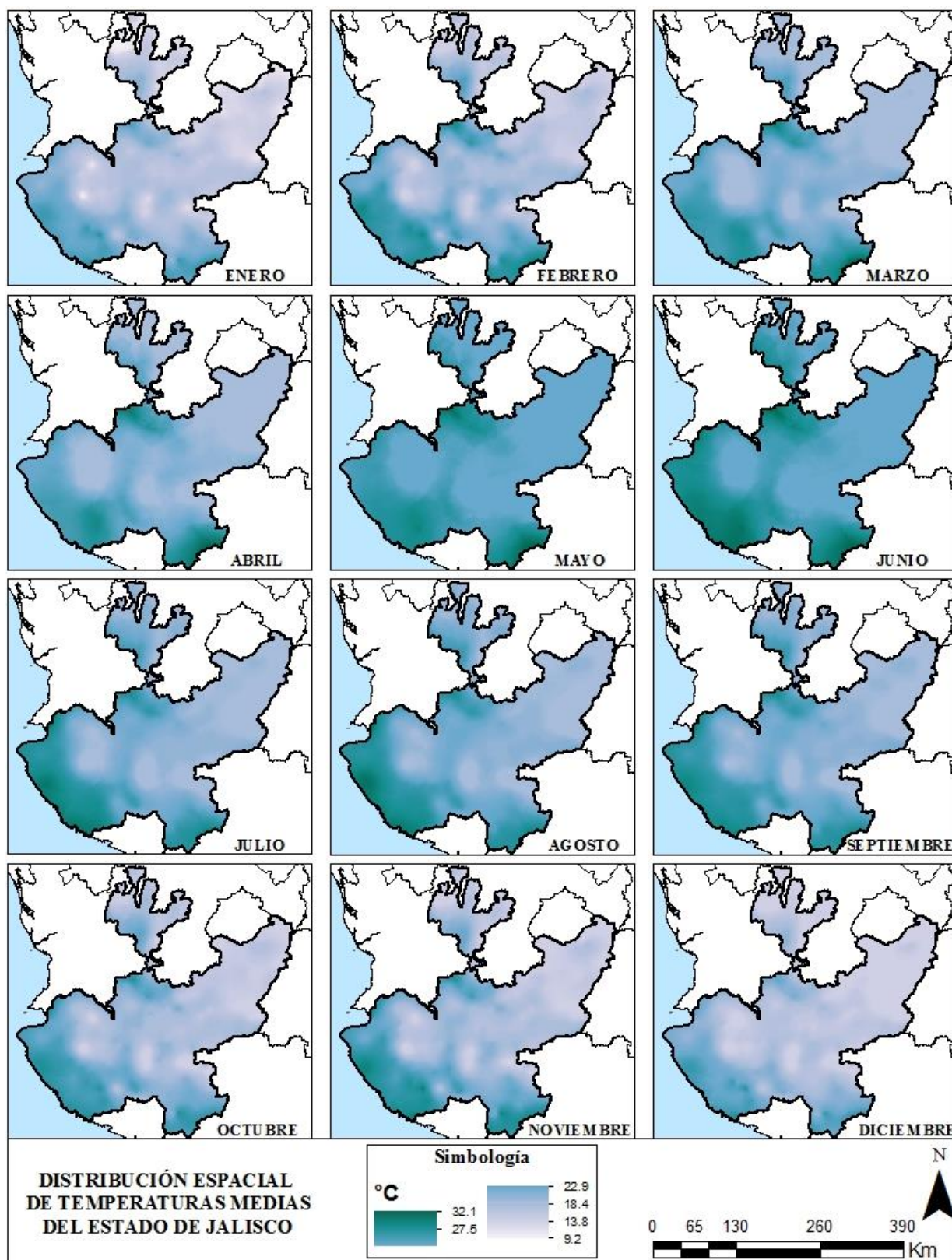
Anexo 2. Regiones administrativas del estado de Jalisco.



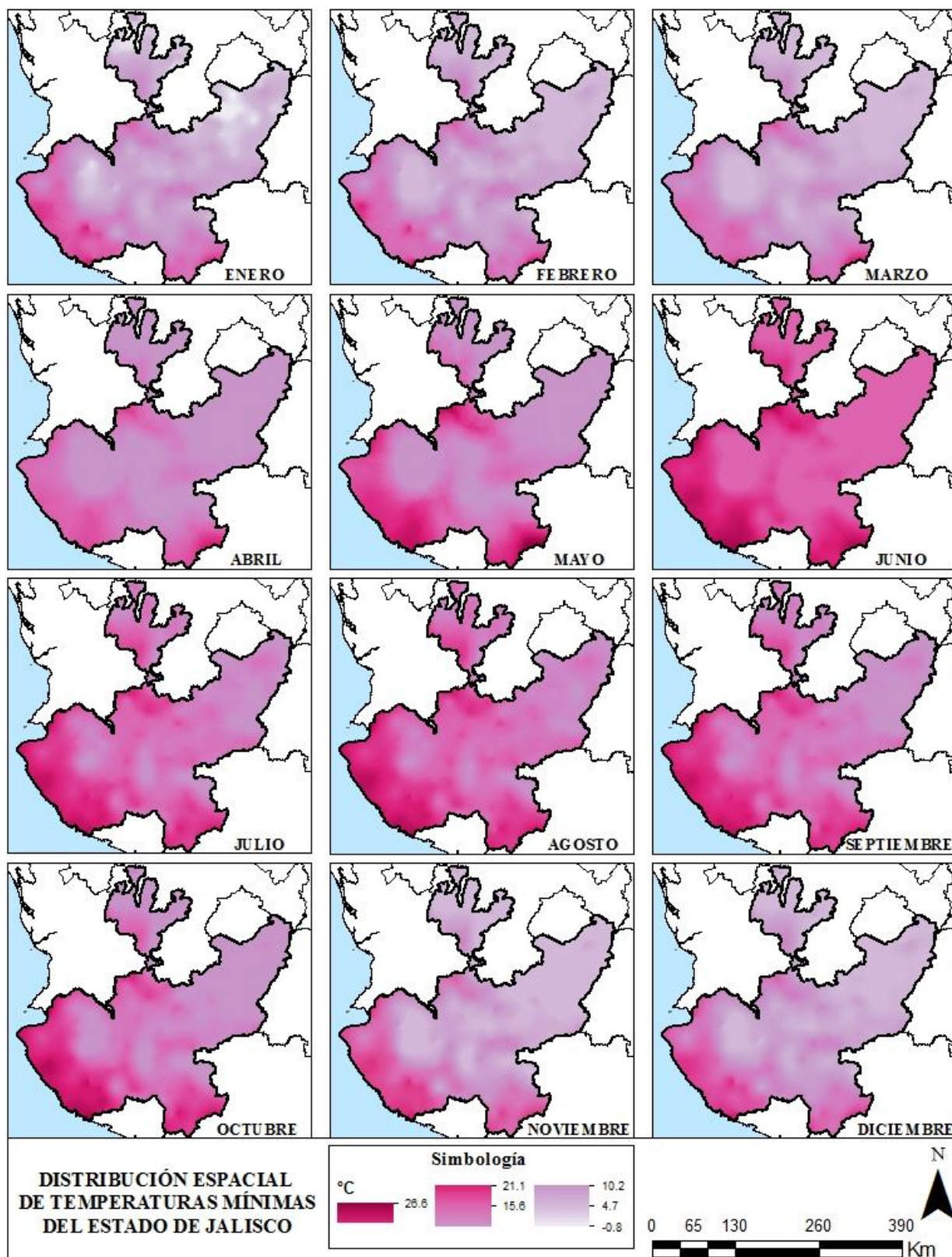
Anexo 3. Modelo digital de elevación del estado de Jalisco.



