



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**



APROBADA



**CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LA PARTE MEDIA
DE LA CUENCA DEL RÍO APULCO EN LA ZONA
NORORIENTAL DE PUEBLA**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

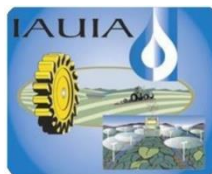
**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

Presenta:

JUAN ANTONIO TRINIDAD SANTOS

Bajo la supervisión de:

RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ, DR.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2024

CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LA PARTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO APULCO EN LA ZONA NORORIENTAL DE PUEBLA

Tesis realizada por **JUAN ANTONIO TRINIDAD SANTOS** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA

DIRECTOR:



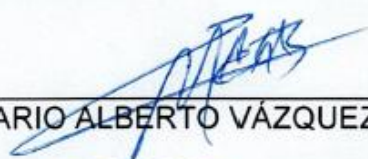
DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

CODIRECTOR:



DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

ASESOR:



DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

LECTOR EXTERNO:



DRA. ROCÍO CERVANTES OSORNIO

CONTENIDO

CONTENIDO	iii
LISTA DE CUADRO	vi
LISTA DE FIGURAS	vi
AGRADECIMIENTOS.....	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	x
RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL ABSTRACT.....	xii
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	13
1.1 Importancia del problema.....	13
1.2 Antecedentes	13
1.3 Justificación	15
1.4 Objetivos	16
1.5 Presentación de los capítulos.	16
1.6 Literatura citada	17
2 ANALISIS BIBLIOMÉTRICO Y METODOLOGÍAS SOBRE LA ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA DURANTE 1990-2024	20
2.1 Resumen.....	20
2.2 Introducción	21
2.3 Materiales y métodos	23
2.3.1 Análisis bibliométrico	25
2.3.2 Análisis de lecturas	25
2.4 Resultados y discusión	26
2.4.1 Información principal.....	26
2.4.2 Producción científica anual	26
2.4.3 Promedio de citas por año	27
2.4.4 Relación por país-revistas-autores	28

2.4.5	Documentos más citados a nivel global	28
2.4.6	Autores más relevantes	29
2.4.7	Producción de autores en el tiempo.....	29
2.4.8	Colaboración de países	31
2.4.9	Frecuencia de palabras clave	31
2.4.10	Análisis de co-citación	32
2.4.11	Análisis de colaboración	33
2.4.12	Acceso a las publicaciones	34
2.4.13	Análisis de los artículos	35
2.5	Conclusión	41
2.6	Literatura citada	42
3	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA PARTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO APULCO ZONA NORORIENTAL DE PUEBLA.....	48
3.1	Resumen.....	48
3.2	Introducción	49
3.3	Materiales y métodos	50
3.3.1	Área de estudio.....	50
3.3.2	Base de datos	51
3.3.3	Relieve	52
3.3.4	Metodología	52
3.3.5	Resultados y discusión	54
3.3.6	Gráficos de disponibilidad	55
3.3.7	Disponibilidad global	57
3.3.8	Análisis de diagramas de cajas (datos atípicos)	58
3.3.9	Análisis de diagrama de incrementos	60
3.3.10	Análisis de valores consecutivos	61
3.3.11	Histogramas por variable	62
3.3.12	Correlograma de las series	62

3.3.13	Dendrograma de grupos de estaciones	64
3.3.14	Variación espacial de la temperatura.....	65
3.3.15	Variación espacial de la precipitación	66
3.3.16	Variación especial de la evaporación.....	67
3.3.17	Análisis de heladas	68
3.3.18	Número de heladas.....	69
3.4	Conclusión	70
3.5	Literatura citada	71
4	CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LA PARTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RIO APULCO, ZONA NORORIENTAL DE PUEBLA.....	75
4.1	Resumen.....	75
4.2	Introducción	76
4.3	Materiales y métodos	77
4.3.1	Área de estudio.....	77
4.3.2	Base de datos	78
4.3.3	Relieve	78
4.3.4	Control de calidad	79
4.3.5	Instat+ v3.36	82
4.3.6	Maíz	82
4.4	Resultados y discusión	84
4.4.1	Control de calidad	84
4.4.2	Caracterización agroclimática.....	86
4.4.3	Heladas.....	86
4.4.4	Longitud de la estación de crecimiento.....	89
4.4.5	Unidades calor (GDD).....	92
4.4.6	Probabilidad de precipitación	93
4.4.7	Periodos secos	94
4.5	Conclusiones	95

4.6	Literatura citada	95
-----	-------------------------	----

LISTA DE CUADRO

Cuadro 1. Sinónimos de palabras de búsqueda.	23
Cuadro 2. Criterios de exclusión e inclusión y resultados obtenidos.	24
Cuadro 3. Información principal de los documentos incluidos.	26
Cuadro 4. Resumen de la información y herramientas que se consideró en cada publicación.	37
Cuadro 5. Disponibilidad de datos (%) por variables meteorológicas y estación.	54
Cuadro 6. Resumen de eventos con temperaturas iguales o menores a 0 °C..	69
Cuadro 7. Prueba de homogeneidad normal estándar sobre series de anomalías (SNHT).....	85
Cuadro 8. Error cuadrático medio de los datos estimados (RMSE).....	85
Cuadro 9. Porcentaje de datos originales.	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de una revisión sistemática con base en el diagrama PRISMA.	24
Figura 2. Producción científica anual.	27
Figura 3. Promedio de citas por año.	27
Figura 4. Gráfico de tres campos de países revistas y autores.	28
Figura 5 Documentos más citados a nivel mundial.....	29
Figura 6. Autores más relevantes.	29
Figura 7. Producción científica de los autores en el tiempo.	30

Figura 8. Colaboración entre los países.	31
Figura 9. Histograma de frecuencias (a) y nube (b), sobre las palabras clave.	32
Figura 10. Red de co-citación.	33
Figura 11. Red de colaboración entre autores.	34
Figura 12. Porcentaje de artículos consultados y no consultados.	35
Figura 13. Zona de estudio y localización de las estaciones climáticas.	51
Figura 14. Mapa de elevaciones.	52
Figura 15. Porcentaje de información disponible en promedio por estación.	55
Figura 16. Gráficos de disponibilidad de datos de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).	56
Figura 17. Disponibilidad global de datos de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).	58
Figura 18. Valores atípicos por variable de cada estación de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).	59
Figura 19. Diferencias consecutivas de las variables de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).	60
Figura 20. Diagrama de valores consecutivos de las variables de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).	61
Figura 21. Histogramas las variables de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).	62
Figura 22. Correlograma de las series de las variables de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).	63
Figura 23. Dendrograma de grupos de estaciones con base en la temperatura máxima (a), mínima (b), precipitación (c) y evaporación (d).	64
Figura 24. Isolíneas de temperatura mínima media diaria.	65
Figura 25. Isolíneas de temperatura máxima media diaria.	66
Figura 26. Isolíneas de precipitación media diaria.	67

Figura 27. Isolíneas de evaporación media diaria.....	68
Figura 28. Isolíneas del número de heladas totales (TH).	70
Figura 29. Zona de estudio y localización de las estaciones climáticas.....	77
Figura 30. Mapa de elevaciones.	79
Figura 31. Isolíneas de fechas de ocurrencia de ultima helada primaveral al 20%.	87
Figura 32. Isolíneas de fechas de ocurrencia de primera helada otoñal al 20%.	88
Figura 33. Isolíneas de fechas de inicio de la estación de crecimiento después del 15 de marzo.	89
Figura 34. Isolíneas de fechas del final de la estación de crecimiento.	90
Figura 35. Isolíneas de la duración en días de la estación de crecimiento desde el 15 de marzo.	91
Figura 36. Isolíneas de probabilidad de ocurrencia de las unidades calor igual o mayor a 1500 GDD en el periodo de crecimiento.	92
Figura 37. Isolíneas de probabilidad de ocurrencia de precipitación igual o mayor a 500 mm en el periodo de crecimiento.	93
Figura 38. Isolíneas probabilidad al 20% de ocurrencia de periodos secos de 7 días en los próximos 30 días.	94

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Chapingo** por permitirme el cumplir en las metas más altas en mi carrera profesional.

Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT)** por la beca proporcionada, que sin ella no habría sido posible la realización de mis estudios de posgrado.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Juan Antonio Trinidad Santos
Fecha de nacimiento: 23 de marzo 1991
Lugar de nacimiento: Tételes de A.C. Puebla
No. Cartilla militar: D-1287757 (3737115)
CURP: TISJ910323HPLRNN01
Profesión: Ingeniero en Irrigación
Cédula de Licenciatura: 11876238
Cédula de Maestría: 12872334

Desarrollo académico

Medio-Superior: Preparatoria Agrícola - Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura: Departamento de Irrigación - Universidad Autónoma Chapingo
Maestría: Maestría en Hidrociencias - colegio de postgraduados

Desarrollo profesional

2014-2016 Especialistas en ingeniería en irrigación y civil S.A. de C.V.
Prestador de servicios profesionales por parte de la
2016-2016 comisión nacional del agua en el DTT Balancán-Tenosique
Tabasco y RAGRO ingeniería integral sustentable.
2017-2017 Especialistas en ingeniería en irrigación y civil S.A. de C.V.

RESUMEN GENERAL

CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LA PARTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO APULCO EN LA ZONA NORORIENTAL DE PUEBLA

En los últimos años la variabilidad climática pone en riesgo a la producción del rendimiento agrícola. El problema de estudio radica en la incertidumbre de la ocurrencia de eventos climáticos y la disponibilidad de los requerimientos agroclimáticos que ponen en riesgo la producción del maíz. Por lo que es necesario indagar sobre metodologías que mejoren tales condiciones. Los objetivos de estudio fueron, general: se realizó la caracterización agroclimática para el cultivo de maíz en la parte media de la cuenca del río Apulco en la zona Nororiental de Puebla, y los específicos: (1) realizar un análisis bibliométrico y metodologías para la zonificación agroclimática en el periodo 1990 – 2024; en el que se realizó una revisión sistemática de literatura y análisis bibliométrico con el software Bibliometrix con relación a las palabras clave zonificación agroclimática, agroecológica y edafoclimática; (2) se realizó la caracterización de la información climática de 19 estaciones meteorológicas en el periodo 1980 – 2018; (3) se realizó la caracterización agroclimática de 19 estaciones meteorológicas en el que se utilizó la paquetería Climatol 4.0.0 en R, Instat+v3.36 y Qgis. Los resultados fueron: la producción científica anual con una tendencia positiva entre los años 2002 al 2019 con los autores más productivos Caramori PH, Da Silva Ricce W, y Pitta-Alvarez S.; se encontró que la información climática tiene limitaciones de disponibilidad, se identificaron valores atípicos leves y extremos, incrementos y decrementos, valores repetidos consecutivos, que se deben revisar antes del análisis. Al considerar una fecha de siembra al 20% libre de heladas, esta, debe ser posterior a 15 de marzo, y se encontró que solo dos estaciones cumplen el umbral de precipitación y tres de las unidades calor con el 100% de probabilidad. Además, que los periodos secos son limitantes de la región.

Palabras clave: climatología, riesgos, probabilidad, requerimientos.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: M.C. Juan Antonio Trinidad Santos

Director de Tesis: Dr. Ramón Arteaga Ramírez

GENERAL ABSTRACT

AGROCLIMATIC CHARACTERIZATION OF THE MIDDLE APULCO RIVER BASIN IN THE NORTHEASTERN REGION OF PUEBLA

In recent years, climate variability has jeopardized agricultural yields. The research problem stems from the uncertainty regarding the occurrence of climatic events and the agroclimatic availability, which compromise maize production. Therefore, it is necessary to investigate methodologies that improve these conditions. The general objective of the study was to perform an agroclimatic characterization for maize cultivation in the middle Apulco River basin in the northeastern region of Puebla. The specific objectives were: (1) To conduct a bibliometric analysis and review methodologies for agroclimatic zoning from 1990 to 2024; involving a systematic literature review and a bibliometric analysis by using the Bibliometrix software, focusing on the keywords agroclimatic, agroecological and edaphoclimatic zoning; (2) to characterize climate information from 19 meteorological stations for the period of 1980-2018; (3) to conduct an agroclimatic characterization of 19 meteorological stations using the Climatol 4.0.0 software in R, InStat+v3.36 and QGIS software package. The results showed an upward trend in the annual scientific production between 2002 and 2019, being Caramori PH, Da Silva Ricce W, and Pitta-Alvarez the most productive authors. Furthermore, it was found that climate data exhibit availability limitations, including mild and extreme outliers, increases and decreases, and repeated consecutive values that must be reviewed before analysis. Considering an optimal planting date with a 20% frost-free probability, this should be after March 15. It was determined that only two stations meet the precipitation threshold, and three meet the heat unit threshold with a 100% probability. Additionally, dry spell represents a limitation for the region.

Keywords: climatology, risks, probability, requirements.

Thesis of Phd in Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma
Chapingo

Author: M.C. Juan Antonio Trinidad Santos

Advisor: Dr. Ramón Arteaga Ramírez

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Importancia del problema

La importancia del problema radica en que el cultivo de maíz es la base para la alimentación mexicana, ya que se consume en una gran variedad de alimentos, por lo que su suministro debe siempre ser garantizado. De no hacerse, se podría generar una crisis alimentaria y económica. Además, si se considera a la agricultura como una actividad de riesgos para la productividad y economía de los productores. Es necesario tener una idea clara de los riesgos y recursos climáticos de las regiones agrícolas para la toma de decisiones. Ejemplo de ello es que Bermeo *et al.*, (2024) mencionan que el sector agrícola juega un papel importante en el crecimiento económico al generar el autoabastecimiento, ser fuente de empleo y generar materias primas. Además Berenice & López, (2022) mencionan que las alteraciones del clima están en el aumento en la temperatura, cambios en los patrones y en la precipitación e incluso en la duración de las estaciones del año. En lo referente al consumo, Araujo, (2022) menciona que durante el período 2012 al 2021, la demanda de maíz amarillo en México tuvo un constante incremento; el consumo humano en un 51.1%; el autoconsumo un 313%; el consumo pecuario un 208.30% y el uso industrial un 27%. Por lo que es de vital importancia prever suministros futuros de este vital grano con la menor cantidad de riesgos y en función de las ofertas climáticas. Pues, las decisiones de gestión y la selección inadecuadas de tierras podrían limitar la productividad (Purnamasari *et al.*, 2019).

1.2 Antecedentes

La región se encuentra en la zona Nororiental de Puebla dentro de la subcuenca del río Apulco. La región presenta relieve accidentado como declives, lomeríos y pequeñas planicies. Arvizu *et al.* (2015), confirman que la zona productora de

Zacapoaxtla se encuentra en un lugar geográficamente accidentado y las actividades de producción son de cultivos como granos, tubérculos y frutales.

En la región, uno de los principales cultivos es el maíz criollo, el cual se cultiva para la venta y autoconsumo, el cual es el principal alimento de la población. Sierra-Macias *et al.*, (2016) identificaron la presencia de 16 razas en el estado de Puebla. Además, que la agricultura es una fuente de ingresos, pero los productores enfrentan con problemas para la ubicación y el momento adecuado para el cultivo (Hamzeh *et al.*, 2014). Por lo que, de tener una caracterización agroclimática de la región, abren la posibilidad de reducir riesgos. Waongo *et al.*, (2015) mencionan que la fecha de siembra puede ser utilizada para ser una estrategia de gestión agrícola de bajo costo para aliviar el estrés hídrico y puede contribuir a mejorar la toma de decisiones agrícolas.

En relación con las bajas temperaturas, cuando esta alcanza niveles de congelación del agua, llega a provocar cristales de hielo entre los tejidos, llegando a causar la muerte celular y de la planta misma (FAO, 2010).

Por otro lado, las unidades calor se utilizan para estimar el desarrollo y el crecimiento de las plantas durante la temporada de crecimiento y se puede utilizar para evaluar las fechas de floración, madurez y cosecha de los cultivos (Hou *et al.*, 2014). Además, el concepto puede describir los parámetros asociados a las necesidades hídricas de los cultivos (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006).

Por lo que la carencia o exceso de ellos puede provocar pérdidas de producción. Lo que podría explicar y dar las bases para incrementar la productividad de la región ya que, según Velázquez *et al.*, (2019) menciona que, en el estado, los rendimientos para maíz de temporal se encuentran entre 2.64 y 0.34 ton/ha.

1.3 Justificación

En México, el cultivo más importante es el maíz, el cual se verá seriamente afectado a raíz del cambio climático y la reducción de áreas potenciales para su producción (Hernández *et al.*, 2018). Además de que la zona de estudio es una región que periódicamente es afectada por eventos climáticos. CENAPRED, (2001) menciona que el sistema volcánico transversal en los estados de México, Puebla y Tlaxcala es afectado por este fenómeno.

Por esta razón, es necesaria la caracterización de los riesgos y oferta agroclimática de la región que optimice el establecimiento de los cultivos. En la agricultura actual, la limitación de elementos climáticos y factores edáficos lleva al establecimiento de lugares y períodos donde las condiciones son menos adversas para las especies cultivadas (Matos *et al.*, 2017). Este estudio abre la posibilidad de evaluar la capacidad de los cultivos para mantener sus rendimientos y proporcionar la seguridad de la inversión y su diversificación. También que en la región no se ha realizado trabajos relacionados para la evaluación y mantenimiento del cultivo de maíz. Talchabhadel *et al.*, (2019) mencionan que la identificación de las características climáticas de una región ayuda a evaluar el potencial agroclimático de vegetales, animales y la selección de variedades de cultivos, e identificar regiones para producir altos rendimientos. Por lo que estos análisis permitirán la evaluación de los riesgos y considerar la oferta climática en la producción del maíz.

1.4 Objetivos

General

- Realizar la caracterización agroclimática para el cultivo de maíz en la parte media de la cuenca del río Apulco en la zona Nororiental de Puebla.

Específicos

- Realizar un análisis bibliométrico y metodologías para la zonificación agroclimática en el periodo 1990 - 2024.
- Elaborar la caracterización climática de la zona en estudio con el programa Climatol v4.0.0.
- Efectuar la caracterización agroclimática de la región en estudio con el programa Instat+ v3.36

1.5 Presentación de los capítulos.

Los capítulos desarrollados en el presente trabajo son cuatro:

Capítulo 2: Se realizó un análisis bibliométrico para la zonificación agroclimática en el periodo 1990-2024 con la base de datos Scopus. El trabajo consistió en la identificación del desarrollo del tema de investigación y las herramientas metodológicas para estos trabajos. Para ello, se realizó la revisión de las publicaciones en los lenguajes de español, inglés y portugués.

Capítulo 3: Se realizó una caracterización de la información climática disponible dentro del área delimitada. Para ellos se utilizaron 19 estaciones meteorológicas del periodo 1980 - 2018. Para el procesamiento de la información se utilizó el programa Climatol Versión 4.0.0. Los elementos mostrados fueron la disponibilidad por estación, disponibilidad total, los valores anómalos a tres distancias intercuartílicas, los histogramas, los correlogramas, los dendrogramas

y la distribución espacial para las variables tmax, tmin, prec, evap y análisis de heladas.

Capítulo 4: Se realizó la caracterización agroclimática en función del requerimiento del cultivo de maíz con el programa Instat+ v3.36. Para ello se determinó, la probabilidad de ocurrencia de heladas a 20% a la temperatura de 4°C, la probabilidad de que ocurra un valor igual o mayor de 1500 días grado desarrollo, 500 mm de precipitación y la fecha de periodos secos con probabilidad a 20% de ocurrencia de siete días en los siguientes 30 días.

1.6 Literatura citada

- Araujo, L. A. (2022). Demanda, oferta y precio de maíz amarillo en México 2012-2021. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 50, 197–208. <https://www.redalyc.org/journal/141/14173239008/html/>
- Arvizu, E., Mayett, Y., Martínez, J. L., & Olivares, E. (2015). Mercados rurales agrícolas de Huixcolotla y Zacapoaxtla, Puebla: potencial para el desarrollo económico regional. *Revista Global de Negocios*, 3(2), 71–82. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/287116694_Mercados_rurales_agricolas_de_Huixcolotla_y_Zacapoaxtla_Puebla_potencial_para_el_desarrollo_economico_regional
- Berenice, O., & López, B. (2022). Influencia de los factores climáticos en la producción de maíz en México. *El Semestre de las especializaciones*, 2, 83–112. Recuperado de https://www.depfe.unam.mx/especializaciones/revista/3-2-2022/03_EAE_Benitez-Lopez_2022.pdf
- Bermeo, O. X., Dávila, W. J., Guevara, V. I., & Arevalo, L. M. (2024). Análisis de datos agro-meteorológicos en la gestión de actividades de producción de cultivos transitorios en el litoral ecuatoriano. *Revista Alfa*, 8(23), 593–609. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i23.288>
- CENAPRED. (2001). Centro Nacional de Prevención de Desastres. Serie fascículos: heladas. In Centro nacional de prevencion de desastres. Recuperado de <https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/serie-de-fasciculo-heladas?state=published>
- de Matos, R. M., da Silva, P. F., Borges, V. E., de Medeiro, R. M., Megna Francisco, P. R., & Dantas Neto, J. (2017). Zoneamento agroclimático da palma

- forrageira para o município de Barbalha - CE. *Espacios*, 38(23). Recuperado de <https://www.revistaespacios.com/a17v38n23/a17v38n23p27.pdf>
- FAO. (2010). Protección contra heladas: fundamentos, prácticas y economía. <https://www.fao.org/4/y7223s/y7223s.pdf>
- Hamzeh, S., Mokarram, M., & Alavipanah, S. K. (2014). Combination of Fuzzy and AHP methods to assess land suitability for barley: Case Study of semi arid lands in the southwest of Iran. *Desert*, 19(2), 173–181. https://jdesert.ut.ac.ir/article_52346.html
- Hernández, M., García, G., Orozco, H., & Juárez, M. G. (2018). Vulnerabilidad socioambiental del maíz nativo frente al cambio climático en el estado de Tlaxcala, México / Socio Environmental Vulnerability of the Native Maize against Climate Change in the State of Tlaxcala, Mexico. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(14), 53–76. <https://doi.org/10.23913/ciba.v7i14.80>
- Hou, P., Liu, Y., Xie, R., Ming, B., Ma, D., Li, S., & Mei, X. (2014). Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize. *Field Crops Research*, 158, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.021>
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., & Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en Maíz en el Norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), 13–25. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952006000100013
- Íñiguez-Covarrubias, M., Ojeda-Bustamante, W., & Sifuentes-Ibarra, C. D. E. (2014). Análisis de cuatro variables del período de lluvias asociadas al cultivo maíz de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(1), 101–114. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000100009
- Purnamasari, R. A., Noguchi, R., & Ahamed, T. (2019). Land suitability assessments for yield prediction of cassava using geospatial fuzzy expert systems and remote sensing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166(July), 105018. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105018>
- Sierra-Macias, M., Andres-Meza, P., Palafox-Caballero, A., & Meneses-Marquez, I. (2016). Diversidad genética, clasificación y distribución racial del maíz nativo en el estado de Puebla, México. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 3(9), 12–21. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias/vol3num9/Revista_de_Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias_V3_N9_3.pdf

- Talchabhadel, R., Karki, R., Yadav, M., Maharjan, M., Aryal, A., & Thapa, B. R. (2019). Spatial distribution of soil moisture index across Nepal: a step towards sharing climatic information for agricultural sector. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3–4), 3089–3102. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02801-3>
- Velázquez, J., Juárez, J. P., Ramírez, B., Del Valle, M., Jiménez, J., & Taboada, O. R. (2019). Regionalización de la producción de maíz de temporal en el Estado de Puebla, México. *Cuadernos Geográficos*, 58(2), 152–167. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i2.7531>
- Waongo, M., Laux, P., & Kunstmann, H. (2015). Adaptation to climate change: The impacts of optimized planting dates on attainable maize yields under rainfed conditions in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology*, 205, 23–39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.006>

2 ANALISIS BIBLIOMÉTRICO Y METODOLOGÍAS SOBRE LA ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA DURANTE 1990- 2024

2.1 Resumen

La zonificación agroclimática permite un mejor uso de los recursos genéticos de los cultivos para aprovechar su potencial en las áreas productivas. El análisis de la bibliografía sobre el tema de zonificación permitió conocer su desarrollo en el frente de investigación y ofrece la posibilidad a nuevos retos e innovaciones. Por este motivo, se realizó una revisión sistemática de literatura (RSL) de publicaciones originales entre el periodo 1990 – 2024 con el núcleo de búsqueda de Elsevier Scopus en el mes de julio del 2024. Las palabras claves como criterios de selección fueron: Zonificación Agroclimática, Zonificación Agroecológica, Zonificación Edafoclimática para publicaciones en español, inglés y portugués. El objetivo fue realizar un análisis bibliométrico, e identificación de los cultivos y metodologías mediante una RSL. Se utilizó para el análisis la aplicación bibliometrix donde se obtuvieron los indicadores de: producción científica anual con una tendencia positiva entre los años 2002 al 2019; el promedio de citas por año con los valores más altos en los años 2010, 2004, 2022 y 2015; el análisis de relación por país-revistas-autores, donde Brasil, Argentina y España están vinculados a las publicaciones: Revista Brasileña de Ingeniería Agrícola y Ambiental, Revista Brasileña de Fruticultura, y Semina: Ciencias agrícolas, con los autores Caramori Ph, Da Silva Ricce W and De Carvalho Slc; los documentos más citados a nivel global destacan a los producidos por Tanasijevic L. (2014), Assad ED (2004) y Araya A (2010); en los autores más relevantes y su producción en el tiempo destacan Caramori PH, Da Silva Ricce W, y Pitta-Alvarez S. Para la colaboración dentro y fuera de su país se encontró a Brasil, Argentina y Irán. El análisis de los trabajos mostró una tendencia hacia los estudios sobre zonificación agroclimática y el interés por los cultivos frutícolas, los cereales y el cambio climático. En cuanto a las metodologías, se encontró una tendencia hacia el uso de lógica difusa, árboles aleatorios, lenguaje de programación R y sistemas de información geográfica (SIG).