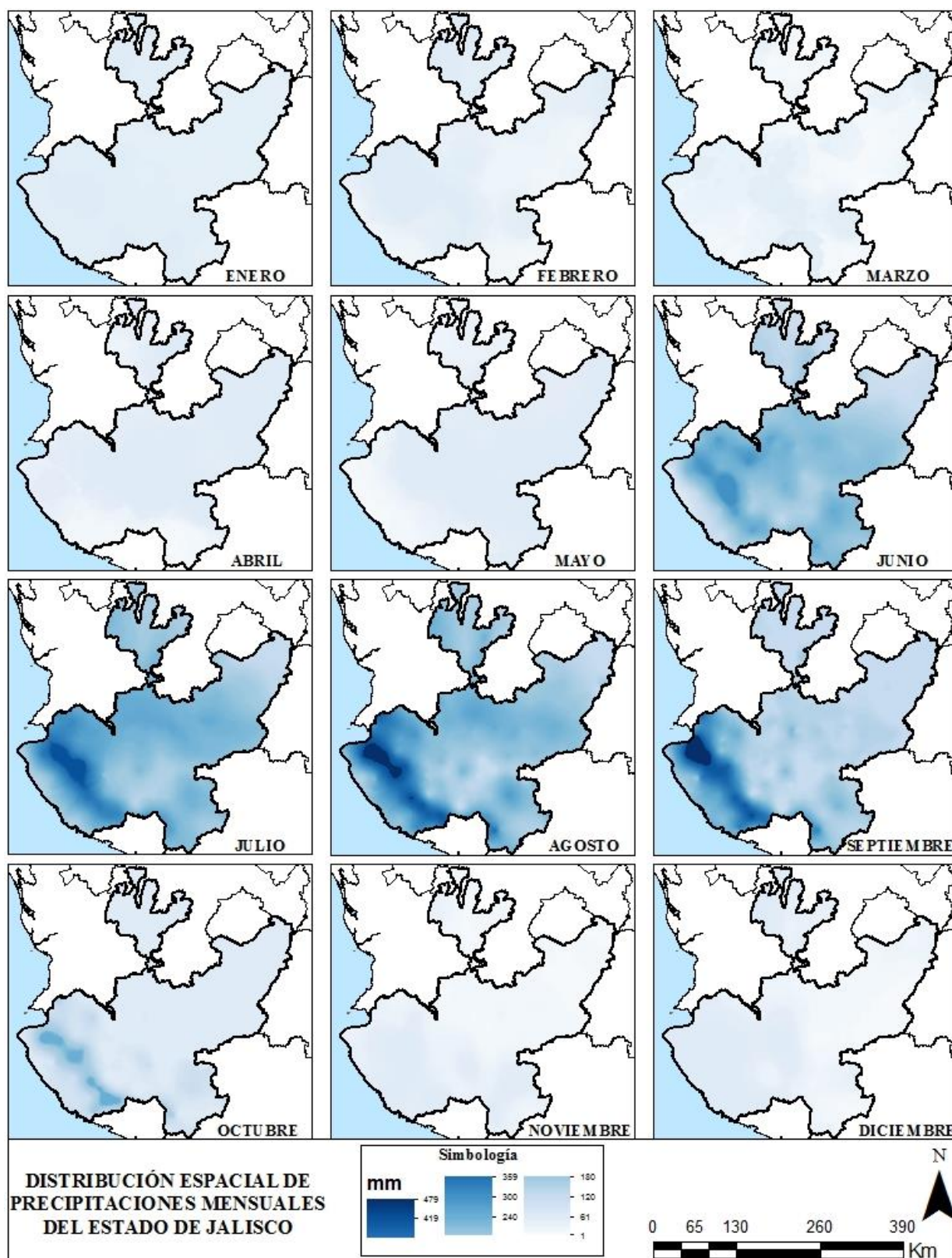
Anexo 4. Distribución espacial de temperaturas máximas mensuales del estado de Jalisco.