Palabras clave: Idoneidad, clima, cultivos, necesidades bioclimáticas, aptitud agroclimática.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: M.C. Juan Antonio Trinidad Santos

Director de Tesis: Dr. Ramón Arteaga Ramírez

2.2 Introducción

Los trabajos de zonificación agroclimática inciden en la producción agrícola para una mejor utilización de los recursos de una región. Según Olivares-Campos, Hernández, Arias-Valdespino, Molina-Trigos, y Pereira-Bravo (2018), que se orientan a direccionar la inversión del sector agropecuario y delimitar las áreas con aptitud para el desarrollo de cultivos. Por lo tanto, en el proceso de establecimiento del cultivo para el cumplimiento de los programas de desarrollo de una región, es indispensable el análisis de sus principales requerimientos ecológicos, para ser comparadas con el comportamiento de las variables climáticas (Baltazar-da Silva *et al.*, 2020). Una clasificación agroclimática adecuada ayudará a los formuladores de políticas, inversionistas y agricultores a determinar la idoneidad del cultivo y prevenir las limitaciones de este, así como planificar estrategias de desarrollo a corto y largo plazo en escenarios de cambio climático (Araya *et al.*, 2010). Para una zonificación se debe tener la información requerida, según Pineda y Suárez, (2014), los criterios utilizados para el desarrollo del SIG son geopedológicos (geomorfología y suelos), climatológicos y los requerimientos edafoclimáticos del cultivo. Existen varios tipos de zonificación que tienen como base las condiciones climáticas, y su utilización está en función de las necesidades agroecológicas de los cultivos, y los recursos bióticos y abióticos disponibles. Algunas de estas variantes son la Zonificación Agroclimática, Agroecológica y Edafoclimática.

Las zonas agroclimáticas se pueden definir como porciones de tierra integradas y homogéneas en las que las combinaciones de recursos hídricos potencialmente disponibles y las condiciones climáticas crean ambientes únicos más o menos adecuados para el cultivo (Alwan *et al.*, 2019). Olivares-Campos *et al.*, (2018) mencionan que el desarrollo de la zonificación agroclimática, además de permitir la localización de áreas con mayor vocación para actividades productivas, también permite reconocer la ubicación de la infraestructura disponible para el

impulso de la soberanía y seguridad alimentaria de un país. La zonificación agroclimática permite delimitar ambientes homogéneos desde la perspectiva de un cultivo en particular, y proporciona un enfoque útil para la planificación regional, la agronomía y la identificación de desafíos de investigación (García-Barreda *et al.*, 2019).

La zonificación agroecológica (ZAE) es una de las herramientas útiles para reconocer las capacidades de la tierra para ser asignada a los mejores y más rentables tipos de productividad. La ZAE, tal como se aplica en los estudios de la FAO, define zonas con base en combinaciones de topografía, suelo, uso de la tierra y características climáticas (Nabati *et al.*, 2020). Las metodologías de zonificación agroecológica ayudan a ubicar aquellos tipos de uso del suelo que se ajustan mejor a las características físicas de una región (Pérez-Portilla & Geissert-Kientz, 2006). Un trabajo de zonificación agroecológica comprende el análisis de la información climática, edáfica y de los requerimientos ambientales del cultivo, los cuales se estudian mejor en las áreas donde este se desarrolla, especialmente cuando las plantas tienen un buen crecimiento (Soto *et al.*, 2001).

Al considerar las metodologías y la variabilidad de trabajos para casos particulares, se hizo una RSL complementado con un análisis bibliométrico. Según Koutsos, Menexes, y Dordas (2019), una RSL en general se ha aceptado como un tipo de revisión de literatura eficaz, más completa, repetible y menos sesgada que puede conducir a conclusiones a partir de evidencia. Posteriormente, un análisis de bibliometría se puede definir como un análisis cualitativo y cuantitativo de la investigación que a menudo se utiliza para evaluar el impacto de un investigador individual, grupos de investigación, instituciones, países o revistas (Krauskopf, 2018). Estos análisis también pueden acceder a la calidad de los estudios, analizar las áreas clave de investigación y predecir la dirección de futuros estudios (Yu *et al.*, 2020).

Por lo que, el objetivo de este documento fue realizar un análisis bibliométrico de una revisión sistemática de literatura y una recopilación de las herramientas que

se utilizan en los trabajos de zonificación agroclimática, agroecológica y edafoclimática.

2.3 Materiales y métodos

La recopilación de la documentación se realizó al considerar las palabras clave Zonificación Agroclimática, Zonificación Agroecológica y Zonificación Edafoclimática. Posteriormente, con ayuda de Traductor DeepL (<https://www.deepl.com/es/translator>) se identificaron sus respectivos sinónimos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Sinónimos de palabras de búsqueda.	
Palabra clave	Sinónimos en ingles
Zonificación Agroclimática	Agroclimatic Zoning, Agro-climatic Zoning
Zonificación Agroecológica	Agroecological Zoning, Agro-ecological zoning
Zonificación Edafoclimática	Edaphoclimatic Zoning, Soil and climate zoning

Con la ayuda de la base de datos Scopus se realizó la búsqueda donde se consideró que las seis palabras estén incluidas en el título. Los filtros consistieron en investigar a todas las publicaciones disponibles del año 1990 al 2024, que generó un resultado de 201 documentos (Cuadro 2) de los cuales de acuerdo con el diagrama PRISMA se consideraron 134 (Figura 1).

Los artículos fueron obtenidos por acceso libre y de acceso institucional por parte de la Universidad Autónoma Chapingo y Colegio de Postgraduados.

Cuadro 2. Criterios de exclusión e inclusión y resultados obtenidos.

Filtros	Búsqueda	Documentos	Considerados
Scopus	TITLE-ABS-KEY ("Agroclimatic Zoning" OR "Agro-climatic Zoning" OR "Agroecological Zoning" OR "Agro-ecological zoning" OR "Edaphoclimatic Zoning" OR "Soil and climate zoning") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Portuguese") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Spanish"))	201	134

Note: DOCTYPE: Document type, "ar": article, SRCTYPE: Source type, "j": journal.

Las preguntas de investigación fueron las siguientes. ¿Cómo se han desarrollado estos temas de investigación? y ¿Cuáles son las principales metodologías y herramientas que se han aplicado en trabajos de zonificación?

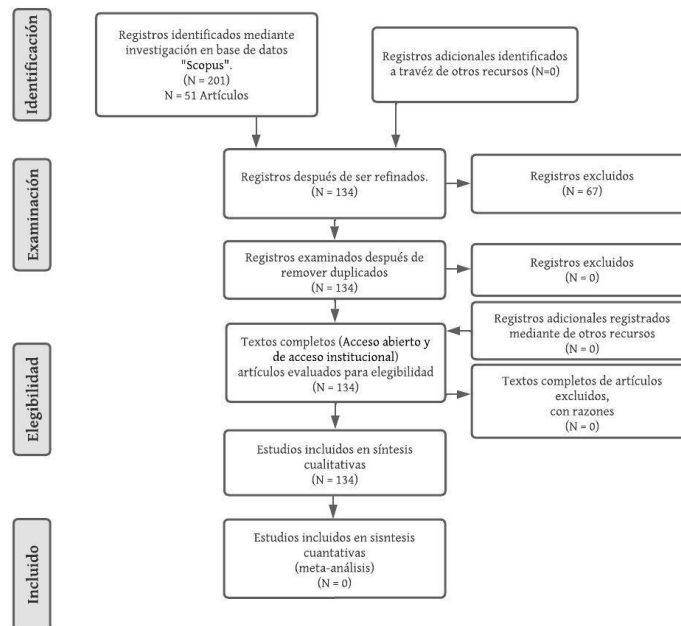


Figura 1. Diagrama de flujo de una revisión sistemática con base en el diagrama PRISMA.

2.3.1 Análisis bibliométrico

Para el análisis de la información se utilizó la herramienta Bibliometrix, que puede realizar un análisis de mapeo de la ciencia que identifica las principales áreas temáticas que son objeto de investigación, su composición, relación y evolución durante el período analizado (López-Robles *et al.*, 2019). Los análisis realizados fueron la producción científica anual, el promedio de citas por año, análisis de relación por país-revistas-autores, los documentos más citados a nivel global, los autores más relevantes, la producción de autores en el tiempo, la colaboración por países, la frecuencia de palabras clave, el análisis de co-citación y el análisis de colaboración.

Pérez y Merino, (2020) mencionan que una de las técnicas que más se utilizan para evaluar el rendimiento de un área de investigación es el análisis de citas (co-citación), que parte del supuesto de que “un artículo es más relevante o tiene un mayor impacto cuanto mayor es el número de citas que ha recibido”. En el caso de la red de colaboración según Miguel *et al.*, (2006) este proporciona información acerca de la cooperación científica entre varios investigadores y los diferentes grupos.

2.3.2 Análisis de lecturas

La integración final de los componentes para la realización de una zonificación depende de la finalidad con la que se realiza. Por lo cual, se elaboró un resumen de la información recolectada de diversas publicaciones donde se identificaron cultivos, tipo de zonificación, fuentes de información, elementos utilizados, metodologías y software de procesamiento.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Información principal

Con los criterios de búsqueda se encontraron 201 artículos de los cuales 134 se recuperaron. El Cuadro 3 indica las estadísticas de los documentos incluidos.

Cuadro 3. Información principal de los documentos incluidos.

Información principal	Resultados
Periodo de tiempo	1992:2024
Revistas	93
Documentos	134
Citas promedio por documentos	11.8
Tasa de crecimiento anual %	5.41
Referencias	5180
Tipos de documentos	
Artículos	134

2.4.2 Producción científica anual

En la producción científica anual se puede observar que del año 2002 al 2019 presenta una tendencia positiva. Sin embargo, también se notan los años con caídas en la producción, que corresponde a 2010, 2023, 2015, 2020 y 2022 (Figura 2).

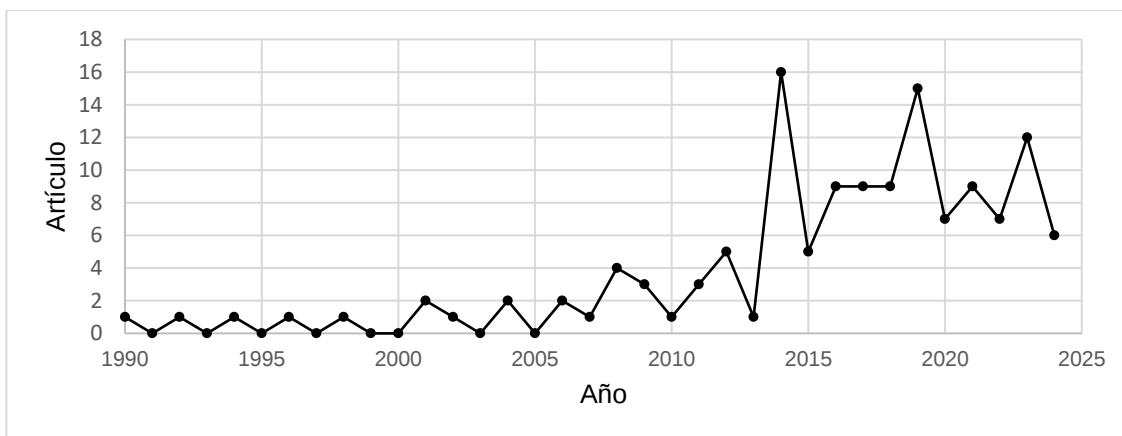


Figura 2. Producción científica anual.

2.4.3 Promedio de citas por año

En el caso del promedio de citas anual se observó que los más citados fueron el año 2010 seguidos por el 2004, 2022 y 2015. En cambio, la menor cantidad de citas realizadas en los últimos años fueron el 2013, 2016 y 2023. Sin embargo, sin la consideración del año 2024 se puede apreciar una tendencia positiva.

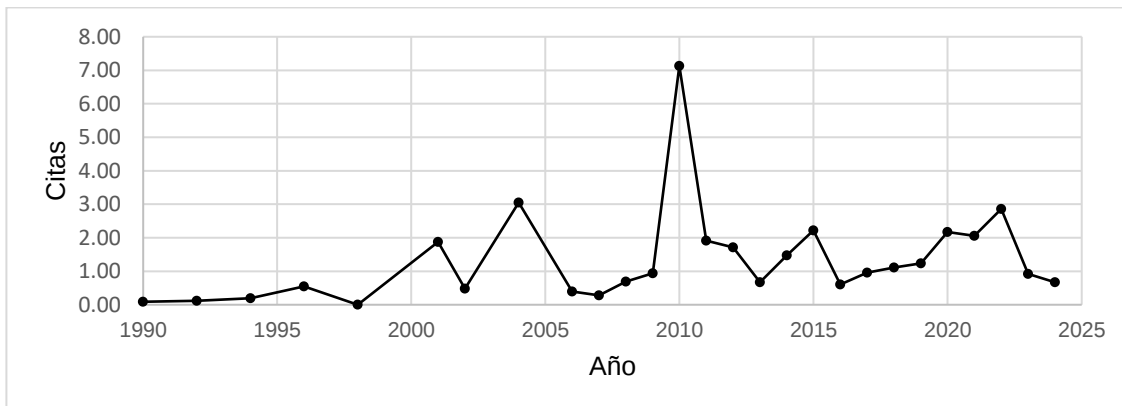


Figura 3. Promedio de citas por año.

2.4.4 Relación por país-revistas-autores

En la figura 4, se muestran las relaciones entre los principales países, revistas y autores. Donde se aprecian que los países más productivos de estos contenidos son Brasil, Argentina y España; que se vinculan entre las publicaciones la *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *Revista Brasileira de Fruticultura*, *Semina: ciencias agrícolas*, y *Meteorología agrícola y forestal*; y entre los autores Caramori Ph, Da Silva Ricce W, De Carvalho Slc, Roberto Sr. y Falasca S.

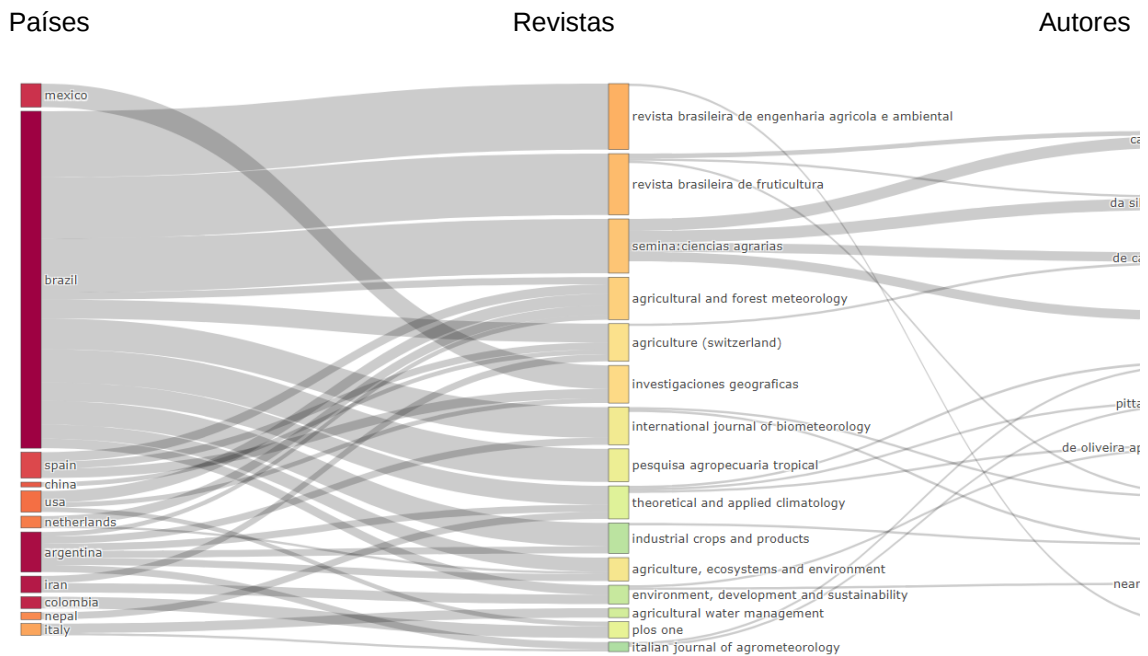


Figura 4. Gráfico de tres campos de países revistas y autores.

2.4.5 Documentos más citados a nivel global

En los 10 documentos más citados y las revistas en las que pertenecen (Figura 5) se destacan Tanasijevic L. en *Agricultural Water Management* (2014), Assad ED en *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* (2004), Araya A. en *Agricultural and Forest Meteorology* (2010) y Bunn C. en *PLoS ONE*.

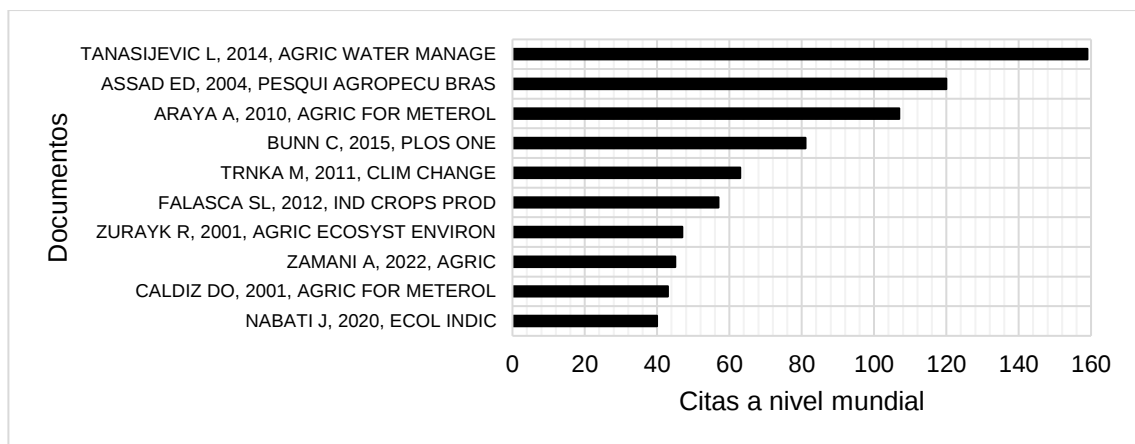


Figura 5 Documentos más citados a nivel mundial.

2.4.6 Autores más relevantes

De los 572 autores de las 134 publicaciones (ver Figura 6), los autores que tienen mayor participación son Caramori Ph en ocho, Da Silva Ricce W en seis, Pitta-Alvarez S en seis seguidos por De Carvalho Slc, Falasca S, and Falasca SL con cinco; el resto participó en cuatro publicaciones o menos.

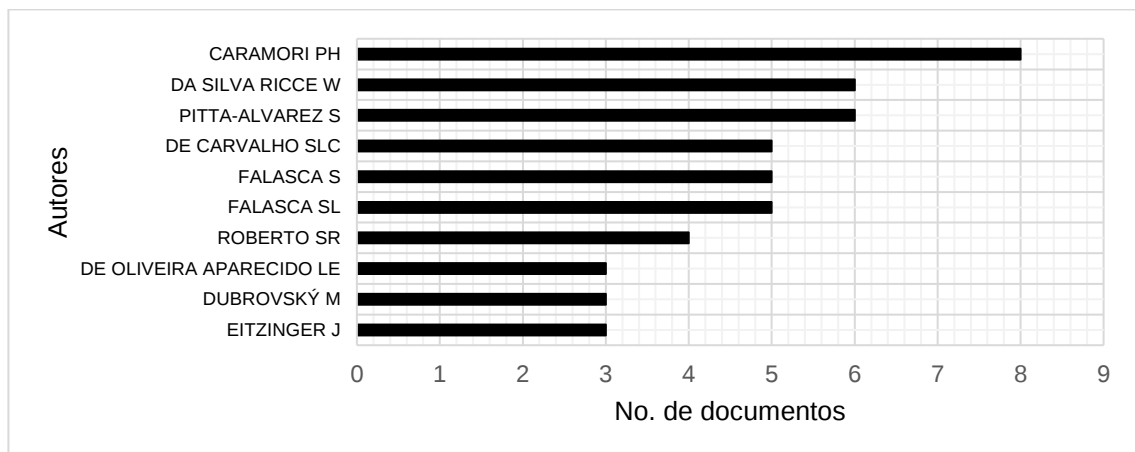
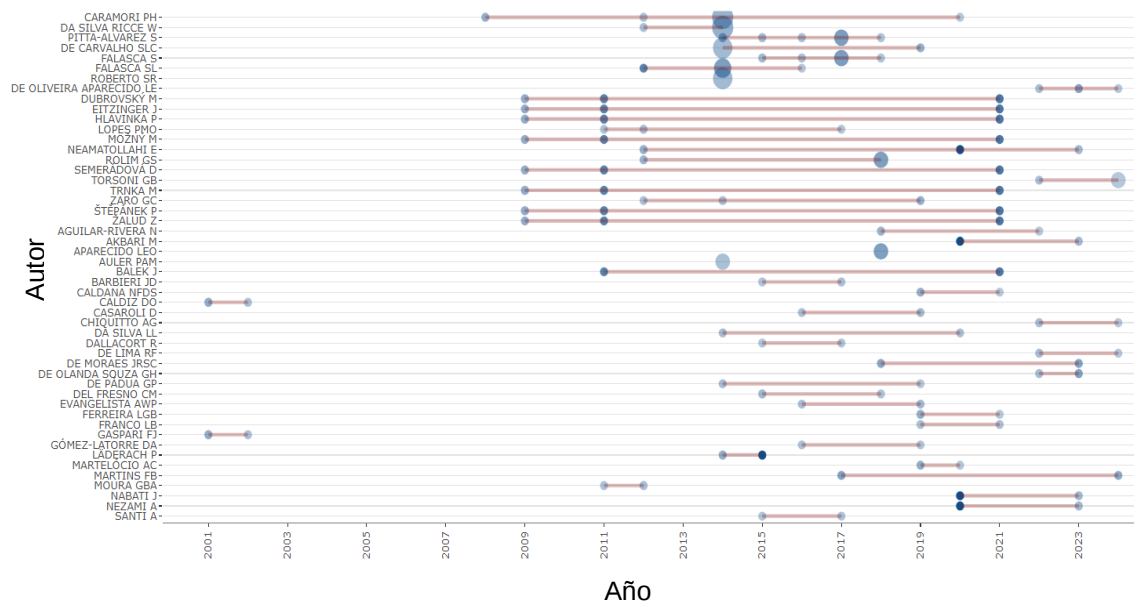


Figura 6. Autores más relevantes.

2.4.7 Producción de autores en el tiempo

En la productividad de los autores relevantes en diferentes periodos, se destacan Caramori Ph (2008-2020), seguido Da Silva Ricce W (2012-2018), Pitta-Alvarez

S (2014-2018) y De Carvalho Slc (2014- 2019). Algunos de los autores que empezaron a trabajar en el tema son De Oliveira Aparecido LEO, Torsoni GB, Akbari M, Chiquitto Ag, Neamatollahi E, De Lima Rf, De Olanda Souza Gh, Nabati J and Nezami A in 2020 (Figura 7). En consecuencia, entre los autores que empezaron trabajos de zonificación, se identificó la utilización de la lógica difusa. D´Negri & De Vito (2006), menciona que la lógica difusa es una metodología que proporciona una manera simple y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa, con ruido o incompleta.



2.4.8 Colaboración de países

En la colaboración intra-país (SCP) se resaltan los publicados en Brasil, Argentina e Irán, y en las colaboraciones inter-país (MCP) destaca Brasil, Italia, Argentina, Irán, Colombia y USA. A su vez, los países de Brasil, Argentina, Irán, México, Colombia, Italia, China e España tienen colaboraciones dentro y fuera de su país, lo que indica un intercambio de conocimiento y divulgación de su contenido (Figura 8).

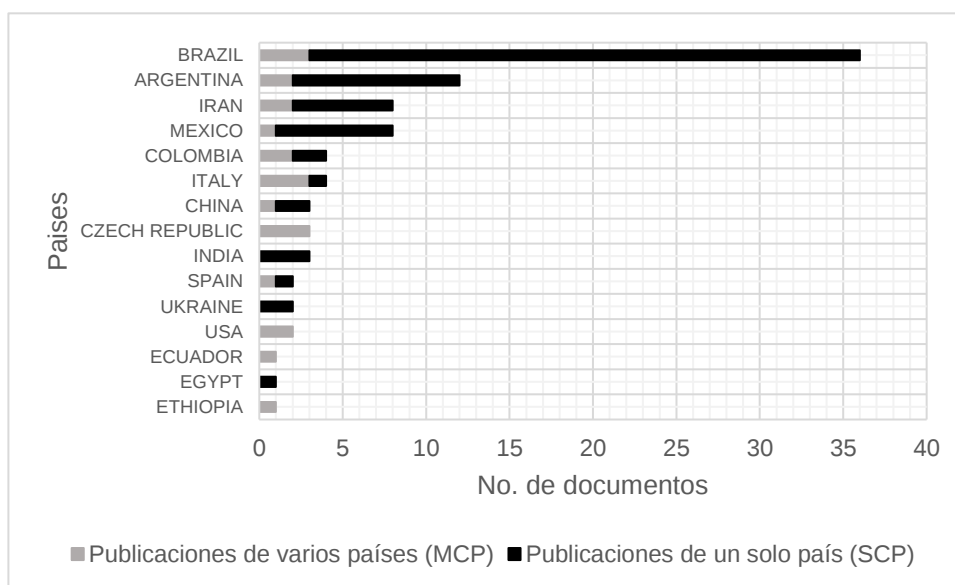


Figura 8. Colaboración entre los países.

2.4.9 Frecuencia de palabras clave

En el análisis de frecuencias de palabras clave se analizan los términos comunes en las publicaciones. Las más destacadas son “agroclimatic zoning”, “agro-ecological zoning”, “gis”, “argentina”, “agroecological zoning”, “zoning” y “agrometeorology” (Figura 9a), lo cual facilita las búsquedas relacionadas con el tema. En el gráfico de nube se muestran la frecuencia de las palabras según la posición y el tamaño de las letras (Figura 9b).

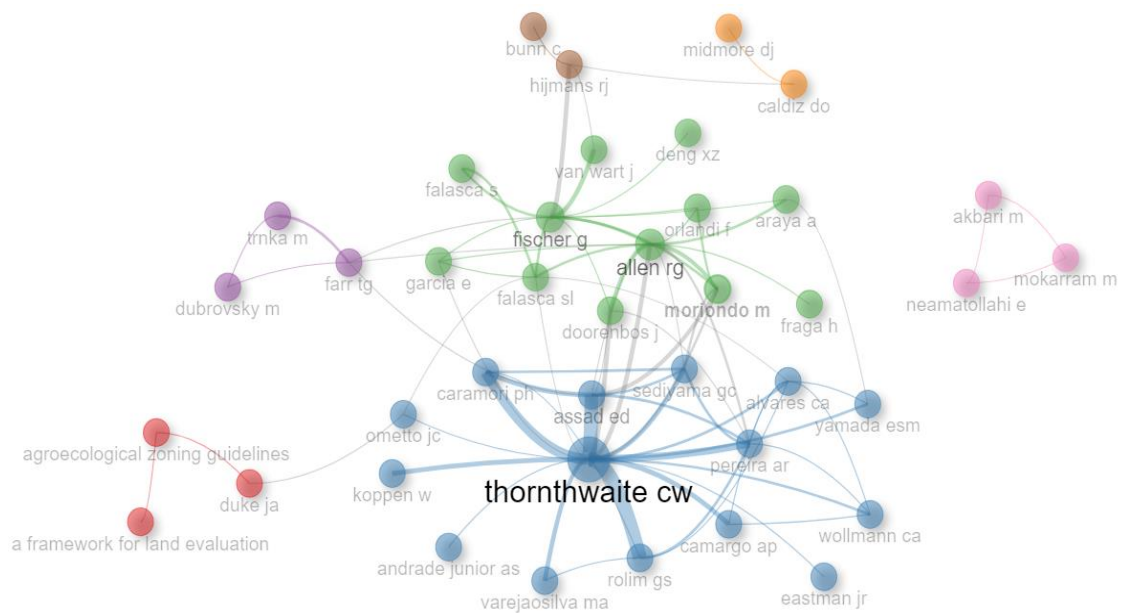


Figura 10. Red de co-citación.

2.4.11 Análisis de colaboración

En la red de colaboraciones con dos publicaciones se identificó siete grupos de trabajo y con mayor de cuatro se encontró solo a los autores Caramori Ph, Da Silva Ricce W, Falasca S and Pitta-Alvarez S. Por lo que los principales grupos de colaboración al menos dos publicaciones están compuestos de la siguiente manera: grupo café (Caramori Ph, Da Silva Ricce W), grupo rosa (Semerádová D), grupo verde (Falasca S), grupo morado (Neamatollahi E and Akbari M), grupo naranja (Rolim GS and Aparecido LEO), grupo azul (De Moraes JRSC, Torsoni GB and de Oliveira LE) y grupo rojo (De Albuquerque GB and Lopes PMO) (Figure 11).

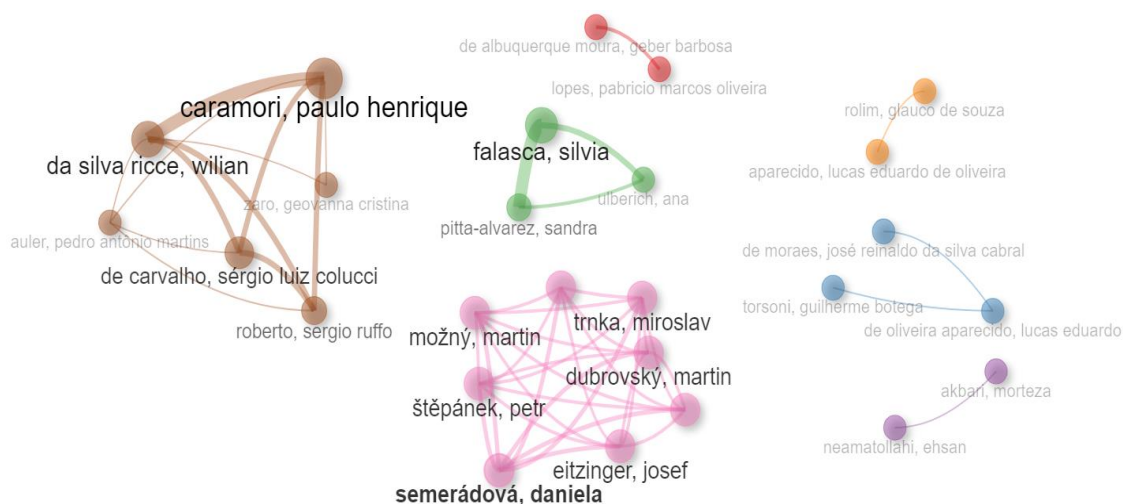


Figura 11. Red de colaboración entre autores.

2.4.12 Acceso a las publicaciones

En la parte del acceso se encontró que solo el 7% de las publicaciones (10 artículos) no fueron consultadas por problemas de descarga. Las revistas de las que pertenecen son *Ciencia de cultivos y pasturas*, *Revista Europea de Agronomía*, *Revista de Investigación Avanzada en Sistemas Dinámicos y de Control*, *Desarrollo Ambiental*, *Revista de la Ciencia de la Alimentación y la Agricultura*, *Revista de la Ciencia de la Alimentación y la Agricultura*, *Monitoreo y Evaluación Ambiental*, *Ecología*, *Medio Ambiente y Conservación*, *Semina: Ciencias Agrarias* y *Revista Rusa de Ecología*. Sin embargo, con la consulta del 93% de las publicaciones se considera una buena población de estudio de la base de datos Elsevier Scopus (Figura 12).



Figura 12. Porcentaje de artículos consultados y no consultados.

2.4.13 Análisis de los artículos

En el Cuadro 4 se presenta un resumen de una muestra del 25% de los artículos más recientes y autores más relevantes (2020 – 2024). El análisis de las publicaciones consultadas considera cultivos, tipo de zonificación, fuente de información, elementos o variables utilizadas, metodologías, procesamiento y referencias.

El análisis de las lecturas determinó que las zonificaciones tienen diversas finalidades, desde cultivos para la alimentación humana, biocombustibles, frutales, hongos comestibles y aromáticos. Entre los cultivos para consume humano están: rábano, lechuga, espinaca, cebolla, centeno, avena, cebada, fibra de lino, patatas, trigo, remolacha azucarera, girasol, soja, maíz, arroz, melón, calabaza, té, cítricos, haba, café, tomate, papa y aguacate. De los cultivos para uso en la producción de biocombustibles están la higuera (*Ricinus communis* L.), planta rodadora (*Salsola kali*), Cultivo de jatrofa (*Jatropha curcas* L.), la palma macauba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd.) y *Lesquerella fendleri*. En los cultivos frutales están el durazno, nectarina, piña, uva, manzana, pera, durazno, mango y plátano. Entre otros cultivos están la trufa negra, azafrán, algodón y bambú respectivamente.

En los diferentes tipos de zonificación se encontró que 70 corresponden a Agroclimática, 48 Agroecológica, cinco de Suelo-Agroecológica y Edafoclimática respectivamente, un terroir y otras palabras incluidas como sectorización ecoterritorial, aptitud de la tierra, duración del período de crecimiento. De estos estudios se destaca el uso de información climática, edafológica, topográfica, uso de suelo, red de drenaje, muestras de población y la dinámica temporal del rendimiento, que genera la posibilidad de realizar metodologías de zonificación de acuerdo con las necesidades de producción.

En las fuentes de información destacan las estaciones meteorológicas, generadores climáticos como Global Climate Data (WorldClim), datos climáticos con base en satélites y estaciones meteorológicas automáticas y sistemas de pronóstico climático.

En el caso de los estadísticos y metodologías para el procesamiento de la información se utilizaron los sistemas difusos, arboles aleatorios, análisis multicriterio, el método de combinación lineal ponderada (WLC), análisis de componentes principales (PCA), una extensión del análisis de componentes principales (MULTISPATI-PCA), grupos de k-medias, prueba de Koenker-Bassett para conglomerados, ecuaciones de regresión múltiple, análisis de varianza, la metodología Papadakis, balance hídrico propuesto por Thornthwaite y Mather, ecuaciones de regresión con base a la altitud y coordenadas UTM.

En cuestión de herramientas para el procesamiento estadístico (Geoda095i, Librerías stats, REdaS y GWmodel en R.), para el manejo de la información climática (Modelo BISm, la herramienta USDA-ARS, el modelo de simulación Gzones Versión 1.0, programa CLIMA, Programa Estima_T, software desarrollado por Rolim en Excel y CropWat), la estimación del rendimiento potencial (el modelo de simulación LINTUL-POTATO).

En los programas de integración de la información se distinguieron ArcGis, Qgis, ArcView, GIS IDRISI, Surfer, FRAGSTATS v4, SPRING y JAMGIS.

Cuadro 4. Resumen de la información y herramientas que se consideró en cada publicación.

Num.	Cultivo	Zonificación	Fuente y tipo de información	Elementos	Metodología	Procesamiento	Referencia
1	Garbanzo	ZA	SM y DEM	Clima, topografía, suelo y uso de suelo	Sistema de lógica difusa, combinación lineal ponderada (WLC).	GIS	(Nabati <i>et al.</i> , 2020)
2	Granos de cacao (Theobroma cacao L.)	ZAE	WorldClim 2.1, SoilGrids 2.0, DEM de CGIAR, Cobertura terrestre del Servicio Mundial de Tierras de Copernicus (CGLS-LC100)	Clima, edafología y orografía y criterios socioeconómicos	Proceso de jerarquía analítica (AHP), entropía máxima (MaxEnt) y AHP-MaxEnt combinados	ArcGIS 10.5	(Rojas-Briceño <i>et al.</i> , 2022)
3	Trigo, frijoles, naranja	ZAE	SM, perfiles de suelos recopilados por INEGI, DEM	Clima, suelo, topografía	Zonificación Agroecológica Global (GAEZ), ECOCROP y Papadakis	GIS	(Gutiérrez <i>et al.</i> , 2023)
4	Yuca (TMS98/0505)	ZAE	Nigeria Meteorological Agency (NIMET), Climate Research Unit (CRU), DEM	Clima, suelo, topografía	Análisis multicriterio	Software R, paquetería de Microsoft Excel, ArcGIS 10.5	(Akinwumiju <i>et al.</i> , 2020)
5	Camote (Ipomoea batatas (L.) lam.)	ZA	SM de IAPAR y SIMEPAR	Clima, suelo	Requisitos climáticos (precipitaciones, temperatura media anual y temperatura del mes más frío y riesgo de heladas)	Software Statistica, sigma Plot, ArcGIS 10.5	(Martelócio <i>et al.</i> , 2020)
6	No especificado	ZA	Datos de la estación (CHIRPS), DEM de SRTM, conjunto de datos de suelos del Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos (ISRIC), uso de suelo/cobertura terrestre	Clima, pendiente, suelo, topografía, uso de la tierra/cobertura terrestre	Índice de salud de la vegetación Índice de aridez, Toma de decisiones multicriterio (MCDM) y proceso analítico jerárquico (AHP)	ArcGIS 10.8.1	(Faraslis <i>et al.</i> , 2023)
7	Azafrán	ZA	SM, DEM, Landsat 8 Satellite	Clima, suelos, altimetría y condiciones hídricas	Lógica difusa, método de combinación lineal ponderada (WLC)	ArcGIS	(Zamani <i>et al.</i> , 2022)
8	Trigo	ZAE	No menciona	Clima, suelos	Grados día de crecimiento (GDD), Estacionalidad de la temperatura, Índice de aridez anual, Índice de aridez anual Interpolador IDW, la probabilidad de ocurrencia se basó en series históricas de temperaturas mínimas, Balance Hídrico Climatológico, zonificación de riesgo agroclimático.	SIG 10.5	(Dadrasi <i>et al.</i> , 2023)
9	Banana (musa sp)	ZA	SM de IAPAR y SIMEPAR, DEM from SRTM	Clima, topografía	Superposición de mapas base digitales de temperatura, precipitación, textura del suelo y pH	Qgis, ArcGis 10.0	(Da-Silva <i>et al.</i> , 2021)
10	Plantas medicinales	ZAE	SM	Clima, edafología	Demanda de agua para riego, huella de escasez hídrica	GIS 10.3	(Singh <i>et al.</i> , 2021)
11	Cacao (Theobroma cacao L.)	ZA	SM de ANA	Clima			(Olegário <i>et al.</i> , 2022)

Num.	Cultivo	Zonificación	Fuente y tipo de información	Elementos	Metodología	Procesamiento	Referencia
12	Avena (Avena sativa L.), cebada (Hordeum vulgare L.), centeno (Secale cereale L.) y trigo (Triticum aestivum L.), maíz (Zea mays L.), mijo (Panicum italicum L.), arroz (Oryza sativa L.) y sorgo (Sorghum bicolor [L.] Moench), plátano (Musa paradisiaca L.), cítricos, papa (Solanum tuberosum L.) y caña de azúcar (Saccharum officinarum L.) Rábano, lechuga, espinaca, cebolla, centeno, avena, cebada, linaza, patatas, trigo, maíz para ensilaje, remolacha azucarera, girasol, soja, maíz, arroz, melón, calabaza, té, cítricos, algodón.	ZA	SM de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)	Clima, edafología	Clasificación climática de Papadakis y balance hídrico, el mapa de zonificación agroclimática se generó utilizando el método de interpolación inversa ponderada por distancia	ArcMap v. 10.5	(Mendoza-Cariño <i>et al.</i> , 2023)
13	Maíz, girasol, soja, uva vinícola, hortalizas, melocotones, albaricoques, remolacha azucarera, manzanas, melocotones, trigo, cebada, cerveza, patatas, centeno, lino, heno, cultivos forrajeros	ZAE	SM	Clima	Suma de temperatura activa (ΣT_{10})	No menciona	(Mingalev, 2021)
14	Mandioca (manihot esculenta crantz)	ZE	SM de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), serie II Continuo Nacional del INEGI	Clima, edafología	Determinación del período y la duración de la temporada de crecimiento por el método de Selyaninov (1930)	Interpolación por el método Krigin, ArcMap 10.3.1	(Del Rosario <i>et al.</i> , 2022)
15	Árbol de durazno	ZA	Recopilado del sitio web de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), climwat 2.0 para cropwat 8.0 (FAO)	Clima (lluvias, temperatura del aire y humedad), altitud	Se calculó la suma de las horas de enfriamiento por debajo de 7,2 °C y se utilizó la clasificación climática de Köppen para Mozambique para ayudar en la determinación de las regiones.	El método kriging ordinario, ArcGIS 10.1	(Fazenda <i>et al.</i> , 2023)
16	Maíz, girasol, soja, uva vinícola, hortalizas, melocotones, albaricoques, remolacha azucarera, manzanas, melocotones, trigo, cebada, cerveza, patatas, centeno, lino, heno, cultivos forrajeros	ZA	SM, DEM de SRTM	Clima, suelo, topografía	Conjunto de siete indicadores agroclimáticos. Esquema de zonificación agroclimática según Némec y simplificado por Trnka	Regresión kriging, software ProClimDB, modelo SoilClim	(Trnka <i>et al.</i> , 2021)
17	Moringa oleífera Lam. (Moringa)	ZA	El Atlas Climático de México del Centro de Ciencias de la Atmósfera, las cartas edáficas digitalizadas y las unidades de suelo del INEGI, la serie VI de uso del suelo y vegetación del INEGI.	Clima, edafología, usos del suelo/cobertura del suelo	El potencial agroecológico se clasificó en cinco categorías y cinco variables: tipo de suelo, uso de la tierra, intervalo de precipitación anual mínima y máxima, intervalo de temperatura máxima y mínima y altitud	ArcGis 10.7.1	(Carrión <i>et al.</i> , 2022)

Num.	Cultivo	Zonificación	Fuente y tipo de información	Elementos	Metodología	Procesamiento	Referencia
18	Caucho (Hevea brasiliensis Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.)	ZAE	WorldClim, mapa geopedológico de Colombia	Clima, edafología	Método del árbol de decisión	ArcGIS 10.7	(Correa-Pinilla <i>et al.</i> , 2022)
19	Miscanthus, pasto varilla, pasto canario, malva de Virginia, cardo, pasto de trigo alto, bambú, cáñamo, junco gigante, planta de copa	ZAE	No menciona	Clima, sistemas de producción, geopedología, información de cultivos	Superposición de capas	QGIS	(Parra <i>et al.</i> , 2023)
20	Manzana (Malus domestica, Bork)	ZE	SM de INMET, the landsat satellite's OLI, DEM	Clima, edafología, pendiente, uso del suelo/coertura del suelo	Superposición de capas	GIS software Idrisi Selva y ArcMap10	(Santos <i>et al.</i> , 2020)
21	Maíz, soja, girasol	ZAE	Imágenes de Landsat-8 y Sentinel-2	Dinámica intraestacional anual Dinámica del NDVI y monitoreo de la fenología en cultivos, Clima	Los valores promedio del NDVI por temporada de crecimiento, generalizados para cada región geográfica, se utilizaron para establecer las mejores zonas para el cultivo	No lo menciona	(Lykhovyd, 2023)
22	Vid	Terror (ZE)	SM de SAFRAN, GlobalSoilMap	Clima, edafología	Modelado lineal, criterio de información de Akaike (AIC) como criterio de información bayesiano (BIC), bosque aleatorio, análisis de componentes (PCA) y clasificación jerárquica ascendente (AHC), Prueba de alcance de Tukey	Paquete R 'FactomineR', paquete R 'multcomp'	(Fernandez-Mena <i>et al.</i> , 2023)
23	Caña de azúcar	ZAE	SM, conjunto de datos climatológicos denominado CHELSA-[CMIP5], MAPBIOMAS, 2019, DEM, RCP 2.6 y RCP 8.5	Clima, uso del suelo, escenarios de cambio climático, topografía	Lasificadores de aprendizaje automático disponibles en IDRISI, el balance hídrico fue determinado por Thornthwaite y Mather.	Ponderación de distancia inversa (IDW), IDRISI Selva software, ArcGIS 10.5	(Da Silva <i>et al.</i> , 2021)
24	Cacao (Theobroma cacao L.)	ZA	Base de datos de clima, suelo y agrobiodiversidad relacionados con las fincas de cacao.	Clima, suelo	Análisis de componentes principales (PCA)	QGIS	(Gonzalez-Orozco <i>et al.</i> , 2023)
25	Acrocomia aculeata.	ZAE	WorldClim, Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS-MOD16A3), DEM de SRTM,	Clima, altimetría	Metodología de regresión de Random Forest en el software R	ArcGIS	(Resende <i>et al.</i> , 2020)
26	Café, cacao, pastos tropicales	ZAE	SM, DEM	Clima, topografía, edafología, tipo de vegetación	Se aplicó una superposición de capas utilizando la herramienta de superposición ponderada	ArcGIS 10.3	(Vizuite-Montero <i>et al.</i> , 2024)
27	Yuca (Manihot esculenta Crantz)	ZE	Recursos energéticos mundiales NASA/POWER	Clima, escenarios de cambio climático	Combinación de variables climáticas de temperatura del aire y precipitación anual	Método kriging ordinario, ArcGis	(De Olanda <i>et al.</i> , 2023)
28	Caña de azúcar	ZAE	DEM, mapa CANASAT, imágenes LANDSAT	Pendiente, exclusión de áreas de caña de azúcar, exclusión de vegetación natural	Superposición de capas	Google earth engine, ArcGIS 10.4	(Hernandes <i>et al.</i> , 2021)

Num.	Cultivo	Zonificación	Fuente y tipo de información	Elementos	Metodología	Procesamiento	Referencia
29	Café Conilon	ZA	SM de INMET	Clima (lluvia, temperatura, humedad relativa del aire)	Análisis geoestadístico, mapeo difuso para identificar áreas adecuadas y áreas de favorabilidad climática	Método de kriging ordinario	(Medauar <i>et al.</i> , 2021)
30	Maíz	ZA	SM de INMET	Clima (lluvias, temperatura)	Balance hídrico mediante el método de Thornthwaite y Mather, ventana climática óptima para la siembra	No menciona	(Lima <i>et al.</i> , 2020)
31	Garbanzo	ZAE	Instituto de Agua y Suelo del Ministerio de Agricultura de Irán, DEM	Clima, edafología y topografía.	Sistema de inferencia difusa, método de combinación lineal ponderada (WLC)	MATLAB, GIS	(Nabati <i>et al.</i> , 2022)
32	Tecomella undulata	ZAE	DEM	Clima, vías fluviales, suelo, topografía.	Lógica difusa, los parámetros evaluados fueron temperatura del periodo de crecimiento, temperatura del periodo glaciar, longitud del periodo de crecimiento, pendiente, dirección de la pendiente, elevación, precipitación y distancia a la vía fluvial.	ArcGIS	(Amiri <i>et al.</i> , 2021)
33	Anatto (Bixa orellana L.)	ZA	WorldClim 2.1, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-2.6 and SSP5-8.5 climate change scenario	escenario de cambio climático	Las variables climáticas: temperatura media anual del aire y precipitación total anual	QGIS, Python (PyQGIS), Matplotlib, Pandas, Seaborn	(Lorençone <i>et al.</i> , 2024)

Nota: DEM, modelo digital de elevación; ZAE, zonificación agroecológica; ZA, zonificación agroclimática; ZE, zonificación edafoclimática; SM, estaciones meteorológicas; SRTM, Shuttle Radar Topography Mission; INMET, Instituto Nacional de Meteorología; IAPAR, Instituto Agronómico de Paraná; GIS, sistemas de información geográfica; SIMEPAR, Sistema Meteorológico de Paraná.