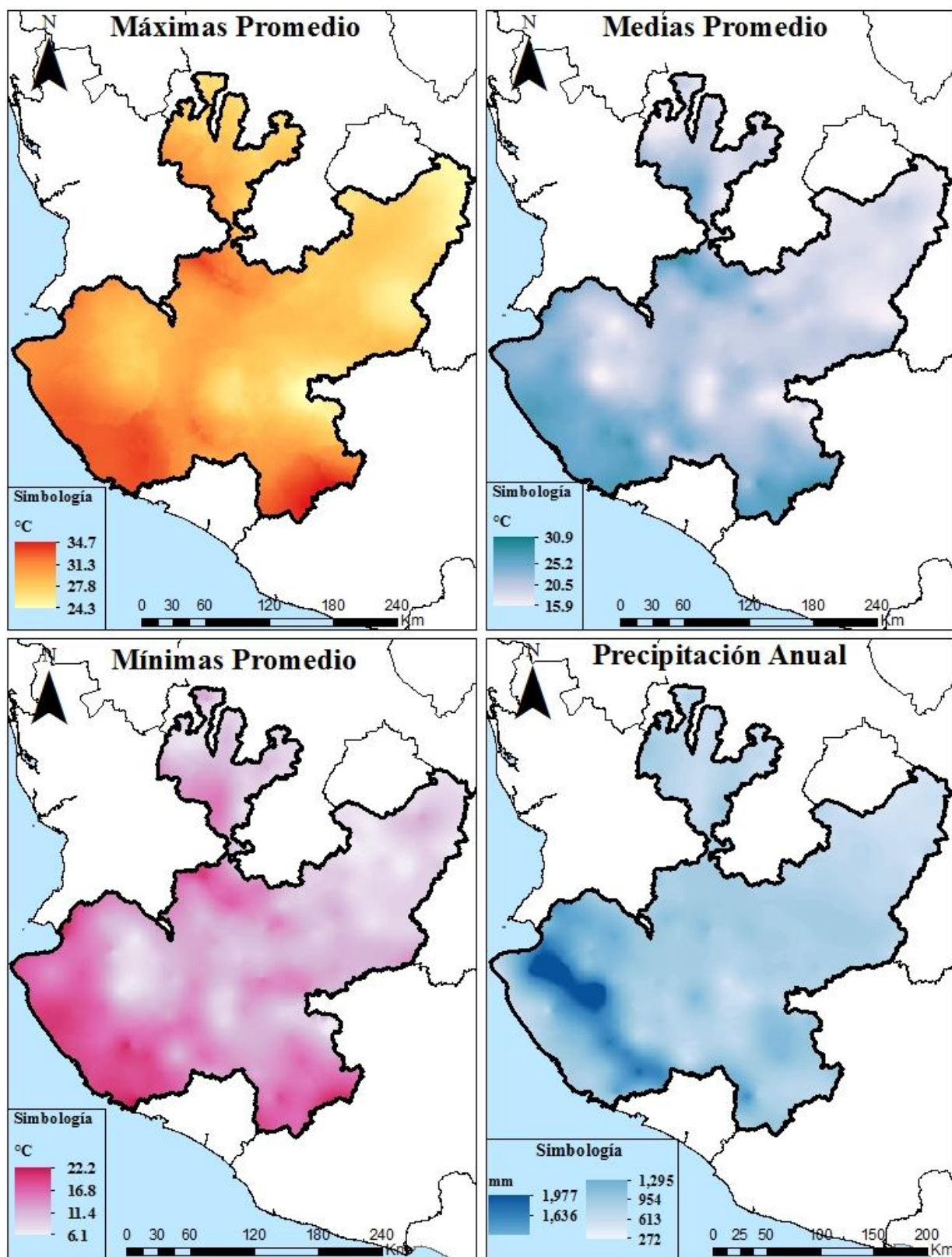
Anexo 5. Distribucion espacial de temperaturas medias mensuales del estado de Jalisco.



Anexo 6. Distribución espacial de temperaturas mínimas mensuales del estado de Jalisco.