2.5 Conclusión

Con base en el objetivo se tiene que el tema de investigación está en crecimiento en el periodo 2002 al 2019, con interés en los temas de biocombustibles, producción de papa y frutales, ya que son los más citados. También se identificó que los países donde hay colaboración dentro y fuera de su país son Brasil, Argentina Irán, México, Colombia, Italia, China y España.

Entre los nuevos autores en el año 2020 son De Oliveira Aparecido LEO, Torsoni GB, Akbari M, Chiquitto Ag, Neamatollahi E, De Lima Rf, De Olanda Souza Gh, Nabati J y Nezami A, que utilizaron escenarios de cambio climático y sistemas de inferencia difusa para la Zonificación agroecológica. Del análisis de co-citación se distinguieron varios grupos de citas comunes como Thornthwaite Cw, Caramori Ph y Assad Ed, además, un grupo aislado formado por Neamatollahi, Akbari M y Mokarram M, que se pueden considerar como conceptos, métodos o experimentos claves para identificar y visualizar las relaciones entre estas ideas clave. En el análisis de colaboración con dos publicaciones se identificó siete grupos de trabajo y con mayor de tres publicaciones se encontró a los autores Caramori PH y Da Silva Ricce W como los autores que comúnmente colaboran.

En este análisis de las lecturas, se determinó que los principales trabajos de zonificación son para cultivos dedicados a la alimentación humana, biocombustibles, frutales, hongos comestibles y aromáticos.

En los diferentes tipos de trabajos de zonificación se encontró que la mayoría son Agroclimáticas, Agroecológicas, de Suelo-Agroecológicas y Edafoclimáticas. Las cuales utilizan una combinación de información del clima, edafología, topografía, uso de suelo, red de drenaje, muestras de la población y la dinámica temporal del rendimiento, que genera la posibilidad de realizar metodologías de acuerdo con las necesidades de producción.

En las fuentes de información destacan las estaciones meteorológicas, generadores climáticos, datos climáticos con base en satélites, estaciones meteorológicas automáticas y sistemas de pronóstico climático.

En las metodologías y herramientas, se encontró la tendencia al uso de la lógica difusa, arboles aleatorios, análisis multivariado. En el caso de programas para el procesamiento estadístico, la programación y librerías en lenguaje R y para el manejo de la información georreferenciada, el uso de los sistemas de información geográficos ArcGis y Qgis. Lo que muestra gran variedad de metodologías para el procesamiento y manejo de la información.

2.6 Literatura citada

- Alwan, I. A., Karim, H. H., & Aziz, N. A., 2019. Investigate the Optimum Agricultural Crops Production Seasons in Salah Al-Din Governorate Utilizing Climate Remote Sensing Data and Agro-Climatic Zoning. *Iraqi Journal of Science*, 60(9), 2087–2094. <https://doi.org/10.24996/ijis.2019.60.9.24>
- Akinwumiju, A. S., Adelodun, A. A., & Orimoogunje, O. I., 2020. Agro-Climato-Edaphic Zonation of Nigeria for a Cassava Cultivar using GIS-Based Analysis of Data from 1961 to 2017. *Scientific Reports*, 10(1), 1259. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58280-4>
- Amiri, I., Sodaeizadeh, H., Arany, A. M., Ardakani, M. A. H., & Fathizad, H., 2021. Investigating biophysical constraints and determining potential cultivation of *Tecomella undulata* using fuzzy logic model: a case study arid regions of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(21), 2175. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07914-6>
- Araya, A., Keesstra, S. D., & Stroosnijder, L., 2010. A new agro-climatic classification for crop suitability zoning in northern semi-arid Ethiopia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7–8), 1057–1064. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.003>
- Balamirzoev, M. A., Mirzoev, E. M.-R., & Usmanov, R. Z., 2008. Concepts of soil-agroecological zoning of mountain regions using the example of Dagestan. *Eurasian Soil Science*, 41(6), 586–594. <https://doi.org/10.1134/S1064229308060033>
- Baltazar-da Silva, D. F., Morejón-García, M., Díaz-Pita, A., de Almeida, F. M., da Costa-Neta, J. F., & Gonçalves, V., 2020. Caracterización agroclimática de la provincia Uigé, Angola en función del desarrollo del Café Robusta. *Cultivos*

- Carrión, J. M., Valdés Rodríguez, O. A., Gallardo López, F., & Palacios Wassenaar, O. M., 2022. Potencial agroecológico de Moringa oleifera Lam. para el estado de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(70), 42–63. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i70.1077>
- Correa-Pinilla, D. E., Gutiérrez-Vanegas, A. J., Gil-Restrepo, J. P., Martínez-Atencia, J., & Córdoba-Gaona, O. de J., 2022. Agroecological and South American leaf blight escape zones for rubber cultivation in Colombia. *Agronomy Journal*, 114(5), 2830–2844. <https://doi.org/10.1002/agj2.21068>
- Da Silva, N., Batista, L. G., Contado, P. V., & De Aguiar, M. A., 2021. Zoneamento agrícola de risco climático da bananeira (musa sp) na Bacia Hidrográfica do Rio Paraná 3. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 401–419. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/351047570_Zoneamento_agricola_de_risco_climatico_da_bananeira_musa_sp_na_Bacia_Hidrografica_do_Rio_Parana_3
- Da Silva, G. J., Berg, E. C., Calijuri, M. L., dos Santos, V. J., Lorentz, J. F., & Carmo Alves, S. do., 2021. Aptitude of areas planned for sugarcane cultivation expansion in the state of São Paulo, Brazil: a study based on climate change effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 305(October 2020), 107164. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107164>
- Dadrasi, A., Chaichi, M., Nehbandani, A., Soltani, E., Nemati, A., Salmani, F., Heydari, M., & Yousefi, A. R., 2023. Global insight into understanding wheat yield and production through Agro-Ecological Zoning. *Scientific Reports*, 13(1), 15898. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43191-x>
- De Olanda, G. H., De Oliveira, L. E., Da Silva Cabral, J. R., & Torsoni, G., 2023. Climate change and its influence on planting of cassava in the Midwest region of Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, 25(2), 1184–1204. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02088-3>
- Del Rosario, J. L., Aguilar-Rivera, N., Leyva-Ovalle, O. R., Andres-Meza, P., Meneses-Marquez, I., & Bolio, G. I., 2022. Zonificación edafoclimática de la yuca (Manihot esculenta Crantz) para la producción sostenible de bioproductos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 81, 361–383. Recuperado de <https://www.scielo.cl/pdf/rgeong/n81/0718-3402-rgeong-81-361.pdf>
- D´Negri, C. E., & De Vito, E. L., 2006. Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. *Revista Argentina de Medicina Respiratoria Año*, 6(3), 126–136. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/3821/382138367007.pdf>
- Faraslis, I., Dalezios, N. R., Alpanakis, N., Tziatzios, G. A., Spiliotopoulos, M., Sakellariou, S., Sidiropoulos, P., Dercas, N., Domínguez, A., Martínez-

- López, J. A., López-Urrea, R., Karam, F., Amami, H., & Nciri, R., 2023. Remotely Sensed Agroclimatic Classification and Zoning in Water-Limited Mediterranean Areas towards Sustainable Agriculture. *Remote Sensing*, 15(24), 5720. <https://doi.org/10.3390/rs15245720>
- Fazenda, L. H. V., Peche, P. M., Curi, P. N., Schiassi, M. C. E. V., Viol, R. E., & Pio, R., 2023. Preliminary analysis for agroclimatic zoning proposal for peach tree cultivation in Mozambique. *Revista Ceres*, 70(4), 8–16. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202370040003>
- Fernandez-Mena, H., Guilpart, N., Lagacherie, P., Le Roux, R., Plaige, M., Dumont, M., Gautier, M., Graveline, N., Touzard, J.-M., Hannin, H., & Gary, C., 2023. Grapevine yield gap: identification of environmental limitations by soil and climate zoning in the region of Languedoc-Roussillon (South of France). *OENO One*, 57(2), 361–379. <https://doi.org/10.20870/oenone.2023.57.2.7246>
- Garcia-Barreda, S., Sánchez, S., Marco, P., & Serrano-Notivol, R., 2019. Agro-climatic zoning of Spanish forests naturally producing black truffle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 269–270 (October 2018), 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.020>
- Gonzalez-Orozco, C., Porcel, M., Escobar, S., Bravo, D., Gutierrez Lopez, Y., Yockteng, R., Vaillant, F., Santander, M., Llano, S., Parra, K., Briceño, E., Carmona, J., Torres, S., Contreras, R., Otero, A., Pesca, A., & Carrillo, G., 2023. Cacao (*Theobroma cacao* L.) climate zones and its associated agrobiodiversity in Arauca, Colombia. *Biodiversity Data Journal*, 11, 1–10 <https://doi.org/10.3897/BDJ.11.e112771>
- Gutiérrez, E. V., Ramírez, G. A., & Ortiz, C. A., 2023. The Agricultural Potential of a Region with Semi-Dry, Warm and Temperate Subhumid Climate Diversity through Agroecological Zoning. *Sustainability*, 15(12), 9491. <https://doi.org/10.3390/su15129491>
- Hernandes, T. A. D., Duft, D. G., Luciano, A. C. dos S., Leal, M. R. L. V., & Cavalett, O., 2021. Identifying suitable areas for expanding sugarcane ethanol production in Brazil under conservation of environmentally relevant habitats. *Journal of Cleaner Production*, 292, 125318. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125318>
- Koutsos, T. M., Menexes, G. C., & Dordas, C. A., 2019. An efficient framework for conducting systematic literature reviews in agricultural sciences. *Science of The Total Environment*, 682, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.354>
- Krauskopf, E., 2018. A bibliometric analysis of the Journal of Infection and Public Health: 2008–2016. *Journal of Infection and Public Health*, 11(2), 224–229. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2017.12.011>

- Lima, C. I. S. de, Silva, F. D. dos S., Freitas, I. G. F. de, Pinto, D. D. C., Costa, R. L., Gomes, H. B., Silva, E. H. de L., Silva, L. L. da, Silva, V. de P. R. da, & Silva, B. K. da N., 2020. Método Alternativo de Zoneamento Agroclimático do Milho para o Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(spe), 1057–1067. <https://doi.org/10.1590/0102-778635500113>
- López-Robles, J.-R., Guallar, J., Otegi-Olaso, J.-R., & Gamboa-Rosales, N.-K., 2019. Bibliometric and thematic analysis (2006-2017). *El Profesional de la Información*, 28(4). Recuperado de <https://recyt.fecyt.es/index.php/EPI/article/view/epi.2019.jul.17>
- Lorençone, J. A., de Oliveira Aparecido, L. E., Lorençone, P. A., Torsoni, G. B., de Lima, R. F., Chiquitto, A. G., de Souza Rolim, G., & Marqueti, H. G., 2024. Climate change and its alterations on annatto (*Bixa orellana* L.) climate zoning in Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(3), 2473–2497. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04823-4>
- Lykhovyd, P. V., 2023. Using normalised difference vegetation index in classification and agroecological zoning of spring row crops. *Biosystems Diversity*, 31(4), 506–512. <https://doi.org/10.15421/012360>
- Martelócio, A. C., Caldana, N. F. da S., & Caramori, P. H., 2020. Potencialidades e riscos climáticos para o cultivo da batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) na Mesorregião Norte Central Do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(1), 049–066. <https://doi.org/10.26848/rbqf.v13.1.p049-066>
- Medauar, C. C., Silva, S. D. A., Galvão, Í. M., Franco, L. B., & Carvalho, L. C. C., 2021. Fuzzy Mapping of Climate Favorability for the Cultivation of Conilon Coffee in the State of Bahia, Brazil. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 205–217. <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1864698>
- Mendoza-Cariño, M., Bautista-Olivas, A. L., Mendoza-Cariño, D., Ortiz-Solorio, C. A., Duarte-Tagles, H., & Cruz-Flores, G., 2023. Agroclimatic zoning of the state of Nayarit, México. *Atmósfera*, 36(1), 123–142. <https://doi.org/10.20937/ATM.53002>
- Miguel, S., Moya-anegón, F., & Herrero-solana, V., 2006. El análisis de co-citas como método de investigación en bibliotecología y Ciencia de la Información. *Investigación Bibliotecológica*, 21(43), 139–155. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-358X2007000200006&lng=es&tlng=es
- Mingalev, D. E., 2021. Agroclimatic Zoning of Russia and Kazakhstan under Current Climate Change. *Geography and Natural Resources*, 42(2), 115–121. <https://doi.org/10.1134/S1875372821020086>
- Nabati, J., Nezami, A., Neamatollahi, E., & Akbari, M., 2020. GIS-based agro-ecological zoning for crop suitability using fuzzy inference system in semi-

- arid regions. *Ecological Indicators*, 117(November 2019), 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106646>
- Nabati, J., Nezami, A., Neamatollahi, E., & Akbari, M., 2022. An integrated approach land suitability for agroecological zoning based on fuzzy inference system and GIS. *Environment, Development and Sustainability*, 0123456789, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02127-7>
- Olegário, K. F., Andrade, E. P., Sampaio, A. P. C., Matos, J. S., Figueirêdo, M. C. B. de, & Neto, J. A. de A., 2022. Water scarcity footprint of cocoa irrigation in Bahia. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 17(4), 1–9. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2840>
- Olivares-Campos, B. O., Hernández Rafael, A., Arias-Valdespino, A. A., Molina-Trigos, J. C., & Pereira-Bravo, Y. V., 2018. Identificación de zonas agroclimáticas potenciales para producción de cebolla (*Allium cepa* L.) en Carabobo, Venezuela. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 6(2), 42–54. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2018.060200042>
- Parra, C. R., Ramirez, A. D., Navas-Gracia, L. M., Gonzales, D., & Correa-Guimaraes, A., 2023. Prospects for Bioenergy Development Potential from Dedicated Energy Crops in Ecuador: An Agroecological Zoning Study. *Agriculture*, 13(1), 186. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010186>
- Pérez-Portilla, E., & Geissert-Kientz, D., 2006. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: El caso café (*coffea arabica* L.) - Palma camedor (*chamaedorea elegans* mart.). *Interciencia*, 31(8), 556–562. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/339/33911902.pdf>
- Pérez, H., & Merino, G., 2020. Bibliométria: herramienta para la identificación, distribución y evolución de la literatura científica. *Anuario Del Centro de La Universidad Nacional de Educación a Distancia En Calatayud*, 26, 151–165. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8263863>
- Pineda, D., & Suárez, J. E., 2014. Elaboración de un SIG orientado a la zonificación agroecológica de los cultivos. *Revista Ingeniería Agrícola*, 4(3), 28–32. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586262041005>
- Possas, J. M. C., Correa, M. M., Moura, G. B. de A., Lopes, P. M. O., Caldas, A. M., & Fontes Júnior, R. V. de P., 2012. Zoneamento agroclimático para a cultura do pinhão-manso no estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(9), 993–998. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000900010>
- Resende, R. T., Kuki, K. N., Corrêa, T. R., Zaidan, Ú. R., Mota, P. H. S., Telles, L. A. A., Gonzales, D. G. E., Motoike, S. Y., Resende, M. D. V., Leite, H. G., & Lorenzon, A. S., 2020. Data-based agroecological zoning of *Acrocomia aculeata*: GIS modeling and ecophysiological aspects into a Brazilian

- representative occurrence area. *Industrial Crops and Products*, 154(July), 112749. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112749>
- Rojas-Briceño, N. B., García, L., Cotrina-Sánchez, A., Goñas, M., Salas López, R., Silva López, J. O., & Oliva-Cruz, M., 2022. Land Suitability for Cocoa Cultivation in Peru: AHP and MaxEnt Modeling in a GIS Environment. *Agronomy*, 12(12), 2930. <https://doi.org/10.3390/agronomy12122930>
- Santos, G. M. dos, Cemin, G., Bortolin, T. A., & Schneider, V. E., 2020. Edaphoclimatic Zoning: Methodology and Application to Apple Cultivation in a Brazilian Watershed. *Revista Brasileira de Cartografia*, 72(2), 190–201. <https://doi.org/10.14393/rbcv72n2-48890>
- Singh, P. A., Sood, A., & Baldi, A., 2021. An Agro-ecological Zoning Model Highlighting Potential Growing Areas for Medicinal Plants in Punjab. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 55(2), s492–s500. <https://doi.org/10.5530/ijper.55.2s.120>
- Soto, F., Tejeda, T., Hernández, A., & Florido, R., 2001. Metodología para la zonificación agroecológica del Coffea arabica L. en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 22(4), 51–53. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193230162008.pdf>
- Trnka, M., Balek, J., Brázdil, R., Dubrovský, M., Eitzinger, J., Hlavinka, P., Chuchma, F., Možný, M., Prášil, I., Růžek, P., Semerádová, D., Štěpánek, P., Zahradníček, P., & Žalud, Z., 2021. Observed changes in the agroclimatic zones in the Czech Republic between 1961 and 2019. *Plant, Soil and Environment*, 67(3), 154–163. <https://doi.org/10.17221/327/2020-PSE>
- Vizuite-Montero, M. O., Figueroa-Saavedra, H. F., Barbaru-Grajales, A. D., Zapata-Mayorga, H. A., Herrera-Ocaña, H. R., & Moya, W., 2024. Physio-edaphoclimatic factors show optimal soil suitability for three tropical crops in the Ecuadorian Amazon. *Scientia Agricola*, 81, 1–9. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2022-0214>
- Yu, Y., Li, Y., Zhang, Z., Gu, Z., Zhong, H., Zha, Q., Yang, L., Zhu, C., & Chen, E., 2020. A bibliometric analysis using VOSviewer of publications on COVID-19. *Annals of Translational Medicine*, 8(13): 816–816. <https://doi.org/10.21037/atm-20-4235>
- Zamani, A., Sharifi, A., Felegari, S., Tariq, A., & Zhao, N., 2022. Agro climatic zoning of Saffron culture in Miyaneh city by using WLC method and remote sensing data. *Agriculture*, 12(1), 118. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010118>

3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA PARTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO APULCO ZONA NORORIENTAL DE PUEBLA

3.1 Resumen

En México las fuentes de información climática son las estaciones: climatológicas, automáticas y sinópticas. Sin embargo, varias carecen de información completa que limita su uso para estudios de manejo a largo plazo. El objetivo de este trabajo fue realizar la caracterización de la información climática de la parte media de la cuenca del Río Apulco en la zona nororiental de Puebla. La metodología consistió en la delimitación del área de trabajo por climas C(m) y C(fm), los municipios de Atempan, Teteles de Ávila Castillo, Tlatlauquitepec, Yaonáhuac, Zacapoaxtla y la subcuenca hidrológica RH27Be. Posteriormente, se delimitó un área de influencia de 15 km del perímetro de donde se consideraron 19 estaciones climáticas. Para el análisis se utilizó el programa Climatol 4.0.0 para determinar la disponibilidad de las variables de temperatura máxima (tmax), mínima (tmin), precipitación (prec) y evaporación (evap), análisis de datos atípicos, incrementos, valores consecutivos e histogramas. También se realizaron los diagramas de correlaciones, dendrogramas y mapas de isolíneas para las variables de tmin, tmax, prec, evap media a nivel diario. En los resultados se encontró que la información climática tiene limitaciones de disponibilidad. También se identificaron valores atípicos leves y extremos, incrementos y decrementos y valores repetidos consecutivos, que se deben revisar previo al análisis. En la temperatura los valores mayores se presentan en la parte norte y la más fría en el centro del área. Con respecto a la precipitación, la parte más lluviosa se localiza al este y menor al suroeste, y para la evaporación la mayor al suroeste y menor en la parte centro – noreste.

Palabras clave: temperatura, precipitación, heladas, isolíneas, mapas.

3.2 Introducción

Las condiciones climáticas son la base para el confort de los organismos vivos que crecen y se desarrollan bajo condiciones específicas. Velázquez *et al.*, (2012) mencionan que la identificación de diferentes zonas climáticas puede ser un factor relevante para los tomadores de decisiones en diversos campos como el ordenamiento urbano o agricultura. Las condiciones meteorológicas y climáticas pueden afectar la planeación y operación sobre las prácticas como: preparación del terreno, siembra, riego, cosecha, así como la relación entre plantas, microorganismos, insectos, hongos y bacterias (Radin & Matzenauer, 2016). Por tal motivo, el clima es una variable que influye en la producción de alimentos. Ramos-Cruz *et al.*, (2018) mencionan que el avance tecnológico ha transformado la agricultura en una operación compleja y de gran escala que obliga a que su sustento e incremento requieran de decisiones con base en la información.

En México, hasta el 2010 eran 3,388 estaciones climatológicas, 277 estaciones automáticas, 79 estaciones sinópticas, 30 estaciones sinópticas automáticas y 12 radares meteorológicos (CONAGUA, 2010). Sin embargo, la dependencia tecnológica de México se observa en el mantenimiento de las estaciones y la falta de personal capacitado para la calibración y operación de estas (Velasco *et al.*, 2015).

Otro problema que existe en las estaciones climatológicas es la carencia y calidad de la información que deben ser identificadas. Gubler *et al.*, (2017) mencionan que entre los principales problemas que dificultan cualquier estudio de la variabilidad climática se encuentran la disponibilidad y calidad de los datos recolectados. Por lo que, los datos climáticos pueden no representar la variación del tiempo actual por fallas en los instrumentos, errores accidentales por la persona responsable, la ubicación de la estación, dando lugar a variaciones en datos (Guajardo-Panes *et al.*, 2017). De igual manera, las observaciones a alta resolución permiten realizar análisis de diagnóstico más precisos y predicciones

más exactas (C. B. Silva et al., 2019). Además, Lépez, (2019) menciona que una de las dificultades para realizar pronósticos, sistemas de alertas climáticos o reportes, radica en poder recopilar la mayor cantidad de datos, analizarlos, y obtener conclusiones de utilidad. De ahí que los datos meteorológicos son relevantes para todos los productores agrícolas ya que según Dunaieva et al., (2021) trabajar con datos permite planificar siembras y cosechas, fertilización, medidas de protección contra insectos y malezas, etc.

Los registros con series temporales pueden tener muchos problemas, desde fallos de almacenamiento, problemas con los instrumentos encargados de medir o incluso la falta de cobertura para el registro de información en ubicaciones aisladas (Neto et al., 2020). Incluso documentos oficiales reconocen la deficiencia en la producción de datos climáticos, hasta para la zona más densamente poblada del país donde se cuenta con la mayor cantidad de datos climáticos (Gómez, 2023). Por lo cual, es imperativo realizar análisis exploratorios sobre los datos originales para un control de calidad confiable, ya que la detección de valores atípicos puede identificar errores de observación que conducen a conclusiones erróneas (Guijarro, 2019).

Por lo que, como objetivo se realizó una caracterización de la información climática de 19 estaciones en la parte media de la cuenca del Rio Apulco.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Área de estudio

La región de estudio (Figura 13) se encuentra en la zona Nororiental del estado de Puebla, la cual se delimitó con base a las unidades climáticas C(m), C(fm) de la clasificación de Köppen modificada por García (INEGI, 2008) en los municipios de Atempan, Tételes de Ávila Castillo., Tlatlauquitepec, Yaonáhuac y Zacapoaxtla (CONABIO, 2018) y la subcuenca RH27Be-Rio Apulco (INEGI,

2010). Lo cual genera 338.937 km^2 de área de estudio y 2176.983 km^2 en el área de influencia de las estaciones.