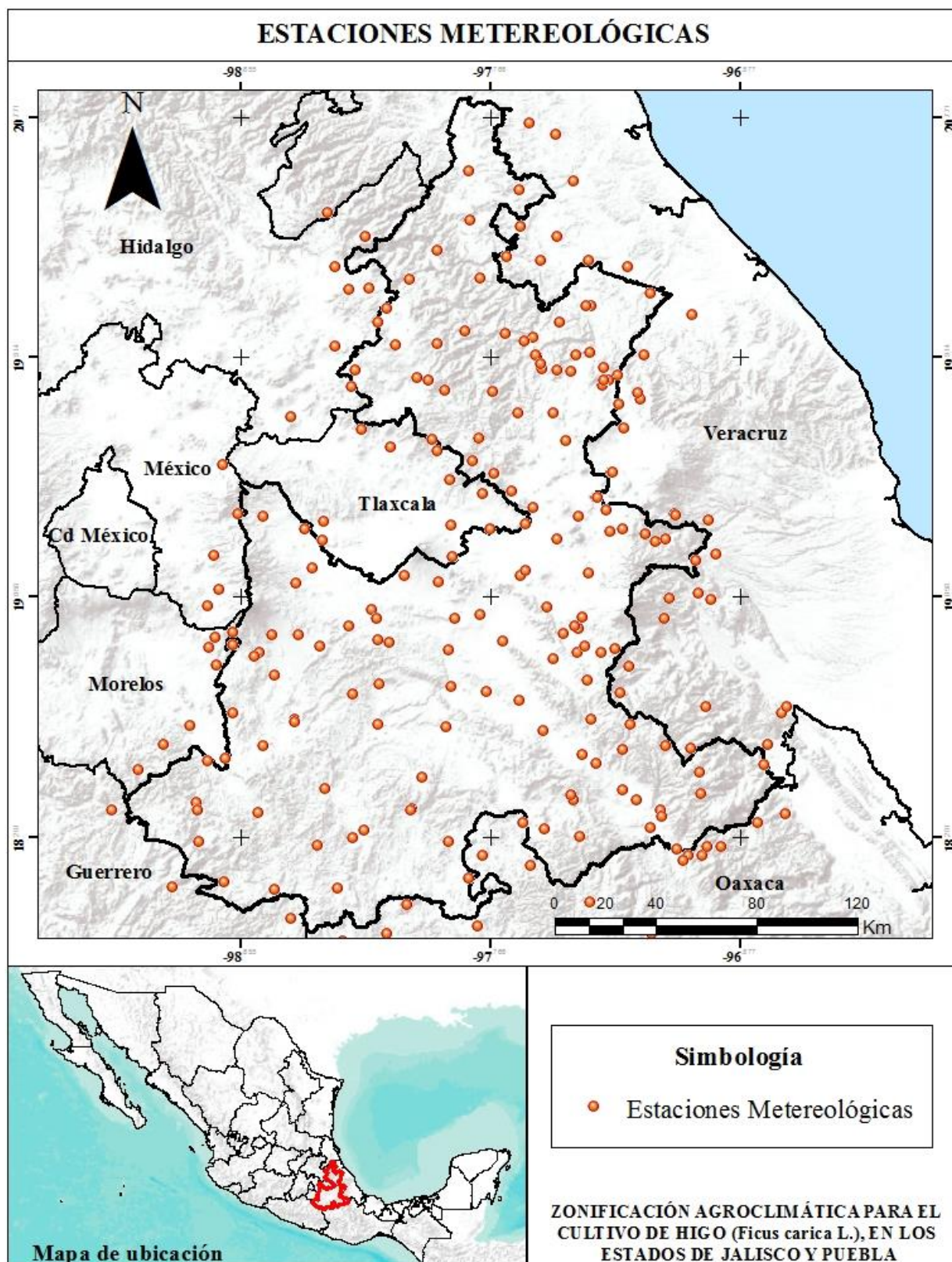


Anexo 7. Distribucion espacial de precipitaciones mensuales del estado de Jalisco.

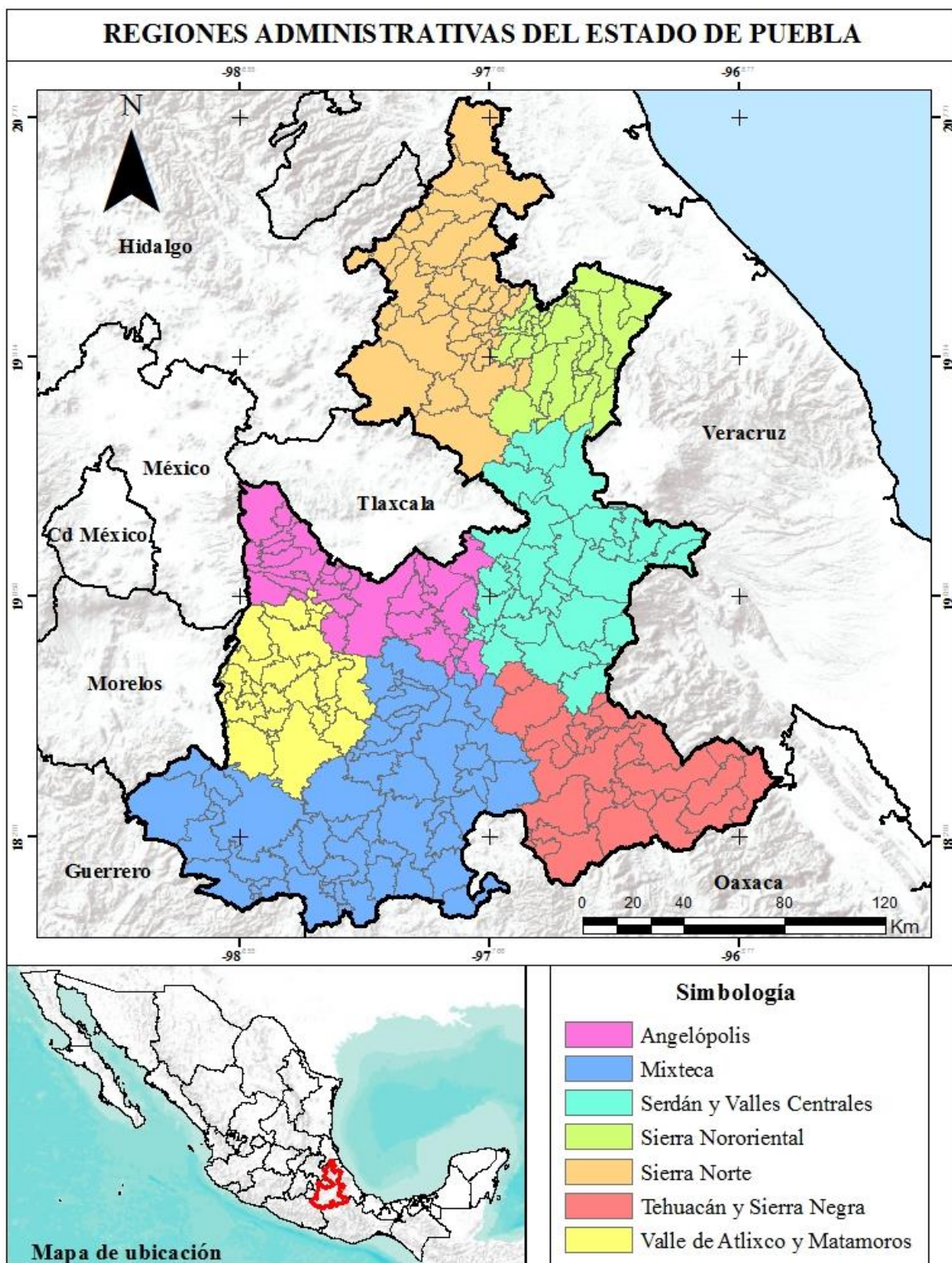


Anexo 8. Promedio de temperaturas máximas, medias, mínimas y precipitación anual acumulada del estado de Jalisco.

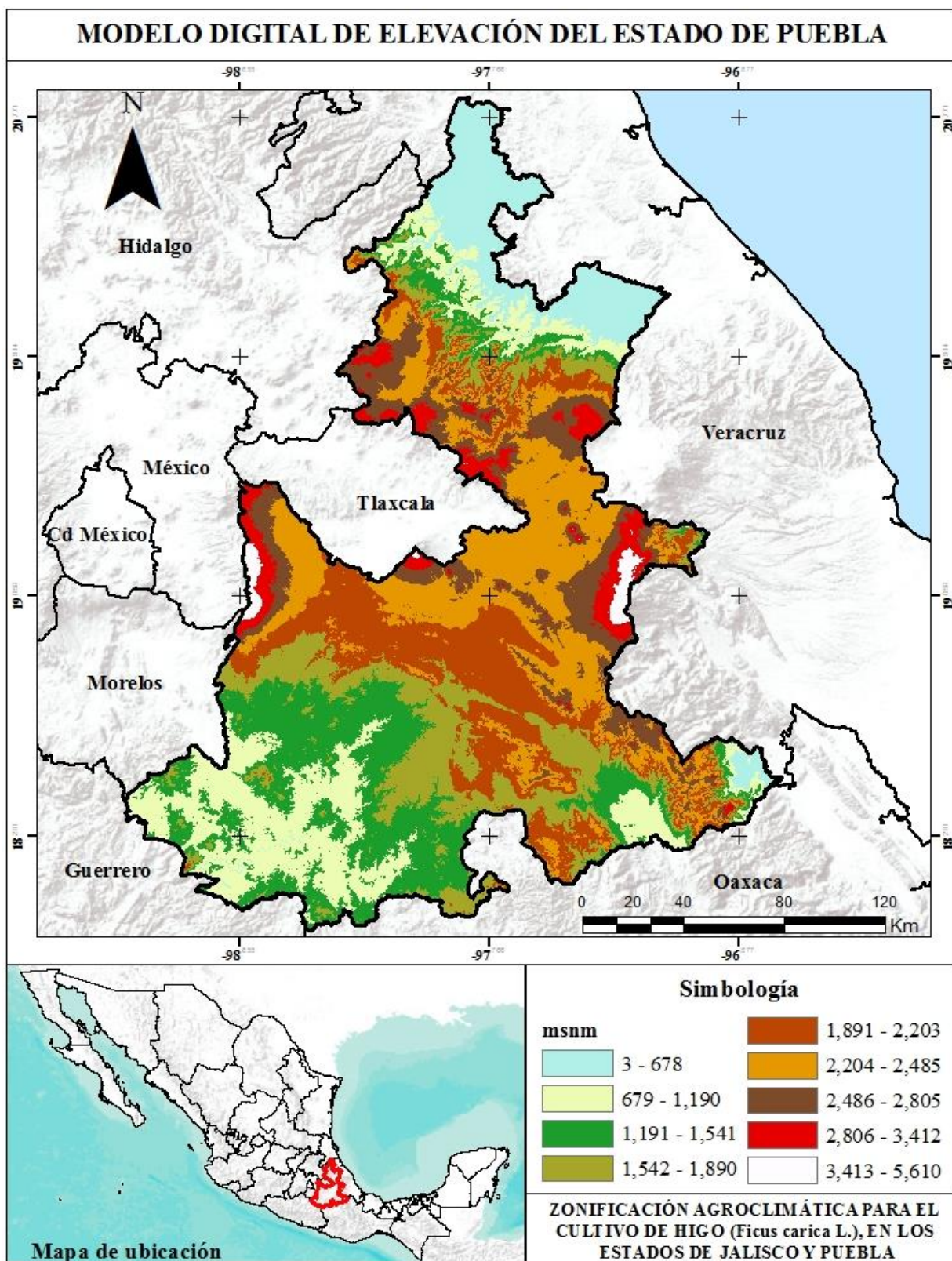
9.2 Puebla



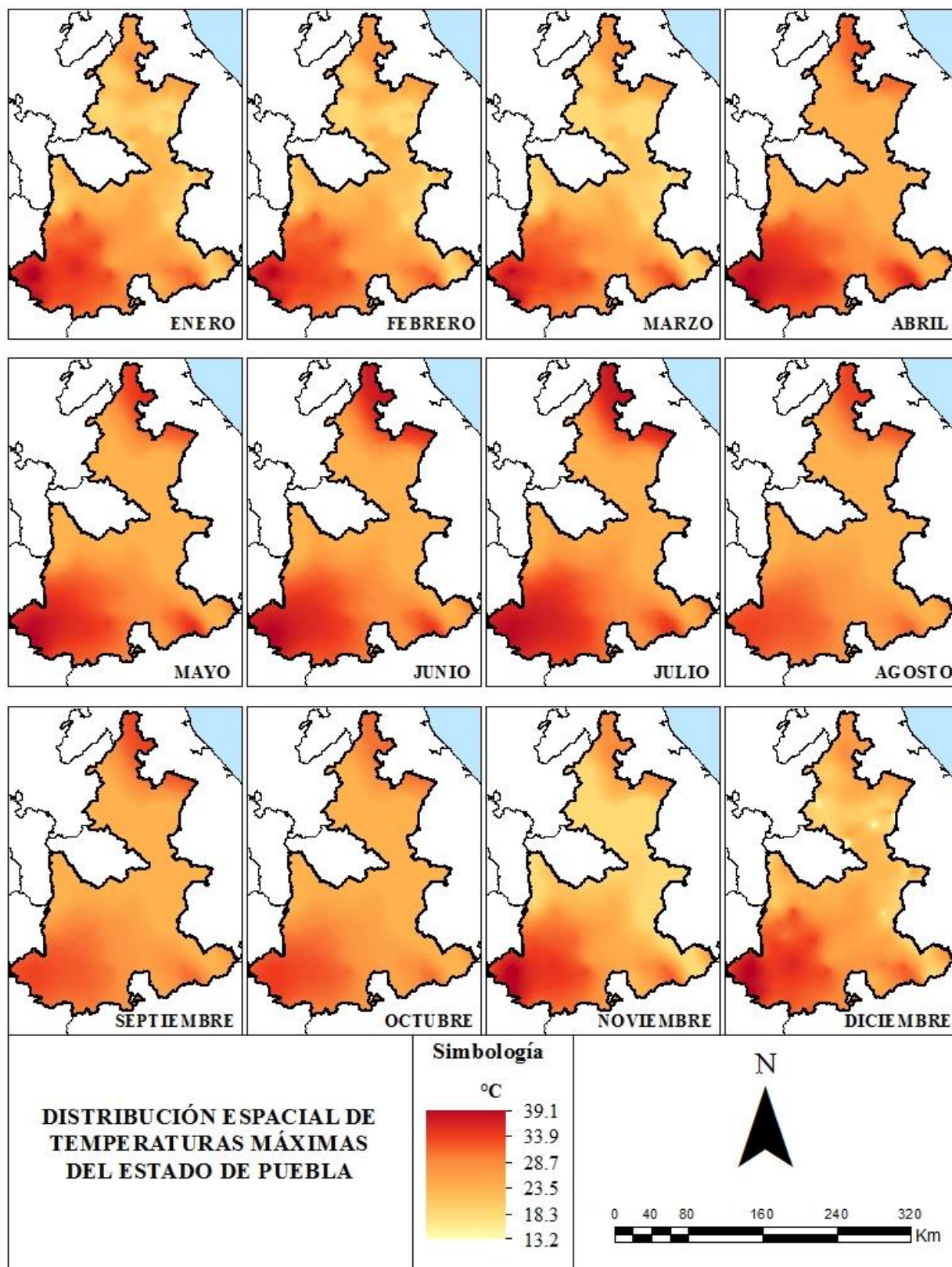
Anexo 9. Estaciones meteorológicas seleccionadas para el estado de Puebla.