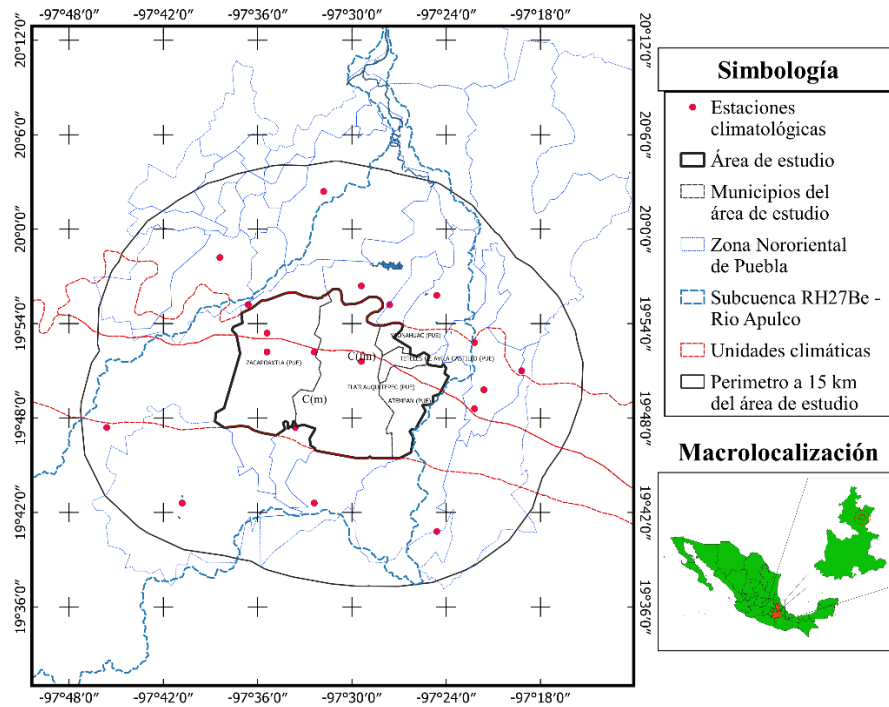


Figura 13. Zona de estudio y localización de las estaciones climáticas.

3.3.2 Base de datos

Las estaciones consideradas fueron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y la información se recuperó por medio del sistema de software de manejo de datos climatológicos, que se desarrolló por las Naciones Unidas (CLICOM). Se estudiaron 19 estaciones climáticas (CICESE, 2019), de las cuales cuatro se encuentran dentro del área de estudio y 15 a una distancia de 15 km. Se consideró solo la red de estaciones tradicionales climáticas que cumplieron con más de 30 años con información, dado que otras fuentes como las estaciones automáticas cuentan entre 10 y 15 años de datos (Mendoza & Vázquez, 2017). La información meteorológica fue a nivel diario del periodo 1980-2018 que consta de 38 años de datos de temperatura máxima (tmax), temperatura mínima (tmin), precipitación (prec) y evaporación (evap) que fueron recuperados en el año 2022.

3.3.3 Relieve

Simbología

- Elevación 500 m
- Elevación 100 m
- Estaciones climatológicas
- Municipios del área de estudio
- Área de estudio
- Perímetro a 15 km del área de estudio

Macrolocalización

The map displays the Sierra de Guadalupe region with various climate stations marked by red dots and labeled with codes and names. Elevation contours are shown at 500m and 100m intervals. The study area is outlined in black, and the 15km perimeter is indicated by a dashed line. The inset map shows the location of the study area within Mexico.

Figura 14. Mapa de elevaciones.

3.3.4 Metodología

52

en R que se aplica para realizar el control de calidad, homogeneización y llenado de datos faltantes de series climatológicas.

Los resultados obtenidos de este análisis fueron:

Disponibilidad de datos; en proporción de datos disponibles por cada variable con su representación gráfica (que muestran los periodos con disponibilidad y ausencia de información y la disponibilidad global); que presentan la cantidad de información en el periodo de tiempo.

Datos atípicos; en diagramas de cajas a 1.5 y 3 distancias intercuartílicas.

Diferencias entre datos consecutivos; en gráficos que muestran la frecuencia de valores repetidos por serie climática.

Diagramas de incrementos; en diagramas de cajas que indican incrementos en los valores consecutivos.

Frecuencia de los valores; en histogramas que muestran la distribución de los valores.

Correlaciones entre las series; en correlogramas que se centran en las correlaciones entre las series (Guijarro, 2023).

Agrupamiento de estaciones; en dendrogramas de grupos de estaciones; donde se hace un análisis de conglomerados y se exhiben de forma gráfica las estaciones que tienen condiciones similares de acuerdo con el nivel de disimilitud de 0.5.

Representación espacial de las variables; de temperatura, precipitación y evaporación diaria con la finalidad de analizar la distribución espacial.

Análisis de las heladas; a partir de los datos diarios de temperaturas mínimas se definieron la cantidad y el mes en el que se presentan la última helada primaveral y la primera otoñal. Se consideró los siguientes criterios: helada primaveral si se presenta entre el primero de enero y el 30 de junio y helada otoñal si se presenta del primero de julio al 31 de diciembre. La condición de helada se considera

según Monterubbianesi & Cendoya, (2001) como helada meteorológica a la ocurrencia de una temperatura mínima diaria que no supere los 0 °C a 1.5 m de altura en abrigo meteorológico.

3.3.5 Resultados y discusión

En el análisis descriptivo de la disponibilidad de la información meteorológica en porcentaje de las variables tmax, tmin, prec y evap se obtuvieron los siguientes resultados (Cuadro 5 y Figura 15). Donde las estaciones con mayor disponibilidad de información fueron: 21021 Capuluaque con 93.49 %, 21059 Oyameles con 82.30 (%) y 21091 Teziutlán con 79.53 %.

Por otro lado, las de menor información fueron 21162 Campo Experimental Teziutlán con 26.17 %, 21098 Tlatlauquitepec (CFE) con 25.82 % y 21104 Zacapoaxtla (DGE) con 17.41 %.

Cuadro 5. Disponibilidad de datos (%) por variables meteorológicas y estación.

No.	Clave	Nombre	tmin (%)	tmax (%)	prec (%)	evap (%)	$\bar{x}$
1	21011	Tetelilla (CFE)	42.73	42.71	42.73	42.67	42.71
2	21021	Capuluaque	96.87	96.88	96.86	83.35	93.49
3	21032	Cuetzalan del progreso	66.16	66.16	66.16	35.40	58.47
4	21043	Huahuaxtla (CFE)	66.67	66.33	66.64	68.27	66.98
5	21054	La Fundición	42.95	42.95	42.95	43.11	42.99
6	21055*	La Pagoda	42.95	42.94	42.95	42.91	42.94
7	21059	Oyameles	82.83	82.74	83.05	80.60	82.30
8	21064*	Presa la soledad (CFE)	60.9	60.91	61.1	62.53	61.36
9	21074	San Juan Acateno (CFE)	58.8	58.78	58.88	60.20	59.17
10	21091	Teziutlán	89.64	89.63	89.6	49.25	79.53
11	21098	Tlatlauquitepec (CFE)	25.81	25.81	25.86	25.79	25.82
12	21103*	Zacapoaxtla (SMN)	86.7	86.69	87.36	54.79	78.89
13	21104*	Zacapoaxtla (DGE)	17.47	17.47	17.46	17.23	17.41
14	21111	Santiago Zautla (CFE)	61.97	61.98	61.97	63.65	62.39
15	21162	Campo Experimental Teziutlán	27.78	27.78	27.77	21.37	26.17
16	21174	Tepecapan (CFE)	40.39	40.37	40.39	40.48	40.41
17	21207	Zaragoza	41.64	41.64	41.64	24.60	37.38

No.	Clave	Nombre	tmin (%)	tmax (%)	prec (%)	evap (%)	$\bar{x}$
18	21208	Gómez poniente (CFE)	34.6	34.6	34.58	34.35	34.53
19	21209	Los humeros (CFE)	51.28	51.27	51.04	52.98	51.64

Nota: *Las estaciones se encuentran al interior del polígono de área de estudio, $\bar{x}$, media aritmética.

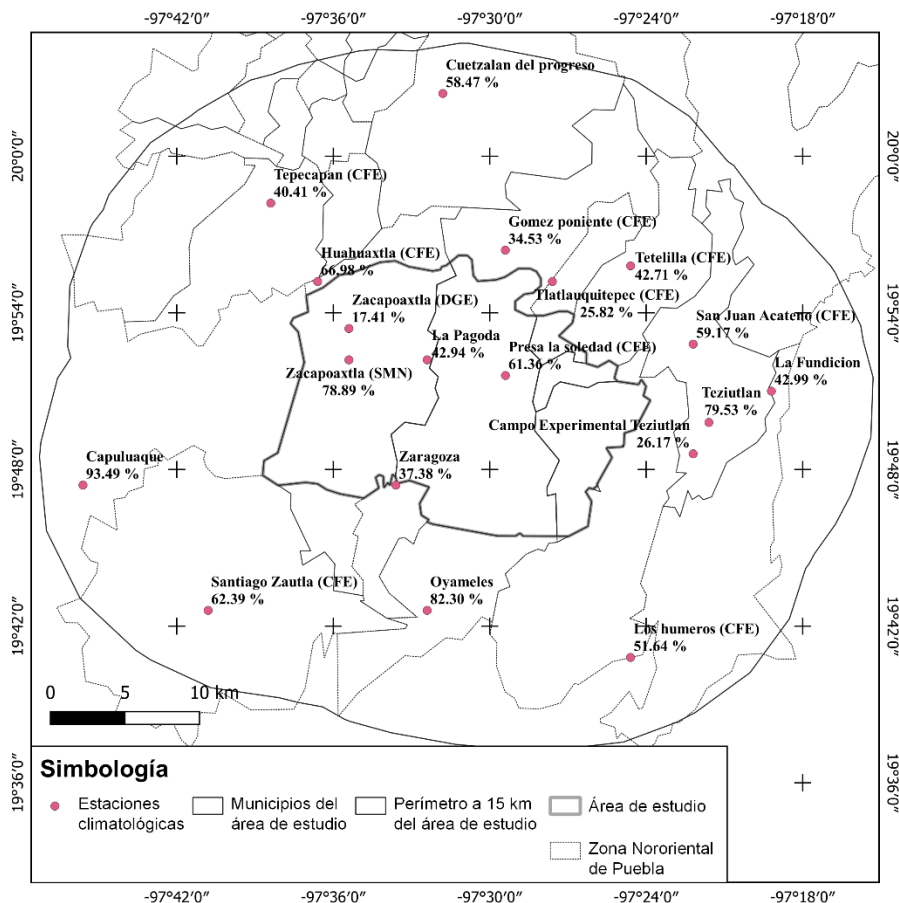


Figura 15. Porciento de información disponible en promedio por estación.

3.3.6 Gráficos de disponibilidad

En la figura 16 se aprecia el porciento de la disponibilidad de información meteorológica de cada estación para las cuatro variables, que varía entre 17.41% y 93.49%. Se observa que solo 6 estaciones: 2 (21021 Capuluaque), 3 (21032 Cuetzalan del progreso), 7 (21059 Oyameles), 10 (21091 Teziutlán), 12 (21103

Zacapoaxtla (SMN)) y 17 (21207 Zaragoza) cuentan con información hasta el año 2018 para todas las variables. La mayoría de las series tiene registro hasta el 2008, sin embargo, solo 6 siguen en funcionamiento hasta la actualidad. Mendoza & Vázquez, (2017) mencionan que el método de lectura y registro de los datos en el CLICOM se realiza manualmente de los formatos de la estación climatológica, por lo que se ocasionan retrasos en la actualización de la información. Por lo que las bases de datos regularmente se encuentran incompletas. Doraiswamy et al., (2000) señalan que la adquisición de datos climáticos y agrometeorológicos, procesamiento, control de calidad, archivo, acceso y gestión de bases de datos son componentes que hacen que la información sea valiosa para la investigación y programas de operación. Además, Pérez et al., (2009) mencionan que los registros climáticos son además una herramienta de apoyo en la toma de decisiones para un manejo oportuno en aplicaciones que minimicen el impacto negativo en procesos agrícolas.

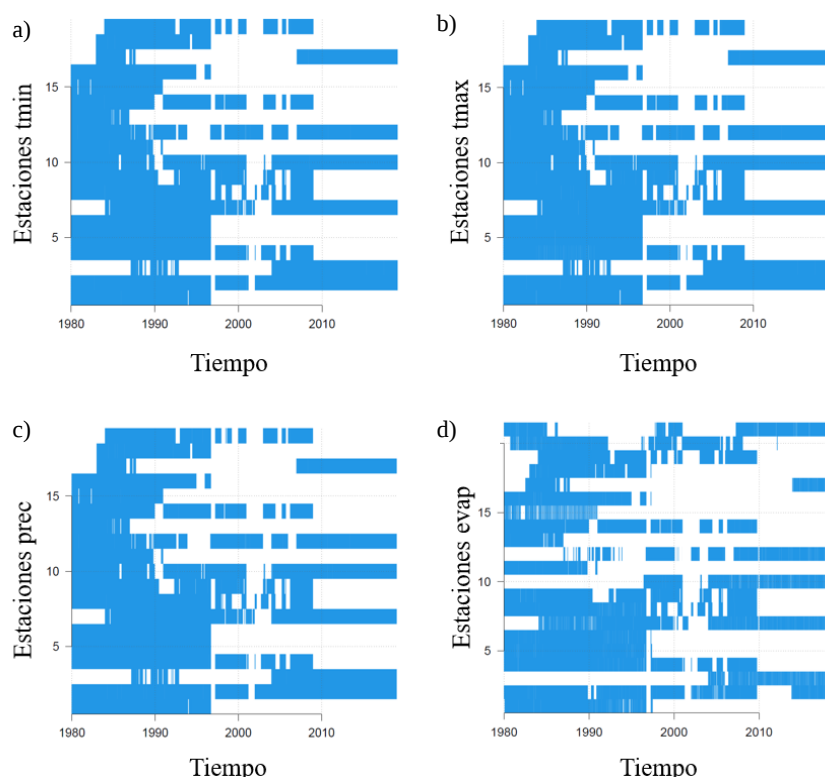


Figura 16. Gráficos de disponibilidad de datos de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).

3.3.7 Disponibilidad global

El número de datos globales para cada variable (Figura 17), muestra cuántos datos existen en cada periodo temporal. Las líneas verde y roja marcan el número deseado y crítico del umbral de disponibilidad para la detección de datos sospechosos (Guijarro, 2023). Longman *et al.*, (2020) mencionan que la ausencia de datos puede producirse por fallas en las estaciones de observación, la eliminación de valores erróneos, la introducción manual, la pérdida por mala gestión y almacenamiento defectuoso. En consecuencia, la información muestra la mayor cantidad de datos de 1982 a 1998 y una disminución hacia años recientes.

Para efectos del procesamiento de la información, se identificaron tres periodos al disminuir la cantidad de valores por debajo de los umbrales. Guijarro, (2023) establece 5 datos como el mínimo deseable y 3 datos como el mínimo necesario para la detección de datos sospechosos. Sin embargo, Trewin, (2013) señala que la mayoría de las series climáticas tienen valores atípicos y datos faltantes.

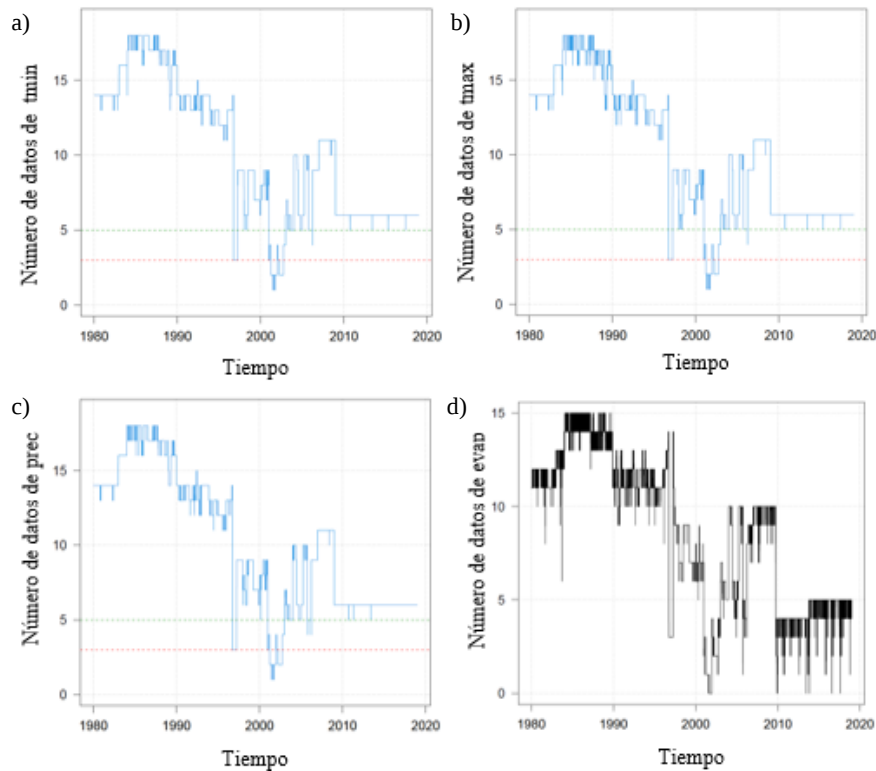


Figura 17. Disponibilidad global de datos de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).

3.3.8 Análisis de diagramas de cajas (datos atípicos)

Los diagramas (Figura 18) muestran la presencia de datos atípicos leves en color negro y datos atípicos extremos en rojo con tres distancias intercuartílicas. En consecuencia, se pueden identificar que para las variables de tmin y tmax, los valores atípicos extremos están presentes para las temperaturas inferiores. Sin embargo, también se presentan series sin datos anómalos extremos contabilizando diez, nueve, siete y tres para tmax, tmin, prec y evap respectivamente.

Las estaciones sin valores atípicos extremos por variable son:

Temperatura mínima (tmin): 2 (21021 Capuluaque), 3 (21032 Cuetzalan del progreso), 5 (21054 La Fundición), 6 (21055 La Pagoda) 8 (21064 Presa la soledad (CFE)), 9(21074 San Juan Acateno (CFE)), 11 (21098 Tlatlauquitepec

(CFE)),14 (21111 Santiago Zautla (CFE)), 17 (21207 Zaragoza) y 18 (21208 Gómez poniente (CFE)). *Temperatura máxima (tmax)*: 2 (21021 Capuluaque), 3 (21032 Cuetzalan del progreso), 6 (21055 La Pagoda), 7 (21059 Oyameles), 10 (21091 Teziutlán), 11 (21098 Tlatlauquitepec (CFE)), 13 (21104 Zacapoaxtla (DGE)), 15(21162 Campo Experimental Teziutlán) y 17 (21207 Zaragoza). *Precipitación (prec)*: 1 (21011 Tetelilla (CFE)), 3 (21032 Cuetzalan del progreso), 8 (21064 Presa la soledad (CFE)), 14 (21111 Santiago Zautla (CFE)), 16 (21174 Tepecapan (CFE)), 19 (21209 Los humeros (CFE)). *Evaporación (evap)*: 10 (21091 Teziutlán), 13 (21104 Zacapoaxtla (DGE)) y 16 (21174 Tepecapan (CFE)).

Por lo que Guijarro, (2023) menciona que es ideal comprobar los datos sospechosos o ser eliminados antes de su utilización.

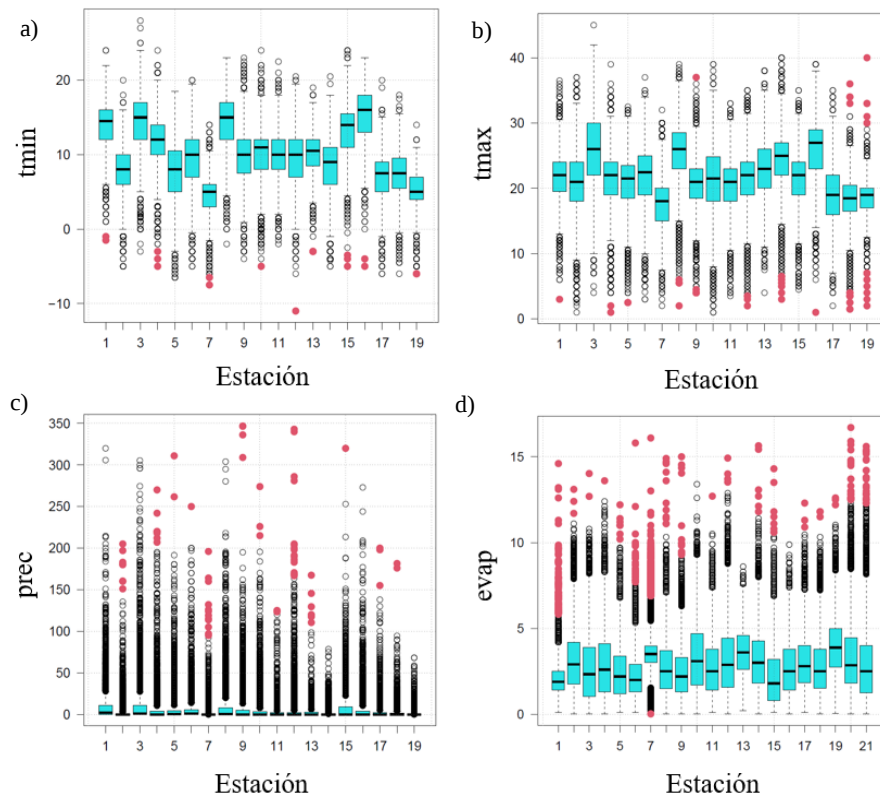


Figura 18. Valores atípicos por variable de cada estación de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).

3.3.9 Análisis de diagrama de incrementos

Los diagramas de incrementos muestran las diferencias entre datos consecutivos donde se logra apreciar valores atípicos, que se presentan para las estaciones (ver Figura 19). En la temperatura mínima se destaca la estación 16 (21174 Tepecapan (CFE)) con un valor brusco de -18°C . Posteriormente, en la temperatura máxima, precipitación y evaporación todos parecen tener un comportamiento simétrico hacia la mediana. Por lo tanto, podrían considerarse eventos comunes en la región.

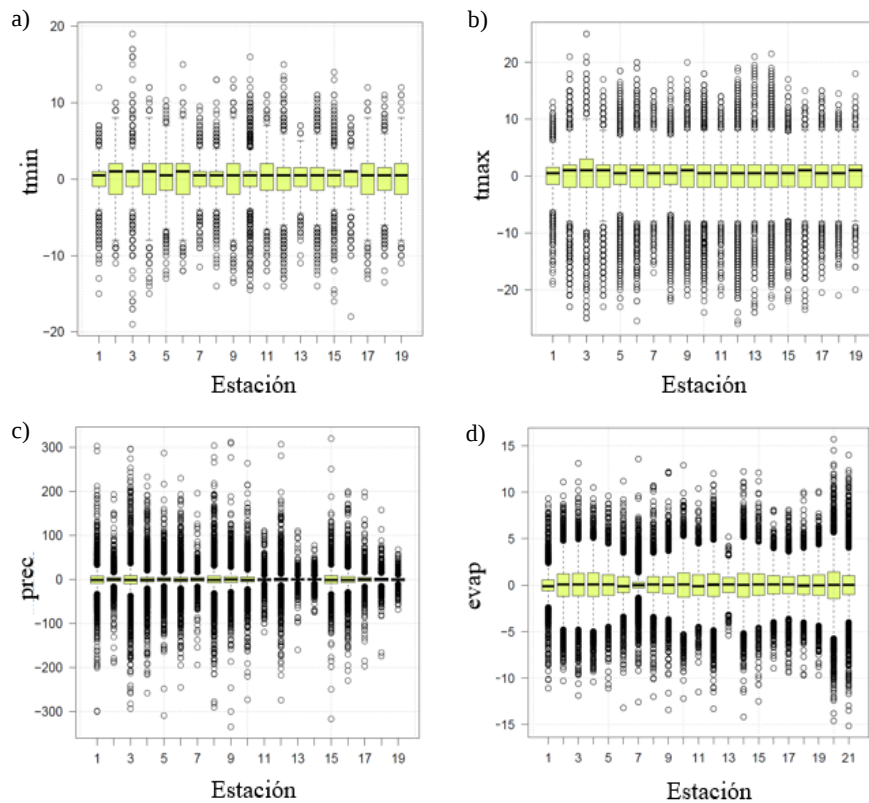


Figura 19. Diferencias consecutivas de las variables de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).