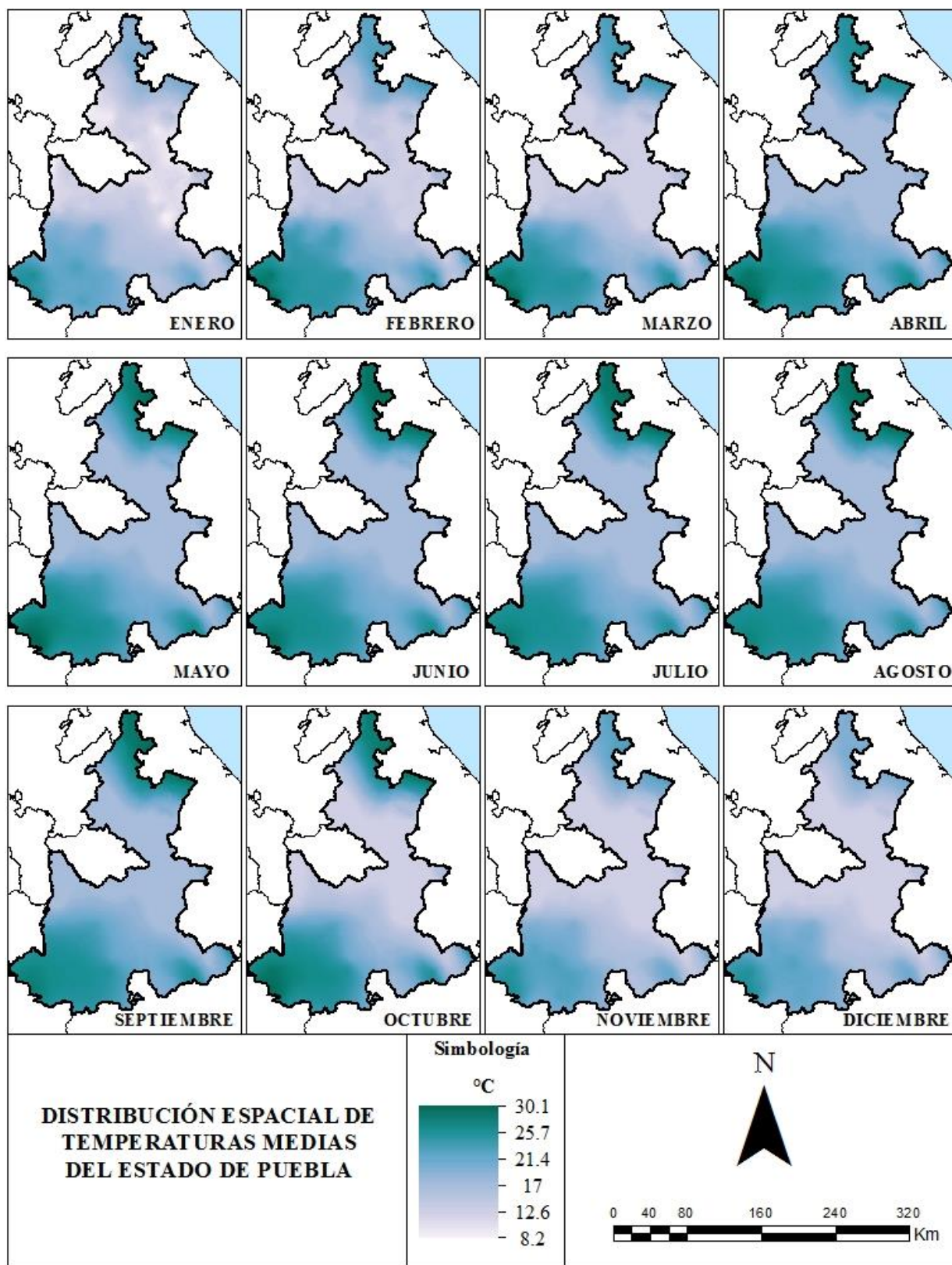
Anexo 10. Regiones administrativas del estado de Puebla.