3.3.10 Análisis de valores consecutivos

El diagrama (Figura 20) indica que hay valores repetidos en todas las series, principalmente para las variables de temperatura donde se encuentran días con valores con rangos que varían de entre cuatro y veintiuno. El caso más destacable para las variables tmin y tmax es para la 12 (21103 Zacapoaxtla (SMN)). Para la precipitación todas parecen tener un comportamiento entre dos y cuatro, y para la evaporación entre tres y ocho destacándose la estación 11 (Tlatlauquitepec (CFE)).

Por lo cual, es conveniente localizar la secuencia para confirmar si se trata de un error o valores correctos en la región. En este caso, para los demás valores repetidos parecen guardar la misma proporción entre las demás estaciones, para tmin de 6 a 11, para tmax de 4 a 9, y prec de 2 a 4 y evap de 3 a 6.

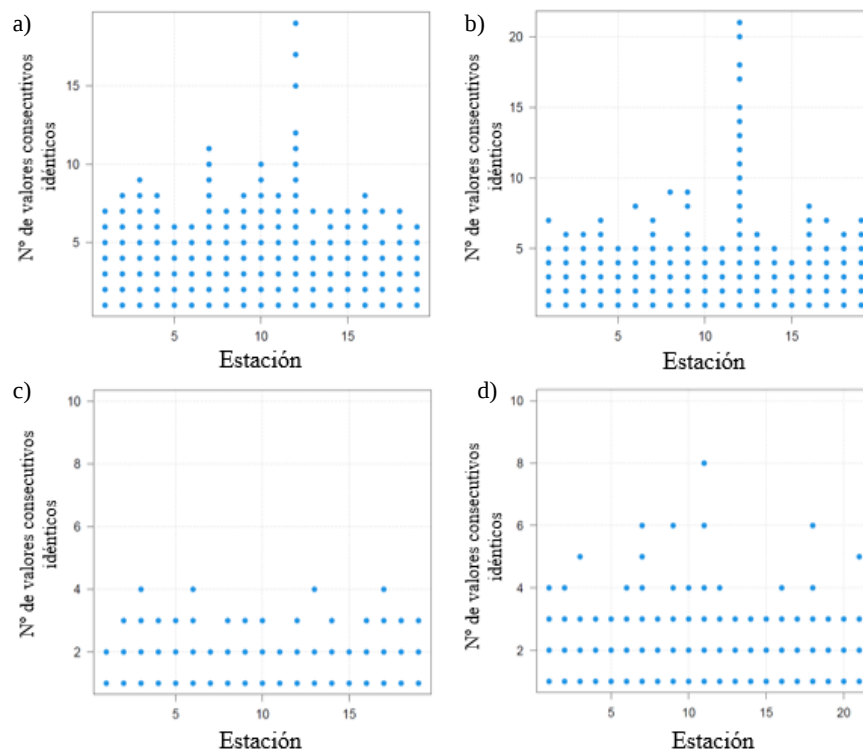


Figura 20. Diagrama de valores consecutivos de las variables de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).

3.3.11 Histogramas por variable

Se observa que las variables t_{min} y t_{max} (Figura 21) presentan un comportamiento normal. Sin embargo, la $prec$ y la $evap$ presentan un sesgo hacia la derecha lo que es razonable para las variables que se miden a partir de cero a valores positivos. En consecuencia, la frecuencia de las variables t_{min} y t_{max} varía de 1 a 50,000 en los rangos de -11 a 27 °C y 1 a 45 °C respectivamente. No obstante, la precipitación presentó una frecuencia de 1 a 70,000, en un rango de 0 a 350 mm y para la evaporación una frecuencia de 1 a 27,000 en un rango de 0 a 16.5 mm.

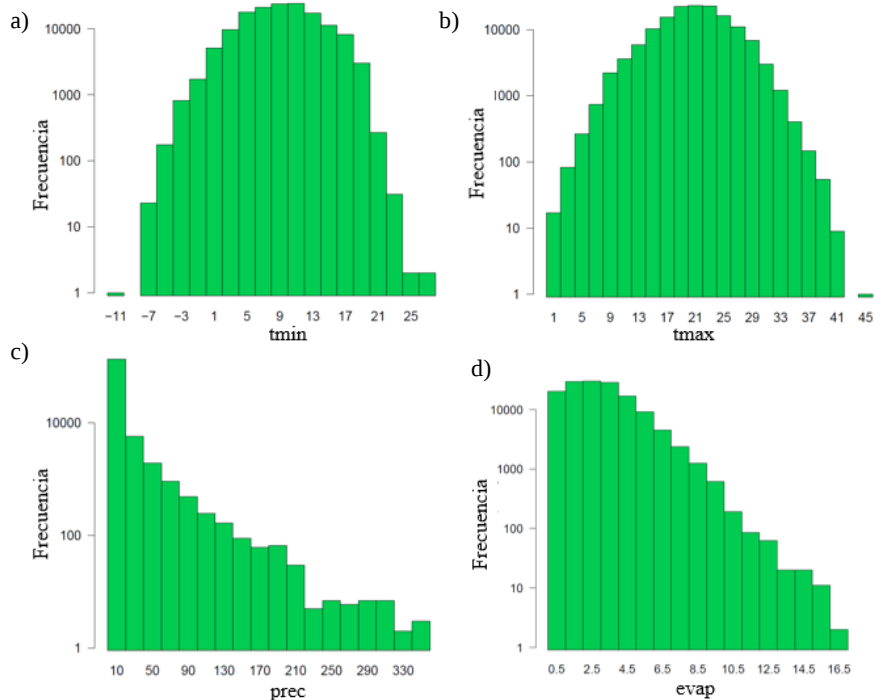


Figura 21. Histogramas las variables de temperatura mínima (a, t_{min}), máxima (b, t_{max}) precipitación (c, $prec$) y evaporación (d, $evap$).

3.3.12 Correlograma de las series

La correlación (Figura 22) para las variables: t_{min} , t_{max} fue de; 0.04 a 0.77, $prec$ fue de; -0.04 a 0.82 y $evap$ fue de; -0.05 a 0.35 respectivamente, donde se

observa la mayor correlación en la precipitación. Sin embargo, la precipitación también cuenta con valores negativos.

Según (Guijarro, 2023) la correlaciones deben ser siempre positivas, al menos dentro de un rango de distancias razonables y cuanto más altas sean las correlaciones, mayor será la fiabilidad de la homogeneización y el relleno de datos ausentes. En el caso de los valores negativos de la precipitación, este puede ser justificado como lo indican. Addou *et al.*, (2022) que la discontinuidad orográfica puede dar regímenes de precipitación opuestos en distancias cortas como por ejemplo las fuertes variaciones topográficas y la exposición de las laderas. Por otro lado, Guijarro, (2004) señala que el coeficiente de correlación permite discriminar observatorios por lo que su uso como criterio de ponderación para la obtención de series de referencia es popular.

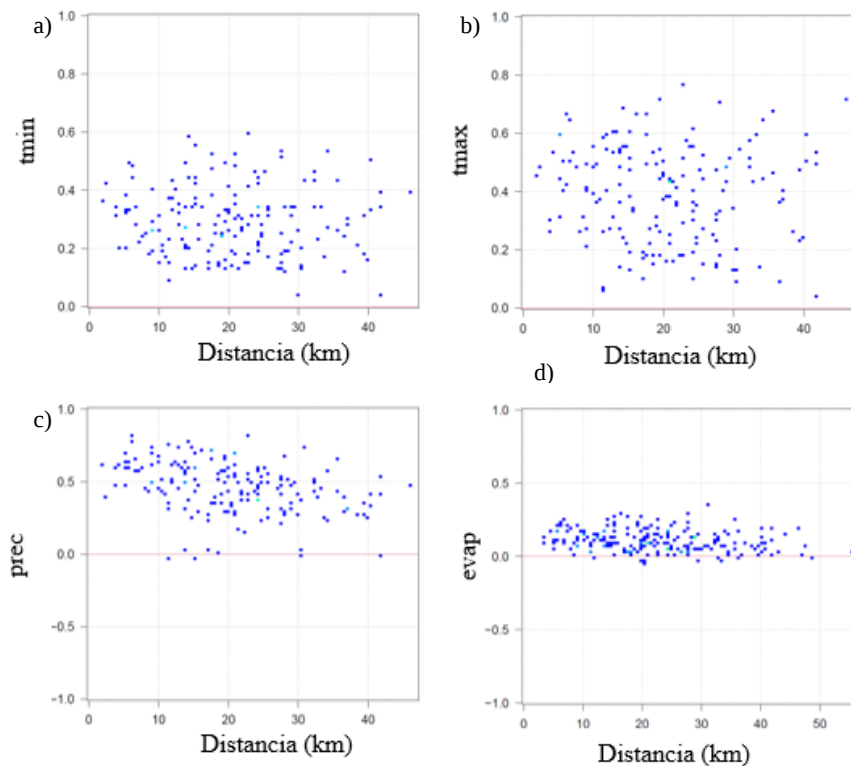


Figura 22. Correlograma de las series de las variables de temperatura mínima (a, tmin), máxima (b, tmax) precipitación (c, prec) y evaporación (d, evap).

3.3.13 Dendrograma de grupos de estaciones

El algoritmo organiza las estaciones en un damerograma o diagrama de agrupación jerárquica (Figura 23), donde los grupos con altas correlaciones se agrupan en la misma rama (Addou *et al.*, 2022). Que permite apreciar cómo se relacionan las estaciones según la semejanza entre los valores. Para su interpretación se selecciona un índice de disimilitud (que en gran parte es arbitrario y subjetivo) para la formación de grupos de interés (Palacio *et al.*, 2020). En este caso con un nivel de disimilitud de 0.5 donde Nieves-Ayala, (2012) menciona que el índice es un modo de medir la uniformidad en la distribución de una población, y se utiliza como una medida que permite distinguir la diferencia entre grupos. En consecuencia, las estaciones con características similares se agrupan de la siguiente manera: nueve grupos para la temperatura mínima, ocho para a la temperatura máxima, trece para la precipitación y tres grupos con base en la evaporación.

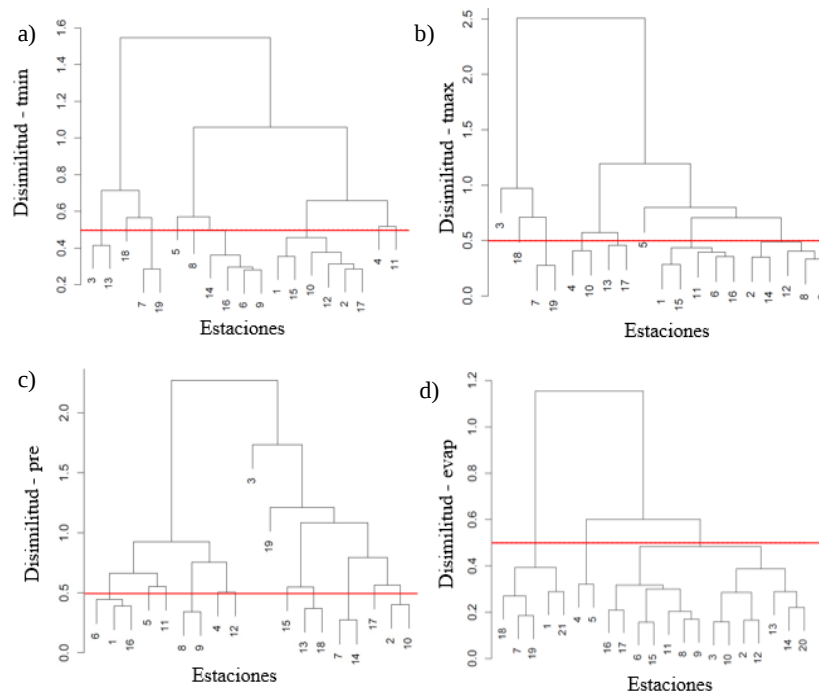


Figura 23. Dendrograma de grupos de estaciones con base en la temperatura máxima (a), mínima (b), precipitación (c) y evaporación (d).

3.3.14 Variación espacial de la temperatura

A partir de la información de temperaturas (máximas (tmax) y mínimas (tmin)) se realizaron mapas de isolíneas media diaria (Figura 24 y 25). Donde la variación de las temperaturas fue de entre -11°C a -1.5°C (para las mínimas) y entre 14°C a 28°C (para las máximas). Donde se indica que la mayor temperatura se encuentra en el norte del área de estudio (21032 Cuetzalan del progreso) y la más fría dentro del área de estudio (21103 Zacapoaxtla (SMN)).

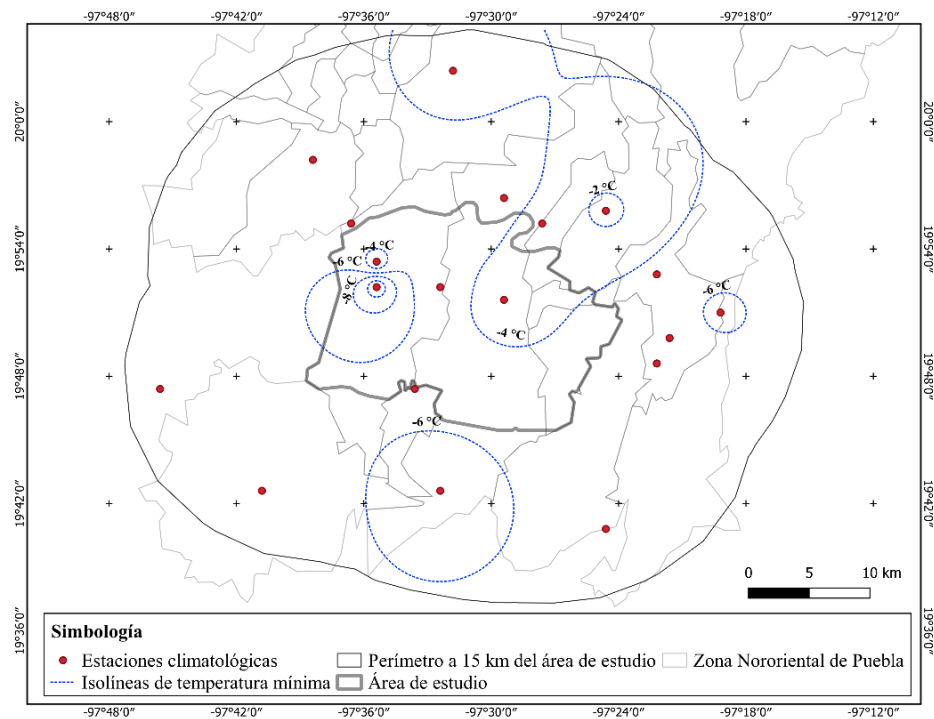


Figura 24. Isolíneas de temperatura mínima media diaria.

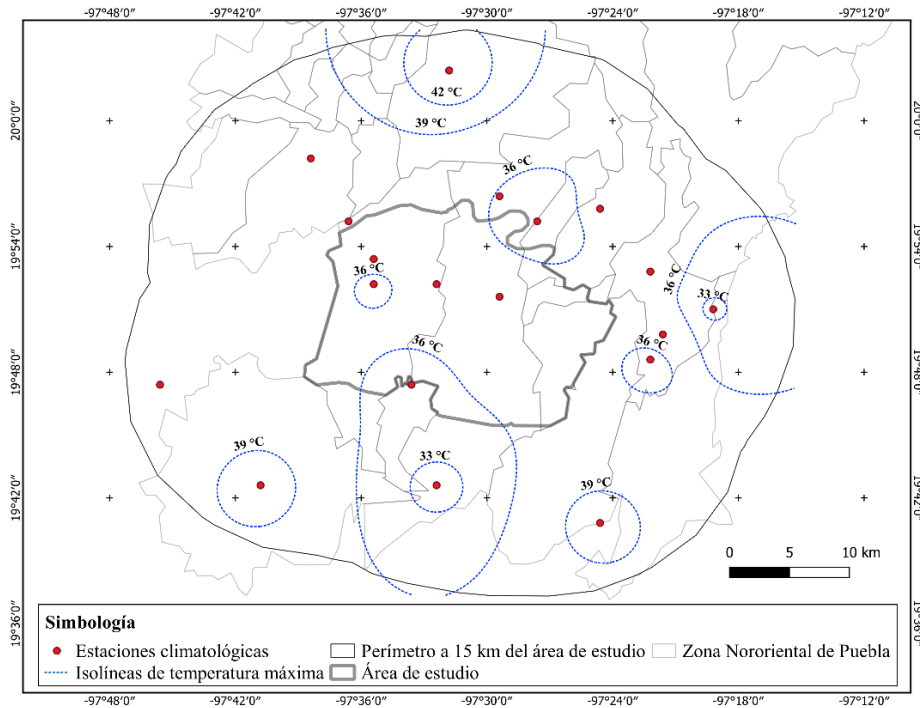


Figura 25. Isolíneas de temperatura máxima media diaria.

3.3.15 Variación espacial de la precipitación

La precipitación media diaria varía entre 1.23 a 11.20 mm (Figura 26), donde la mayor precipitación se encuentra al norte - este del área de estudio (21032 Cuetzalan del progreso y 21011 Tetelilla (CFE)), y la de menor cantidad en la parte sur (21209 Los humeros (CFE) y 21111 Santiago Zautla (CFE)). Concerniente a ello, Portuguese-Maurtua et al., (2022) mencionan que la precipitación, por su variabilidad en el espacio y tiempo, es una de las variables más difíciles de caracterizar, estimar y pronosticar especialmente a escala diaria. De igual manera, Phillips et al., (1992) mencionan que las precipitaciones frecuentemente aumentan con la elevación, y las cadenas montañosas también crean "sombras de lluvia" hacia la dirección del viento.

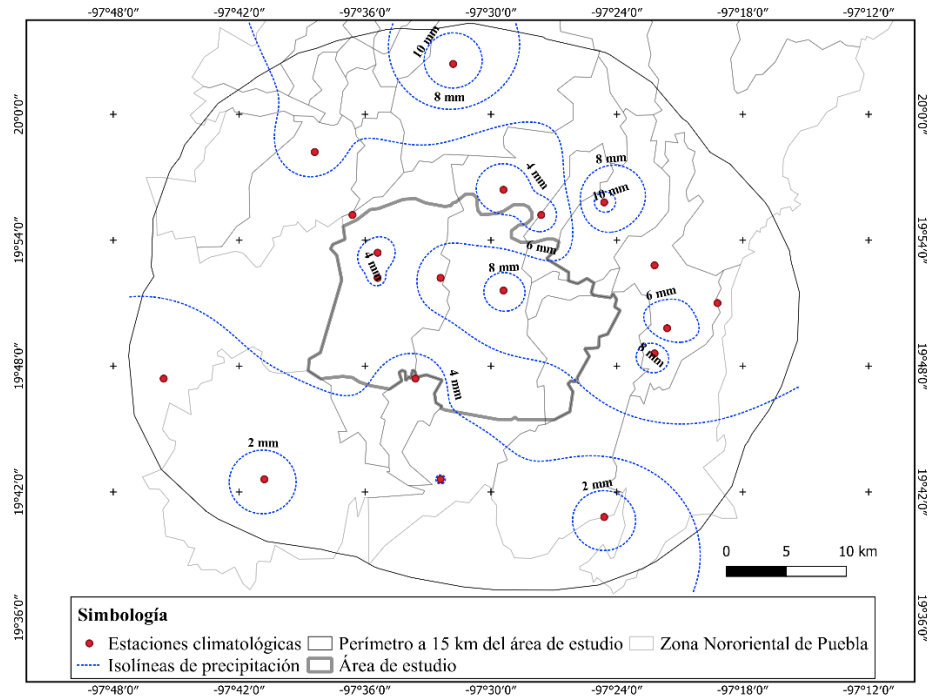


Figura 26. Isótopos de precipitación media diaria.

3.3.16 Variación especial de la evaporación

La evaporación media diaria varía entre 2.1 a 3.9 mm (Figura 27), la mayor se encuentra al suroeste del área de estudio (21104 Zacapoaxtla (DGE) y 21209 Los humeros (CFE)) y la de menor cantidad en la parte centro - noreste (21011 Tetelilla (CFE) y 21055 La Pagoda) lo que coincide con lo opuesto encontrado en la precipitación.

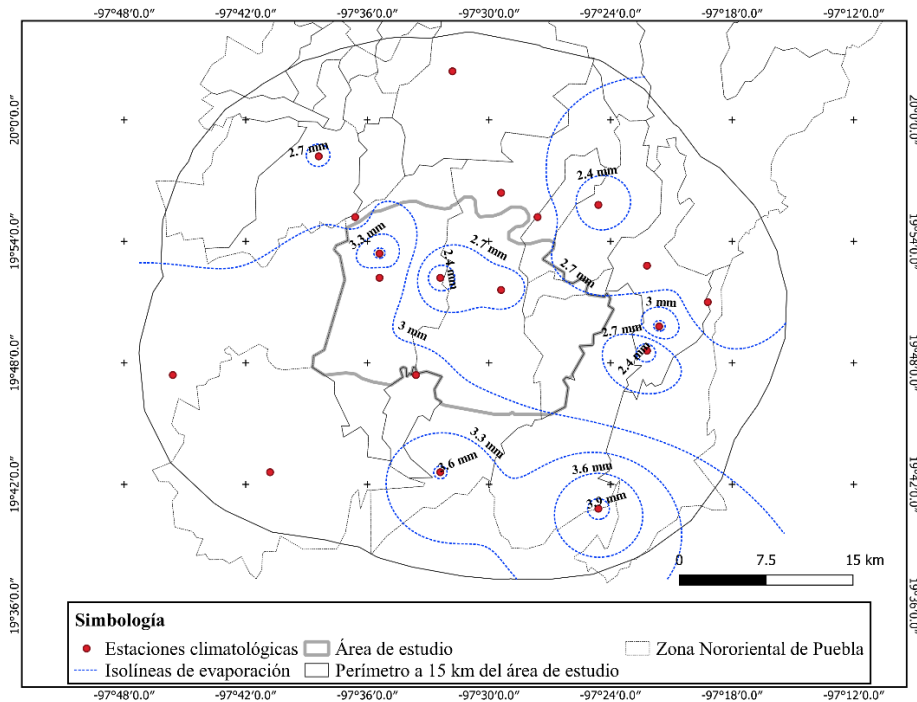


Figura 27. Isolíneas de evaporación media diaria.

3.3.17 Análisis de heladas

El mayor número de heladas (Cuadro 2) se presentó en la primavera y otoño para la estación 21059 Oyameles. Por otra parte, las estaciones que no presentan heladas primaverales u otoñales son; 21011 Tetelilla (CFE), 21064 Presa la soledad (CFE), 21174 Tepecapan (CFE) y 21098 Tlatlauquitepec (CFE). Monterubbianesi & Cendoya, (2001) menciona que las heladas provocan daños a la agricultura, dependiendo de su intensidad y estado de desarrollo del cultivo, llegando a producir pérdidas en la producción. En consecuencia, las heladas se presentan principalmente en enero y en diciembre. En cambio, la estación 21032 Cuetzalan del progreso las presenta también en marzo y mayo, y las otoñales en noviembre.

Cuadro 6. Resumen de eventos con temperaturas iguales o menores a 0 °C.