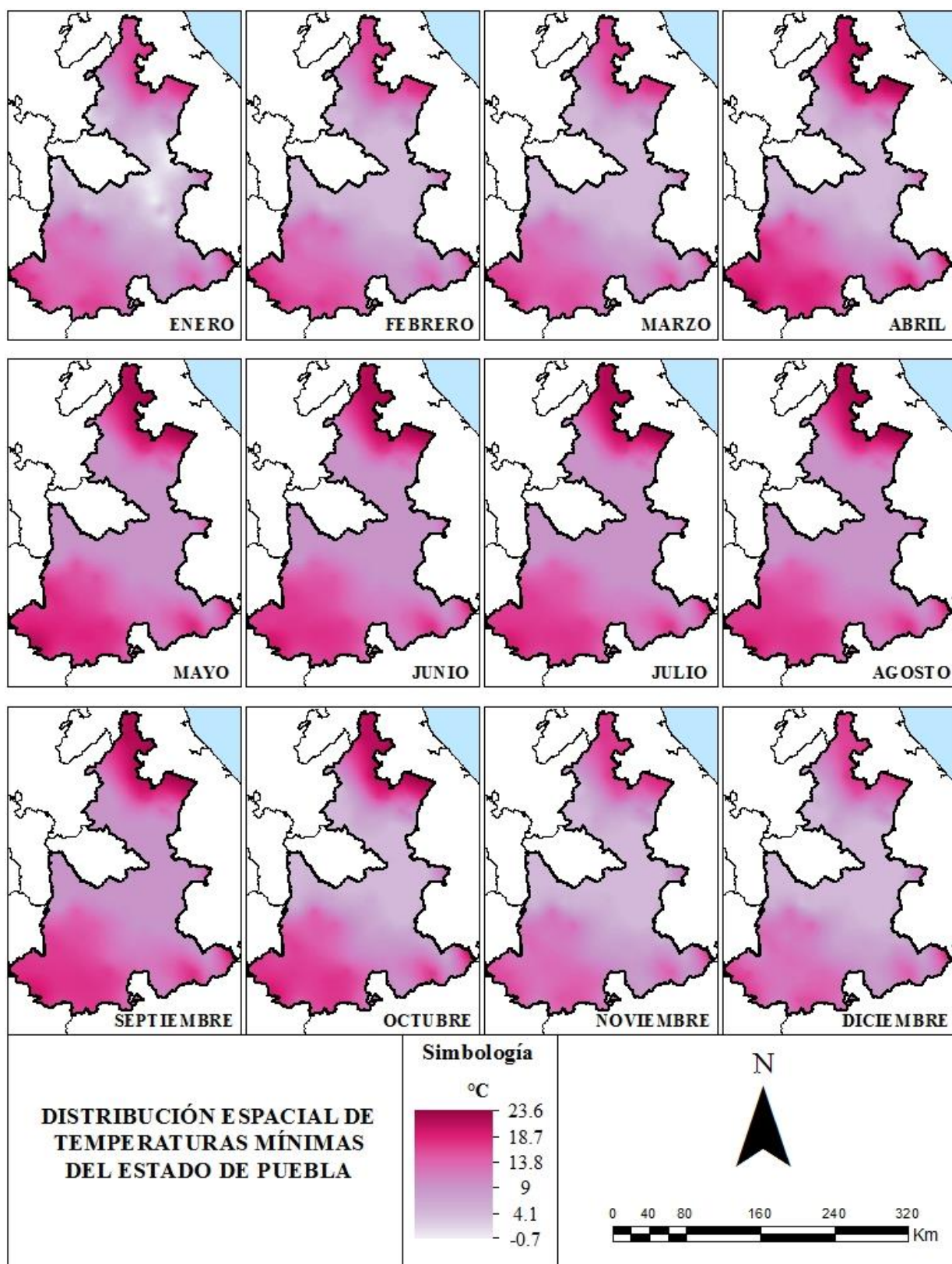
Anexo 11. Modelo digital de elevación del estado de Puebla.



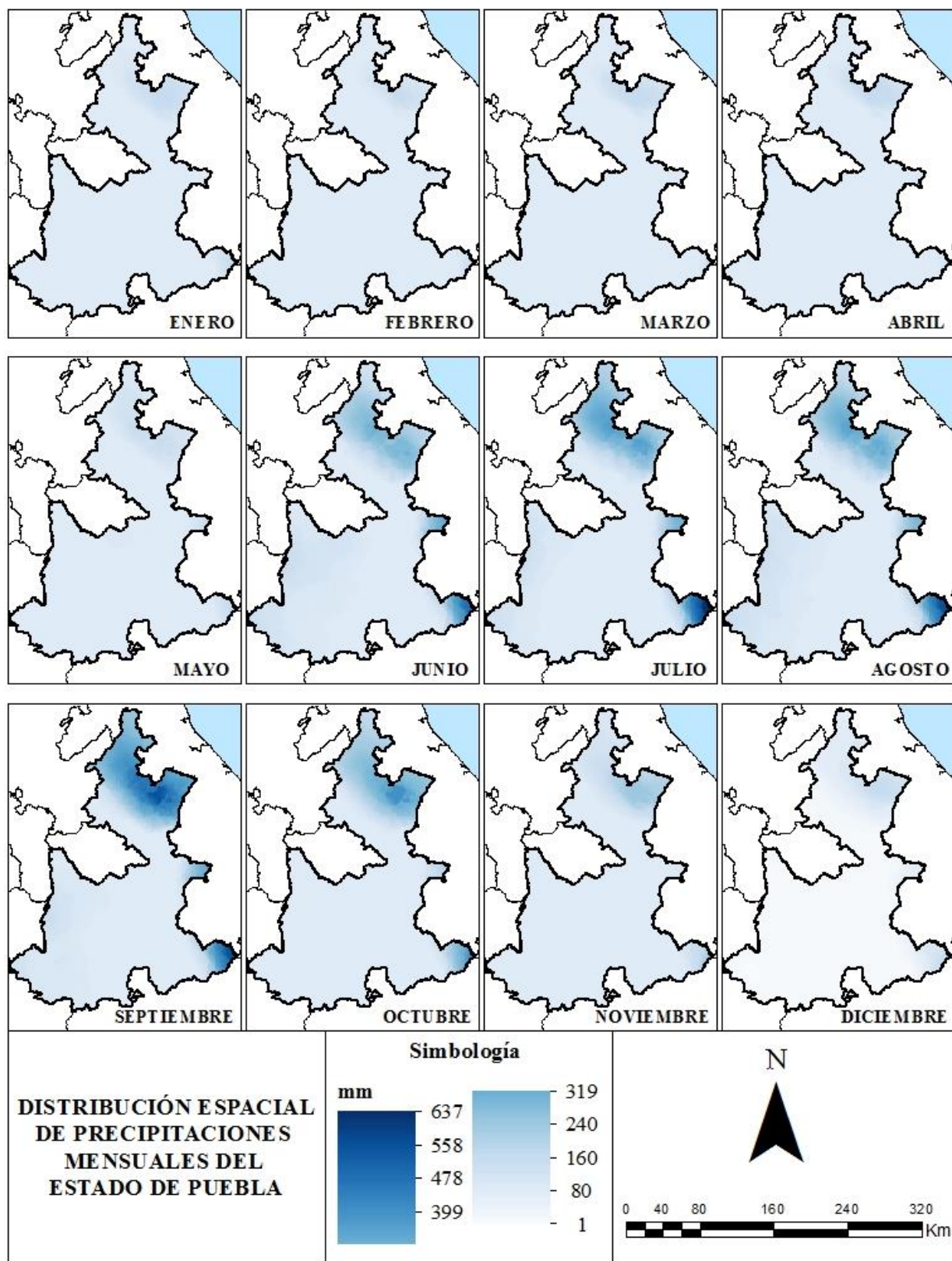
Anexo 12. Distribución espacial de temperaturas máximas mensuales del estado de Puebla.



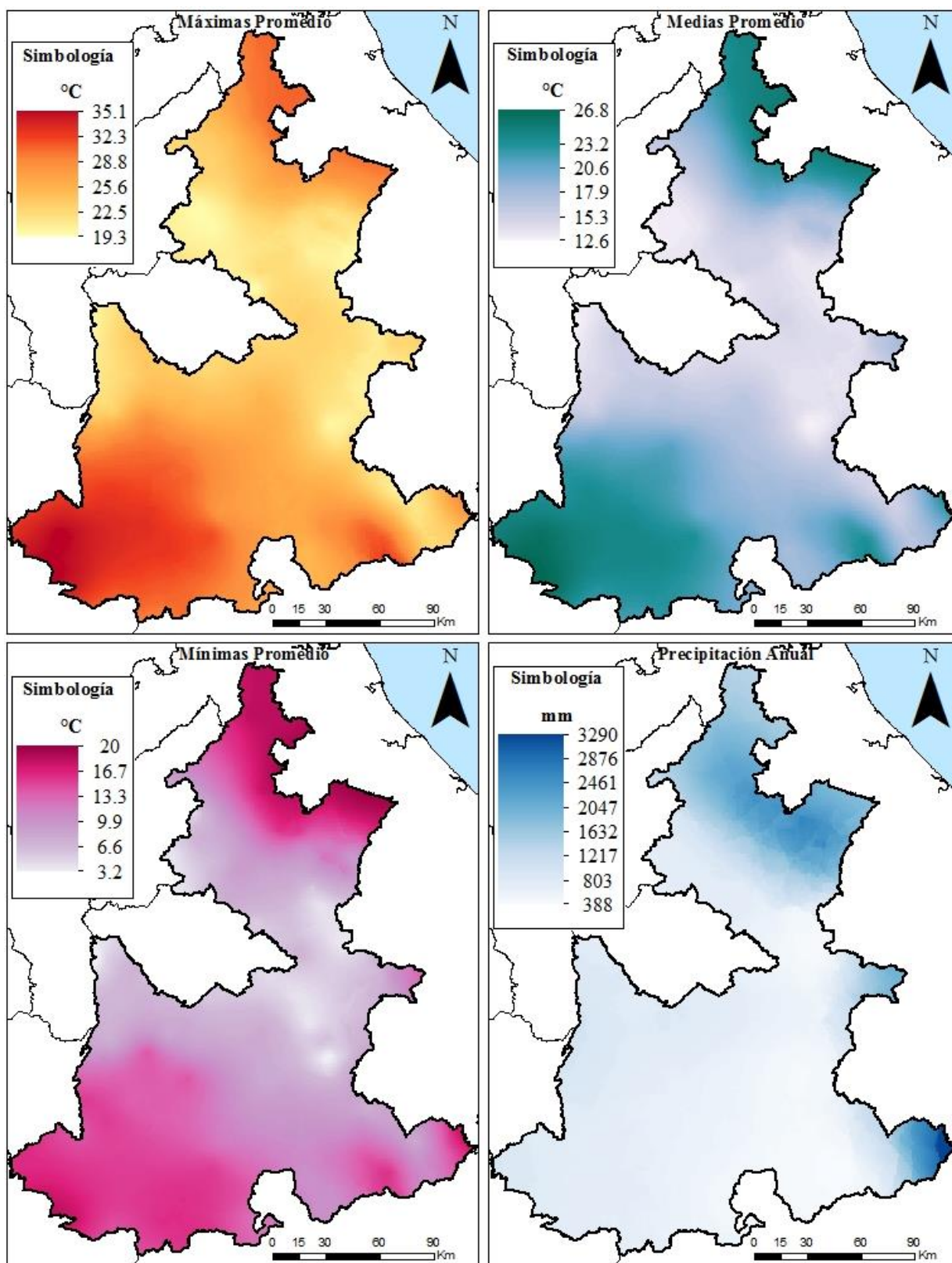
Anexo 13. Distribución espacial de temperaturas medias mensuales del estado de Puebla.



Anexo 14. Distribución espacial de temperaturas mínimas mensuales del estado de Puebla.



Anexo 15. Distribución espacial de precipitaciones mensuales del estado de Puebla.



Anexo 16. Promedio de temperaturas máximas, medias, mínimas y precipitación anual acumulada del estado de Puebla.