Estación	MaxP	MmHP	MaxO	MmHO	HP	HO	TH
21011	0	NA	2	Diciembre	0	2	2
21021	71	Enero	46	Diciembre	131	68	199
21032	3	Enero, Marzo, Mayo	1	Noviembre	10	1	11
21043	6	Enero	9	Diciembre	10	9	19
21054	79	Enero	42	Diciembre	158	67	225
21055	24	Enero	10	Diciembre	46	11	57
21059	320	Enero	285	Diciembre	583	518	1101
21064	0	---	4	Diciembre	0	4	4
21074	14	Enero	9	Diciembre	33	11	44
21091	35	Enero	29	Diciembre	63	34	97
21098	12	Enero	0	---	21	0	21
21103	33	Enero	43	Diciembre	46	60	106
21104	5	Enero	3	Diciembre	8	3	11
21111	56	Enero	34	Diciembre	94	73	167
21162	1	Marzo	4	Diciembre	1	4	5
21174	0	NA	3	Diciembre	0	3	3
21207	51	Enero	30	Diciembre	91	58	149
21208	25	Febrero	6	Diciembre	69	15	84
21209	131	Enero	107	Diciembre	231	209	440

Nota: MaxP: Máximo número de heladas primaverales en un mes. MmHP: Mes en el que se presenta el mayor número de heladas primaverales. MaxO: Máximo número de heladas otoñales en un mes, MmHO: Mes en el que se presenta el mayor número de heladas otoñales, HP y HO: Total de heladas primaverales y otoñales de la serie 1980-2018 respectivamente. TH: Total de heladas HP + HO.

3.3.18 Número de heladas

El mayor número de heladas (Figura 28) se presenta al sur del área de estudio (21059 Oyameles y 21209 Los humeros (CFE)) y la menor al noreste (21011 Tetelilla (CFE), 21174 Tepecapan (CFE) y 21064 Presa la soledad (CFE)).

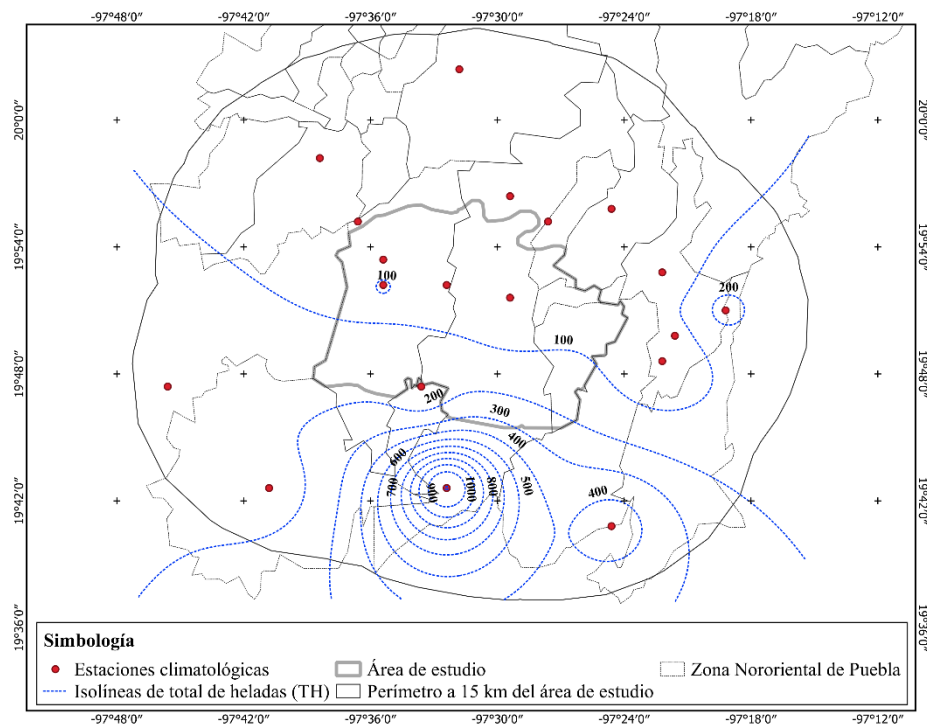


Figura 28. Isolíneas del número de heladas totales (TH).

3.4 Conclusión

La información climática de la región tiene limitaciones de disponibilidad, series no continuas, incompletas entre otras. Sin embargo, se muestra una tendencia en contar con menos datos, pero permitió la caracterización de la región. Ahora bien, de la información climática, se identificó valores atípicos leves y extremos, incrementos y decrementos de variables de manera repentina y valores repetidos consecutivos, que se deben revisar previo en análisis.

En las correlaciones se muestran valores aceptables para las temperaturas que no presentaron valores negativos, caso contrario con la precipitación. En los análisis se debe considerar la variabilidad orográfica en la región, que presentó regímenes de precipitación distintos. Por otro lado, a partir de los dendrogramas de grupos de estaciones con uniformidad en las características de las variables, puede ser útil para la completar la información faltante.

Por último, la temperatura los valores mayores se presentan en la parte norte y la más fría en el centro del área de estudio. Con respecto a la lluvia, la parte más lluviosa se localiza al este y menor al suroeste. Para la evaporación la mayor ocurre al suroeste y menor en la parte centro - noreste.

3.5 Literatura citada

- Addou, R., Hanchane, M., Obda, K., Krakauer, N. Y., El Khazzan, B., Kessabi, R., & Achiban, H. (2022). Monthly Precipitation over Northern Middle Atlas, Eastern Morocco: Homogenization and Trends. *Applied Sciences*, 12(23), 12496. <https://doi.org/10.3390/app122312496>
- CICESE. (2019). Base de Datos Climatológica Nacional. Recuperado de <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- CONABIO. (2018). División política municipal, 1:250000. 2018. Recuperado de <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/mun22gw.html>
- CONAGUA. (2010). Manual Teórico Práctico del Observador Meteorológico de Superficie. Recuperado de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001679.pdf>
- Doraiswamy, P. C., Pasteris, P. A., Jones, K. C., Motha, R. P., & Nejedlik, P. (2000). Techniques for methods of collection, database management and distribution of agrometeorological data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1–2), 83–97. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00120-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00120-9)
- Dunaieva, I., Vecherkov, V., Filina, Y., Popovych, V., Barbotkina, E., Pashtetsky, V., Terleev, V., Mirschel, W., & Akimov, L. (2021). Review of automatized meteorological stations use for agricultural purposes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 937(3), 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032097>
- Gómez, D. A. (2023). El derecho a la información climática en México. Estudios en derecho a la Información, 165–176. <https://doi.org/10.22201/ijj.25940082e.2024.17.18786>
- Guajardo-Panes, R. A., Granados-Ramírez, G. R., Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., & Barbosa-Moreno, F. (2017). Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5), 157–177. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-11>
- Gubler, S., Hunziker, S., Begert, M., Croci-Maspoli, M., Konzelmann, T., Brönnimann, S., Schwierz, C., Oria, C., & Rosas, G. (2017). The influence of

- station density on climate data homogenization. *International Journal of Climatology*, 37(13), 4670–4683. <https://doi.org/10.1002/joc.5114>
- Guijarro, J. (2004). Climatol: Software libre para la depuración y homogeneización. *Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria*, 4, 493–502. Recuperado de <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9036>
- Guijarro, J. A. (2019). Homogeneización de series climáticas con Climatol. In *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*. Recuperado de https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/12185/1/homog_climatol-es.pdf
- Guijarro, J. A. (2023). Guía de uso del paquete de R climatol (versión 4) (No. 4; pp. 1–20). Recuperado de <https://climatol.eu/>
- INEGI. (2008). Climatología. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/default.html#Descargas>
- INEGI. (2010). Hidrografía. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/#descargas>
- INEGI. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Neto, H., Calheiros, A. J., Santos, R., Quiles, M., Muralikrishna, A., Almeida, A., & Souza, F. (2020). Aplicação de redes neurais recorrentes em séries temporais de estações meteorológicas para imputação de dados: uma abordagem sobre micro-estações meteorológicas na região Oeste do Pará. *Anais Do Workshop de Computação Aplicada à Gestão Do Meio Ambiente e Recursos Naturais (WCAMA 2020)*, 171–180. <https://doi.org/10.5753/wcama.2020.11031>
- Lépez, H. R. (2019). Técnica de extracción, transformación y carga de datos de estaciones meteorológicas. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 32, 28–32. <https://doi.org/10.36995/j.recyt.2019.32.005>
- Longman, R. J., Newman, A. J., Giambelluca, T. W., & Lucas, M. (2020). Characterizing the Uncertainty and Assessing the Value of Gap-Filled Daily Rainfall Data in Hawaii. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(7), 1261–1276. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0007.1>
- Matovelle, C., Heras, D., & Solano-Peláez, J. (2022). Eficiencia de la imputación de datos faltantes de precipitaciones utilizando herramientas computacionales en la cuenca hidrográfica, Jubones - Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(2), 23–30. <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n2.03>
- Mendoza, U. I., & Vázquez, Z. M. L. (2017). Detección de extremos climáticos de precipitación y temperatura en el estado de Guerrero. *Revista académica de la facultad de ingeniería*, 21(1), 13–30. Recuperado de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/467/46752305002/html/index.html>

- Monterubbianesi, G., & Cendoya, G. (2001). Caracterización del régimen de heladas meteorológicas y agrometeorológicas en balcarce (argentina) en el período 1970-1999. *Revista Facultad de Agronomía*, 21(1), 69–78. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/144233627.pdf>
- Nieves-Ayala, L. E. (2012). Índice de entropía, disimilitud y centralización: Un abordaje a la segregación residencial por nivel socioeconómico en las Áreas Metropolitanas de Puerto Rico: 2000. *CIDE Digital*, 3(1–2), 65–92. Recuperado de <https://revistas.upr.edu/index.php/cidedigital/article/view/11919/9786>
- Palacio, F. X., Apodaca, M. J., & Crisci, J. V. (2020). Análisis multivariado para datos biológicos: teoría y su aplicación utilizando el lenguaje R. In Vmeditores (Ed.), *Data Science* (1ra ed.). Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/135355>
- Pérez M, M., León, M., Soto, E., Avilán, L., & Gutiérrez, M. A. (2009). Aproximación al comportamiento climático en la zona citrícola de Yumare, estado Yaracuy, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(2), 356–363. Recuperado de: <https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/45475/1/cq09046.pdf>
- Phillips, D. L., Dolph, J., & Marks, D. (1992). A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58(1–2), 119–141. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90114-J](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90114-J)
- Portuguez-Maurtua, M., Arumi, J. L., Lagos, O., Stehr, A., & Montalvo Arquíñigo, N. (2022). Filling gaps in daily precipitation series using regression and machine learning in inter-andean watersheds. *Water*, 14(11), 1799. <https://doi.org/10.3390/w14111799>
- Radin, B., & Matzenauer, R. (2016). Uso das informações meteorológicas na agricultura do Rio Grande do Sul. *Agrometeoros*, 24(1), 41–54. <https://doi.org/10.31062/agrom.v24i1.24880>
- Ramos-Cruz, C. M., Almeyda-León, I. H., Granados-Rivera, L. D., Molina-muñoz, R., & Pérez-Evangelista, E. R. (2018). Metodología para el diagnóstico de la red de estaciones agroclimatológicas automatizadas en el estado de Nuevo León. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 4(3), 108–113. Recuperado de <http://aap.uaem.mx/index.php/aap/article/view/61>
- Silva, C. B., Silva, M. E. S., Ambrizzi, T., Tommaselli, J. T. G., Patucci, N. N., Mataveli, G. A. V., Lima, B. S., & Correa, W. C. (2019). Precipitação na américa do sul – dados obtidos por estações meteorológicas automáticas e por sistemas orbitais. *Revista Brasileira de Climatologia*, 25, 54–79. <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.58813>

- Trewin, B. (2013). A daily homogenized temperature data set for Australia. *International Journal of Climatology*, 33(6), 1510–1529. <https://doi.org/10.1002/joc.3530>
- Velasco, V. D., Flores, F. G., González, G., Flores, M. de J., & Moreno, H. A. (2015). Desarrollo y validación de una estación meteorológica automatizada de bajo costo dirigida a agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(6), 1253–1264. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000600009
- Velázquez Ruiz, A., Martínez, L. M., & Carrillo González, F. M. (2012). Caracterización climática para la región de bahía de banderas mediante el sistema de köppen, modificado por garcía, y técnicas de sistemas de información geográfica. *Investigaciones Geograficas*, 79(203), 7–19. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000300002&lng=es&nrm=iso&tlng=es

4 CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LA PARTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RIO APULCO, ZONA NORORIENTAL DE PUEBLA

4.1 Resumen

La caracterización agroclimática consiste en identificar la oferta agroclimática para la agricultura de temporal con base en algún cultivo en particular. La importancia radica en el diagnóstico de los riesgos agroclimáticos de la región para generar una herramienta para la toma de decisiones. En este trabajo se realizó la caracterización agroclimática con relación al cultivo de maíz en la zona nororiental de Puebla. El área de trabajo se determinó de acuerdo con dos unidades climáticas C(m), C(fm), en cinco municipios, de la clasificación de Köppen modificada por García y la subcuenca RH27Be-Rio Apulco. Dentro de esta área se seleccionaron 19 estaciones climáticas de las cuales se realizó el control de calidad de las series retirando y estimando los valores anómalos a más de dos distancias intercuartílicas para precipitación (prec), y tres para temperatura máxima (tmax) y mínima (tmin). Posteriormente se realizó la homogenización de las series climáticas y estimación de datos faltantes por medio del programa climatol 4.0.0. Por último, se calculó la probabilidad a 20% de ocurrencia de heladas, se determinó el inicio, final y duración de la estación de crecimiento, las probabilidades de ocurrencia de unidades de calor superiores a 1500 GDD, la probabilidad de precipitaciones estacionales superiores a 500 mm y la fecha de ocurrencia al 20% de periodos secos de siete días en los próximos 30 días por medio del programa Instat+ v3.36. Los resultados demostraron que para considerar una fecha de siembra al 20% libre de heladas debe ser posterior a 15 de marzo. Se encontró que solo dos estaciones cumplen el umbral de precipitación y tres el de unidades calor con el 100% de probabilidad. Además, la limitante de la región son los periodos secos.

Palabras clave: requerimientos, maíz, qgis, mapas, distribución.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: M.C. Juan Antonio Trinidad Santos

Director: Dr. Ramón Arteaga Ramírez

4.2 Introducción

La caracterización agroclimática consiste en identificar la oferta del agroclima para la planeación agrícola. Medauar *et al.*, (2020) mencionan que donde se pretende iniciar o expandir la producción agrícola, es necesario realizar un registro de las características del agroclima para identificar períodos críticos. Berhe *et al.*, (2021) sostienen que los cambios en los patrones de la temperatura y lluvia son importantes para la población que se dedica a la agricultura de temporal. La caracterización agroclimática proporciona un inventario del potencial agroclimático y las restricciones para el desarrollo de los cultivos que contribuyen a evitar limitaciones y disponer de estrategias de desarrollo a corto plazo (Da Silva *et al.*, 2013). Talchabhadel *et al.*, (2019) mencionan que identificar las características agroclimáticas de una región ayuda a evaluar el potencial agroclimático para la selección de variedades de cultivos y la necesidad de riego para producir altos rendimientos. De ahí que, se requieren series climáticas con más de 30 años de información. En consecuencia, trabajar con datos agroclimáticos permite planificar siembras, cosechas, fertilización, medidas de protección contra insectos y malezas, etc. (Dunaieva *et al.*, 2021). Teóricamente, emplear series de tiempo completas es el mejor caso, sin embargo, en la realidad, esta situación no siempre se cumple ya que fácilmente se pueden provocar la pérdida de información (Neto *et al.*, 2020).

La caracterización agroclimática de la región, se realizó para el cultivo de maíz ya que es un cultivo importante en la alimentación mexicana y un recurso para mantener la seguridad alimentaria del país. Algunos de estos análisis son los siguientes: el periodo libre de heladas, la ocurrencia de lluvias, la acumulación de grados días desarrollo y periodos secos.

Goñi & Otero, (2018) menciona que, las temperaturas, lluvias y la evapotranspiración son importantes para definir los sitios y prácticas de manejo. Por lo que, si la cantidad de precipitación aumenta, se pueden crear expectativas atractivas para la agricultura de temporal (Íñiguez-Covarrubias *et al.*, 2014).

Por otro lado (Ricca *et al.*, 2014) menciona que los estudios que identifiquen el riesgo agroclimático como eventos de heladas, calor extremo, sequía, lluvia intensa, vendavales y granizo que causan daños al desarrollo de cultivos. Por lo que el objetivo fue realizar una caracterización agroclimática de la parte media de la cuenca del Rio Apulco en la zona Nororiental de Puebla considerando los requerimientos agroclimatológicos del Maíz.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Área de estudio

La región de estudio (Figura 29) se encuentra en la zona Nororiental del estado de Puebla, la cual se delimito con base a las unidades climáticas C(m), C(fm) de la clasificación de Köppen modificada por García (INEGI, 2008) en los municipios de Atempan, Tételes de Ávila Castillo, Tlatlauquitepec, Yaonáhuac y Zacapoaxtla (CONABIO, 2018) y la subcuenca RH27Be-Rio Apulco (INEGI, 2010). Lo cual genera 338.937 km^2 de área de estudio y 2176.983 km^2 en el área de influencia de estaciones.

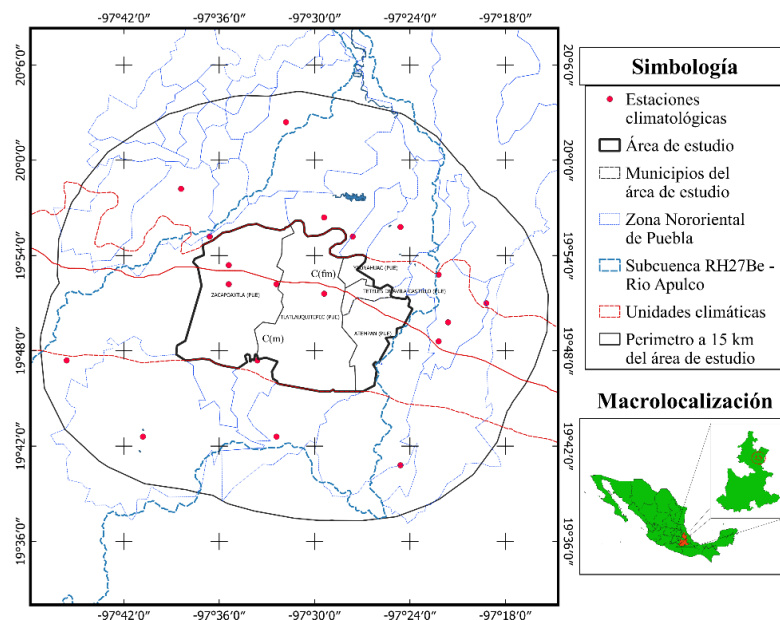


Figura 29. Zona de estudio y localización de las estaciones climáticas.

4.3.2 Base de datos

En la agricultura, para efectos de planeación, los registros de más de 30 años son ideales para realizar decisiones estratégicas para la planeación y operación de los cultivos. Ouda & Norledin, (2017) refieren que, para filtrar la mayoría de las fluctuaciones y anomalías anuales, un periodo de 30 años es suficiente. Sin embargo, aunque la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda el uso de series de 30 años para un análisis climatológico, algunos estudios demuestran que series más cortas también pueden dar buenos resultados (Marquínez *et al.*, 2003).

En consecuencia, las estaciones consideradas fueron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la información se recuperó por medio del sistema de software de manejo de datos climatológicos, desarrollado por las Naciones Unidas (CLICOM). Se estudiaron 19 estaciones climáticas (CICESE, 2019), de las cuales cuatro se encuentran dentro del área de estudio y 15 a una distancia de 15 km. Se consideró solo la red de estaciones climatológicas tradicionales que cumplieron con más de 30 años con información, dado que otras fuentes como las estaciones automáticas cuentan entre 10 y 15 años de datos (Mendoza & Vázquez, 2017). La información meteorológica fue a nivel diario del periodo 1980-2018 que consta de 38 años de datos de temperatura máxima (tmax), temperatura mínima (tmin), precipitación (prec) y evaporación (evap) que fueron recuperados en el año 2022.

4.3.3 Relieve

El relieve de la zona de estudio (Figura 30), se aprecia un descenso constante de sur a norte, donde la altitud del área oscila entre los 500 a 3000 msnm en el área de influencia de las estaciones (INEGI, 2013).

mencionan que el rango intercuartil es un buen estadístico para realizar el control de calidad que busca identificar valores extremos.

En este trabajo para los valores de las variables de t_{min} , t_{max} y $evap$ que quedan fuera del rango de $3(IQR)$ y para la variable $prec$ a $2(IQR)$ son considerados como valores atípicos. Se consideró esto debido a que la región se encuentra en un área susceptible a huracanes, tormentas provenientes del golfo de México.

La corrección de datos anómalos se promedió entre los valores anterior y posterior para los datos localizados a dos y tres (IQR) para no eliminar los eventos climáticos de la región. A diferencia de otros autores como Ceballos-Silva & López-Blanco, (2010) donde estiman los datos faltantes a partir del cálculo de la media de los 5 días anteriores y posteriores al dato faltante.

Esto con motivo de no eliminar el evento extremo, sino simplemente “suavizarlo” ya que no toda la precipitación es aprovechada por los cultivos agrícolas ya que parte de ella se evapora, escurre superficialmente o se pierde por percolación.

Por otro lado, la homogenización de las series climáticas consiste en la corrección de perturbaciones en las series, denominadas inhomogeneidades que pueden ocultar los verdaderos cambios del clima (Guijarro, 2019). Las cuales, pueden ser provocadas por incendios en las colindancias, o graduales, como la recuperación de la vegetación que pueden ser observados como cambios repentinos en la tendencia de la serie climática (Guijarro, 2019). De la misma manera, FAO, (2006) plantea que este fenómeno puede ocurrir por varias causas, como cambios en el manejo y la observación en los instrumentos, y otras relacionadas con los cambios con de las condiciones circundantes. Por lo que se debe tener cuidado antes de realizar conclusiones con series que presentan este tipo de comportamiento, ya que los resultados de los estudios climáticos pueden distorsionarse cuando se basan en datos que las contienen (Dumitrescu *et al.*, 2020).

Guijarro, (2016) refiere que la homogenización consiste en eliminar errores y alteraciones en la lectura, registro, calibración, renovación de equipos, cambios de ubicación de las estaciones climáticas que no son alteraciones provocadas por el clima. Coll *et al.*, (2020) mencionan que la homogeneización se realiza con datos crudos, ya que el llenado de datos faltantes antes puede conducir al estropeo de los resultados. En consecuencia, Dumitrescu *et al.*, (2020) mencionan que el método Climatol identifica los cambios significativos en la serie ejecutando la prueba de Homogeneidad Normal Estándar (SNHT) (Alexandersson, 1986) sobre las diferencias entre los datos observados y las series de referencia calculadas.

Guijarro, (2021) menciona que la serie se divide en el punto de SNHT máximo cuando las estadísticas son mayores que un umbral establecido. En este trabajo se utilizó: tmin, 200; tmax, 200; pre, 50; evap; 200.

En la generación de datos faltantes, el programa Climatol completa los datos utilizando los promedios provisionales y las desviaciones estándar, y los recalcula en un proceso iterativo, hasta estabilizarlos (Addou *et al.*, 2022). A causa, de que los algoritmos permiten encontrar la correlación entre la serie original de análisis y una serie de referencia calculada a partir de las demás estaciones (Gaona *et al.*, 2013). Los cuales sirven como factor de ponderación para la estimación de datos faltantes.

La calidad de la homogeneización entre los datos observados y los estimados se evalúa mediante el error cuadrático medio (RMSE) (Kessabi *et al.*, 2022). También, en la última página del fichero de gráficos contiene una figura que indica su calidad donde se calculan los RMSE al comparar los datos estimados y los observados (Guijarro, 2023).

4.3.5 Instat+ v3.36

La caracterización se realizó con el programa Instat+v3.36 con el cual se determinó: la probabilidad a 20% de ocurrencia de heladas, el cálculo del inicio, final y duración de la estación de crecimiento, la probabilidad de que se cumpla la cantidad de unidades de calor igual o superiores a 1500 GDD, precipitaciones superiores a 500 mm y la probabilidad de periodos secos de siete días en los próximos 30 días.

4.3.6 Maíz

Para la realización de la caracterización agroclimática del Maíz se determinaron sus requerimientos agroclimatológicos.

Pérez-de la Luz *et al.*, (2011) mencionan que la temperatura mínima y umbral requerido por el maíz es 0.5 y 10 °C respectivamente. Además, FAO, (2013) considera que el crecimiento se detiene a medida que se aproxima a una temperatura de 0 °C. Aunque, la helada a niveles críticos para los cultivos ocurre cuando la temperatura del aire desciende, sin llegar necesariamente a 0°C (Pérez-de la Luz *et al.*, 2011). Por lo que se consideró para el maíz lo determinado por Jasso-miranda *et al.*, (2022) quienes determinaron la pérdida de superficies cultivadas de temporal por efecto de heladas con temperaturas mínimas diarias por debajo de los 4 °C.

Con respecto al cálculo de probabilidades, Reyes-García *et al.*, (2021) mencionan que se puede establecer el periodo libre de heladas para el cultivo del maíz, admitiendo hasta un 20 % de riesgo en la última helada y hasta un 10 % en la primera helada. Sin embargo, para este trabajo se calculó la probabilidad de 20% de ocurrencia de heladas para ambos eventos.

En cuanto al Inicio y final de la estación de crecimiento, Íñiguez-Covarrubias *et al.*, (2014) mencionan que existen dos grandes criterios para definir el inicio y fin de la temporada de lluvias, el primero basado en el balance diario de humedad

del suelo y el segundo en el uso de la lluvia acumulada observada. Por otra parte, el final de la temporada de crecimiento está dictado principalmente por el agua almacenada en el suelo y su disponibilidad después de que finaliza la lluvia (Bekele *et al.*, 2017). Para la determinación del inicio de la estación se consideró la primera ocasión que se acumule 20 mm o más en 1 o 2 días a partir del 15 de marzo.

Con respecto a las Unidades de calor (GDD) Ojeda-Bustamante *et al.*, (2006) mencionan que el concepto integra en forma indirecta a través de la temperatura, la energía calorífica acumulada en las diferentes etapas de desarrollo fenológico. De modo que, Chen *et al.*, (2012) mencionan que la fecha de siembra y la fecha de cosecha seguras del maíz se pueden determinar por el comienzo y el final del período que se encuentra por encima de los 10 °C. Además Hou *et al.*, (2014) mencionan que los modelos térmicos requieren T_b y T_o de cada cultivo para estimar los GDD, los valores más utilizados en el cultivo de maíz son: temperatura base $T_b = 10^{\circ}\text{C}$ y temperatura óptima $T_o = 30^{\circ}\text{C}$.

Concerniente a la precipitación Radin & Matzenauer, (2016) consideran que de los elementos meteorológicos, esta variable es la más importante y demandada para la agrometeorología. Velázquez *et al.*, (2019) refieren que el maíz requiere entre 500 a 700 mm, bien distribuidos durante el ciclo. Zamora-Salgado *et al.*, (2011) considera, para obtener una cosecha el maíz como el grano tenga una madurez media, se requieren entre 500 y 800 mm de agua.

Acerca de los periodos secos, su importancia radica en los daños que estos pueden ocasionar a los cultivos dependiendo de la etapa de desarrollo. Teniendo en cuenta que Sarmiento-Herrera *et al.*, (2024) mencionan que en el periodo de mayor consumo de agua, una deficiencia de dos días puede disminuir el rendimiento en un 22%, y si es de seis a ocho en un 50%. De forma similar Aceves *et al.*, (2008) refieren que una deficiencia de agua en el período de floración puede ser motivo de una merma del 6 al 13% por día al final del ciclo agrícola. Por lo que para su análisis, el modelo de probabilidad de cadena de

Markov es reconocido como un modelo adecuado para explicar el comportamiento de frecuencia de períodos húmedos o secos (Krishnamurthy *et al.*, 2015).

Por lo que los umbrales que se consideraron: para el periodo libre de heladas se consideró una temperatura de 4 °C, para el cálculo de GDD una $T_b = 10^\circ\text{C}$ y $T_o = 30^\circ\text{C}$, la probabilidad de que se supere la precipitación de 500 mm y 1500 GDD respectivamente, y las fechas de periodos secos de 7 días con precipitaciones inferiores a 1 mm en los siguientes 30 días.

Por último, se realizaron mapas de Isolíneas para la representación espacial de la información utilizando el método de la distancia inversa ponderada (IDW) a una potencia de valor dos.

4.4 Resultados y discusión

4.4.1 Control de calidad

Para el control de calidad, se corrigieron mediante el promedio aritmético de un valor anterior y posterior para: t_{min} con 488 valores anómalos, así mismo para t_{max} con 70, pre con 102 y la $evap$ con 614 valores anómalos respectivamente. Guijarro, (2023) menciona que, en estos casos, es preferible la comprobación de los datos sospechosos y según se requiera, es mejor eliminarlo antes de la homogeneización, ya que esa anomalía puede provocar cambios en las series cercanas. Posteriormente, para controlar la calidad de las series, se fijó para todas las variables, tres desviaciones estándar (σ) de anomalías estandarizadas para su estimación por el programa climatol. Donde se obtuvieron los siguientes resultados.

En el cuadro 7, se presentan los valores de cambio que mantienen las series climáticas. Portuguesez-Maurtua *et al.*, (2022) encontraron valores de SNHT que van desde 9.10 hasta 228 para valores de precipitación diaria. Por otro lado Kessabi *et al.*, (2022) realizaron trabajos de homogenización mensual de

precipitación en una zona montañosa y determinaron valores SNHT entre 2.5 y 26.6 con una media de 6.28. En las cuales se puede determinar que las variables de tmax y prec están en un rango razonable. Sin embargo, tmin y evap presentan valores mayores a los encontrados en bibliografía.

Cuadro 7. Prueba de homogeneidad normal estándar sobre series de anomalías (SNHT).

Variable	Min.	Q1	Mediana	Media	Q3	Max.
tmin	17.60	32.95	58.25	80.16	81.22	533.40
tmax	9.20	28.90	71.00	84.78	131.10	250.80
prec	3.30	8.03	10.75	16.48	16.08	63.50
evap	6.90	16.90	25.20	49.12	57.00	402.40

Nota: tmin, temperatura mínima; tmax, temperatura máxima; prec, precipitación; evap, evaporación; Q1 y Q3, primer y tercer cuartil respectivamente.

Mamara *et al.*, (2013) menciona que el uso de la homogeneización no es para mejorar los valores absolutos sino para producir series con consistencia temporal y espacial.

Cuadro 8. Error cuadrático medio de los datos estimados (RMSE).

Variable	Min.	Q1	Median	Mean	Q3	Max.
tmin	1.21	1.49	1.75	1.84	1.89	7.31
tmax	1.00	2.11	2.41	2.54	2.87	4.46
prec	0.25	0.77	1.30	1.85	1.96	8.48
evap	0.80	1.21	1.29	1.34	1.56	2.06

Nota: tmin, temperatura mínima; tmax, temperatura máxima; prec, precipitación; evap, evaporación; Q1 y Q3, primer y tercer cuartil respectivamente.

Un valor alto de RMSE puede indicar una mala calidad, pero también podría deberse a que la estación se encuentra en un sitio peculiar con un microclima distinto (Guijarro, 2023). Con referencia a esto, Kessabi *et al.*, (2022) determinó en su trabajo de homogenización mensual de precipitación valores de RMSE oscilan entre 0.5 y 38.7 mm, con una media de 8.5 mm. Igualmente Portuguese-Maurtua *et al.*, (2022) presentó resultados con una alta variación para datos de precipitación diaria, con un valor mínimo de 1.26 y un máximo de 4.79. Además Matovelle *et al.*, (2022) considera el valor RMSE de 4.43 para la comparación entre los datos observados y rellenados a escala diaria de precipitación

satisfactorios. Por lo que, los valores de tmax y evap obtenidos en este trabajo podrían considerarse de igual o mejores características a excepción de tmin y prec.

Una vez corregidos los valores que sobrepasen el límite establecido de las anomalías estandarizadas, el porcentaje de los datos originales fue el siguiente (ver Cuadro 9). De manera que Portuguese-Maurtua *et al.*, (2022) mencionan que los valores altos significan que los datos originales son de buena calidad.

Los valores de este trabajo oscilan entre 1% a 85% por lo que se consideran de regular a mala calidad. Sin embargo, por el carácter accidentado de la región en la sierra madre oriental esto puede ser justificado.

Cuadro 9. Porcentaje de datos originales.

Variable	Min.	Q1	Median	Mean	Q3	Max.
tmin	1.00	10.00	15.50	19.44	26.00	67.00
tmx	2.00	10.00	14.00	19.73	28.00	61.00
prec	6.00	26.75	38.00	41.30	51.00	85.00
evap	2.00	13.00	22.00	26.32	40.00	61.00

Nota: tmin, temperatura mínima; tmax, temperatura máxima; prec, precipitación; evap, evaporación; Q1 y Q3, primer y tercer cuartil respectivamente.

Fioravanti *et al.*, (2019) mencionan que los resultados después de la homogeneización indican una confiabilidad mejorada de las series de temperaturas a largo plazo. Por otro lado, Dumitrescu *et al.*, (2020) determinó que la eliminación de los puntos de ruptura, la corrección y la homogeneización dan como resultado un nuevo conjunto de datos similares a los datos brutos, pero más confiables para la investigación climática debido a la mayor homogeneidad.

4.4.2 Caracterización agroclimática

4.4.3 Heladas

Estudiar las temperaturas mínimas, es establecer los periodos libres de heladas a partir del cálculo de probabilidades de ocurrencia de la primera y última helada

para fines agronómicos (Reyes-García *et al.*, 2021). En la región, la fecha más temprana para el final de las heladas primaverales está en el norte y este del área de estudio: día 3-mar, 5-ene y 21-ene para las estaciones 21011 Tetelilla (CFE), 21064 Presa la soledad (CFE) y 21174 Tepecapan (CFE) respectivamente.

Del mismo modo, la fecha más tardía para el final de las heladas primaverales está en el sur y este: 9-may y 10 de mayo en las estaciones 21054 La Fundición y 21209 Los humeros (CFE). Aunque también se presenta una en el norte del área de estudio: 21208 Gómez poniente (CFE).

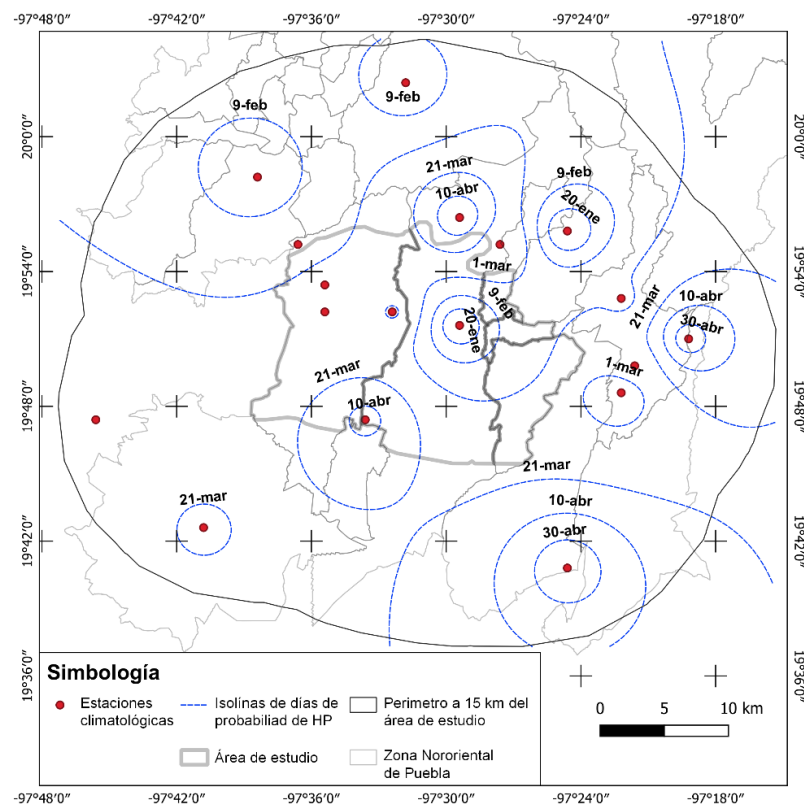


Figura 31. Isolíneas de fechas de ocurrencia de ultima helada primaveral al 20%.

Las primeras heladas otoñales se localizan dentro del área de estudio al noreste: 16-sep, 29-sep y 13-oct para las estaciones 21208 Gómez poniente (CFE), 21054 La Fundición y 21207 Zaragoza respectivamente.

Por otro lado, las últimas fechas de las heladas otoñales se encuentran dentro del área de estudio y al este: 19-dic, 24-dic y 25-dic para las estaciones 21209 Los humeros (CFE), 21064 Presa la soledad (CFE) y 21011 Tetelilla (CFE) respectivamente.

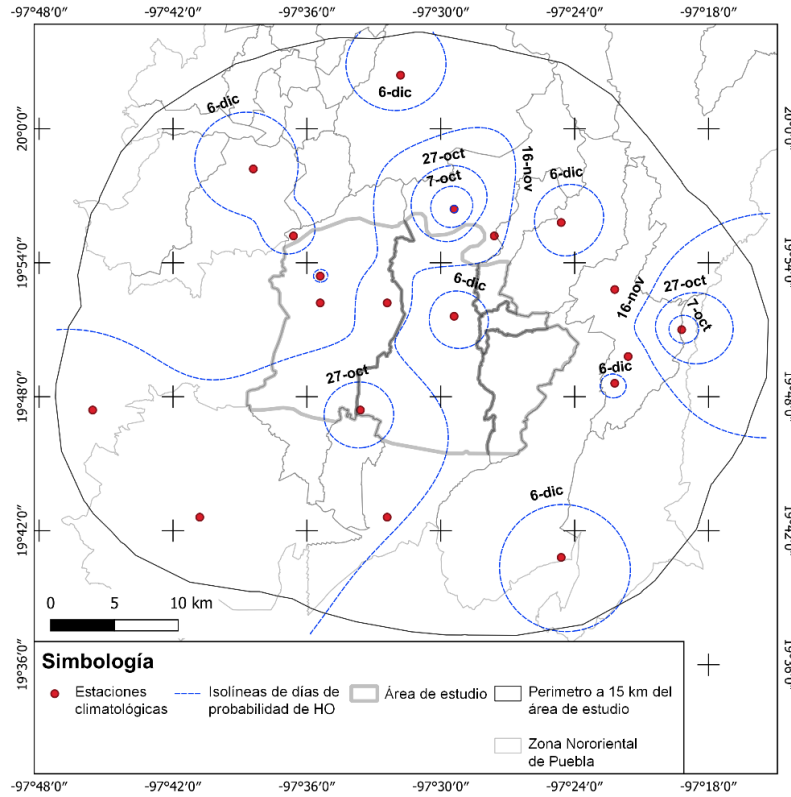


Figura 32. Isolíneas de fechas de ocurrencia de primera helada otoñal al 20%.

Como opciones alternas Reyes-García *et al.*, (2021) menciona que se podría admitir un nivel de riesgo de hasta 25 o 30 % en las fechas de las últimas heladas primaverales, pero no se recomienda ampliar para las primeras heladas otoñales por el riesgo económico que implican.

4.4.4 Longitud de la estación de crecimiento

Para el inicio de la estación de crecimiento, se consideró definiendo la mediana de las fechas de las últimas heladas primaverales al 20% de probabilidad de ocurrencia, que resultó el 15 de marzo.

Inicio de la estación de crecimiento

En el inicio de la estación de crecimiento se caracterizaron las fechas más tempranas: 4-abr, 8-abr y 17-abr para las estaciones 21011 Tetelilla (CFE), 21032 Cuetzalan del progreso, 21064 Presa la soledad (CFE) respectivamente.

Para las fechas más tardías, se localizaron en el perímetro norte y sur del área de estudio con fechas 20-may, 26-may y 28-may para las estaciones 21208 Gómez poniente (CFE), 21207 Zaragoza y 21098 Tlatlauquitepec (CFE) respectivamente.

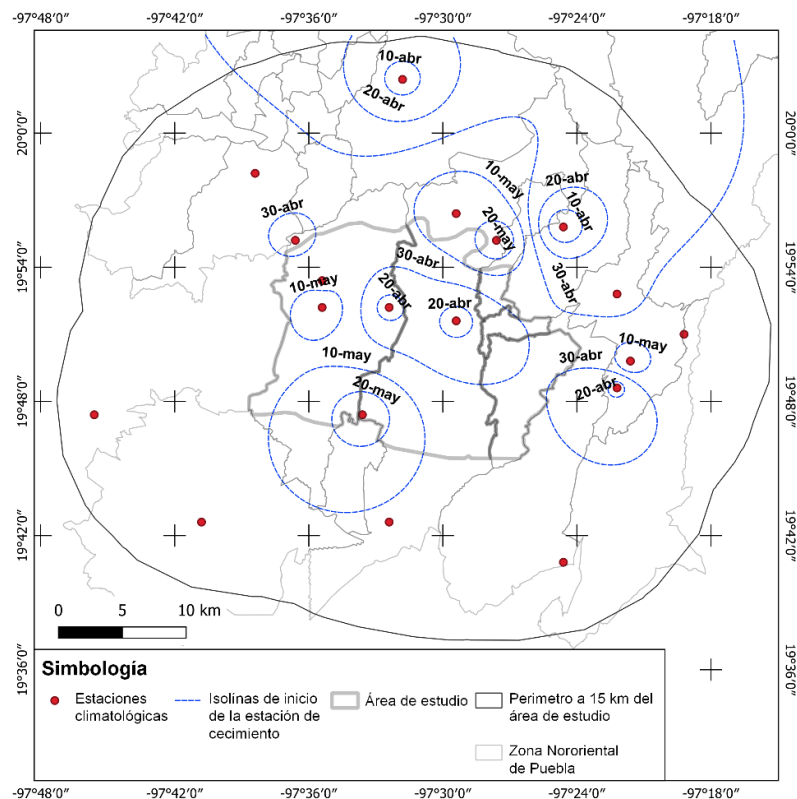


Figura 33. Isolíneas de fechas de inicio de la estación de crecimiento después del 15 de marzo.

Final de la estación de crecimiento

Las estaciones con las fechas del final de la estación de crecimiento más cortas se localizan en el perímetro norte y sur del área de estudio: 10-sep para la estación 21207 Zaragoza, y 16-sep para 21098 Tlatlauquitepec (CFE) y 21208 Gómez poniente (CFE). De igual manera las fechas para las más tardías, se encuentran dentro del área de estudio al norte: 29-nov, 29-oct y 20-dic para las estaciones 21055 La Pagoda, 21032 Cuetzalan del progreso, 21011 Tetelilla (CFE) respectivamente.

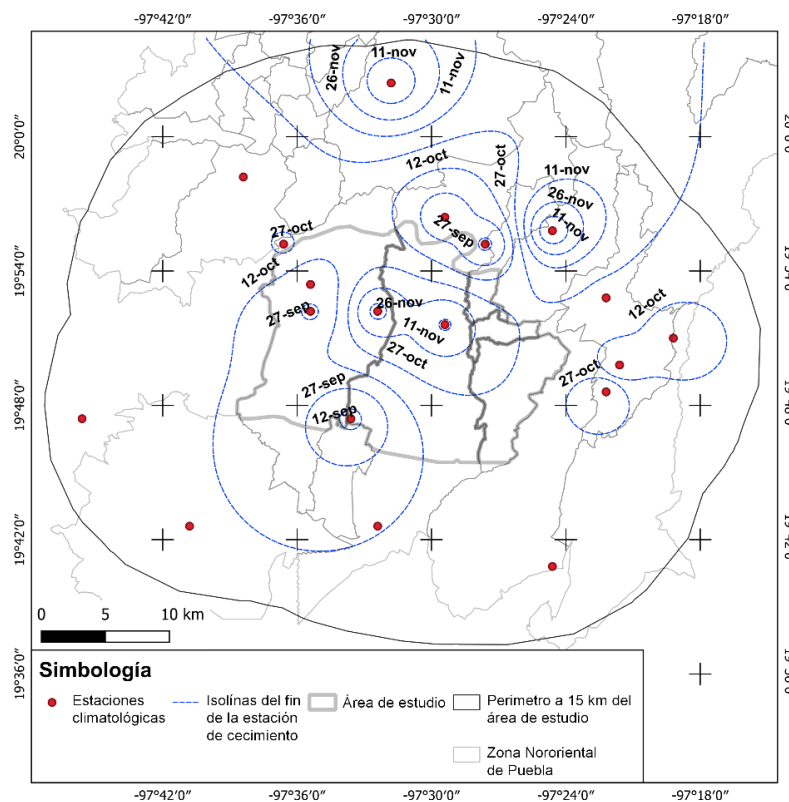


Figura 34. Isolíneas de fechas del final de la estación de crecimiento.

Duración de la estación de crecimiento

Para las duraciones en días de la estación de crecimiento más cortas, fueron localizadas al oeste y este con periodos de 119, 133 y 137 días para las estaciones 21208 Gómez poniente (CFE), 21103 Zacapoaxtla (SMN) y 21091 Teziutlán respectivamente.

Para las mayores duraciones en días, fueron localizadas dentro del área de estudio al norte con periodos de 226, 254 y 260 días para las estaciones 21055 La Pagoda, 21032 Cuetzalan del progreso y 21011 Tetelilla (CFE) respectivamente.

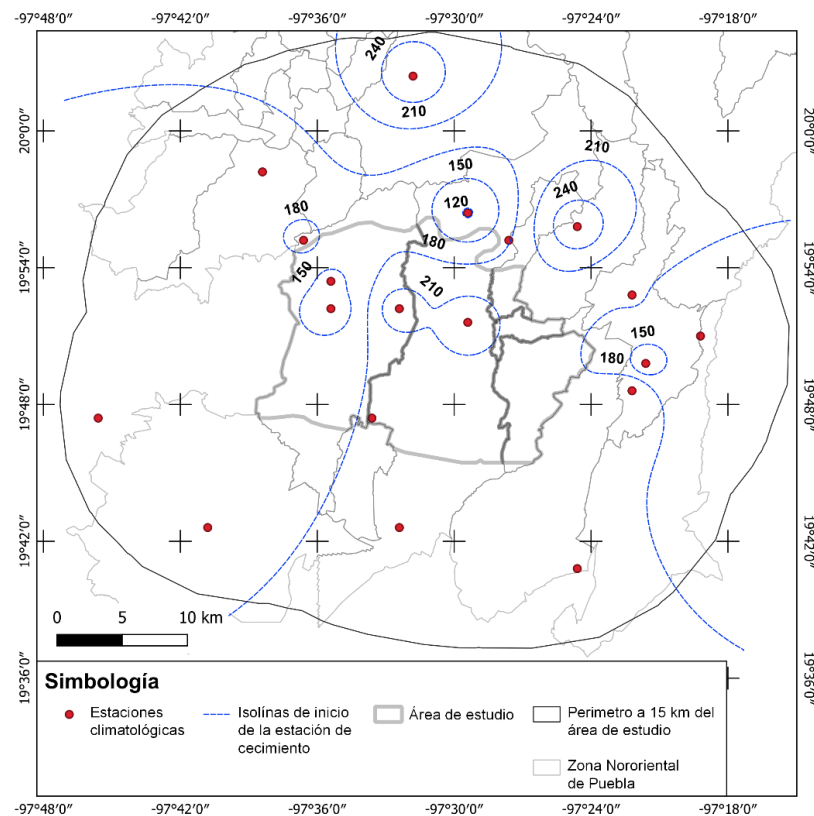


Figura 35. Isolinías de la duración en días de la estación de crecimiento desde el 15 de marzo.

4.4.5 Unidades calor (GDD)

La importancia de la evaluación de los requerimientos bioclimáticos térmicos (Tb y GDD) del maíz, permite evaluar los periodos de crecimiento térmico para diferentes sitios, dado que se determina con base a la oferta térmica del lugar (Arista-Cortes *et al.*, 2018).

Las probabilidades de que se supere el valor umbral de 1500 se presentan en casi toda el área, con excepción de las estaciones 21209 Los humeros (CFE), 21207 Zaragoza, 21054, La Fundación y 21208 Gómez poniente (CFE). De las cuales las primeras dos son las de mayor elevación, que se localizan a las alturas de 2862 y 21207 m.s.n.m. aproximadamente.

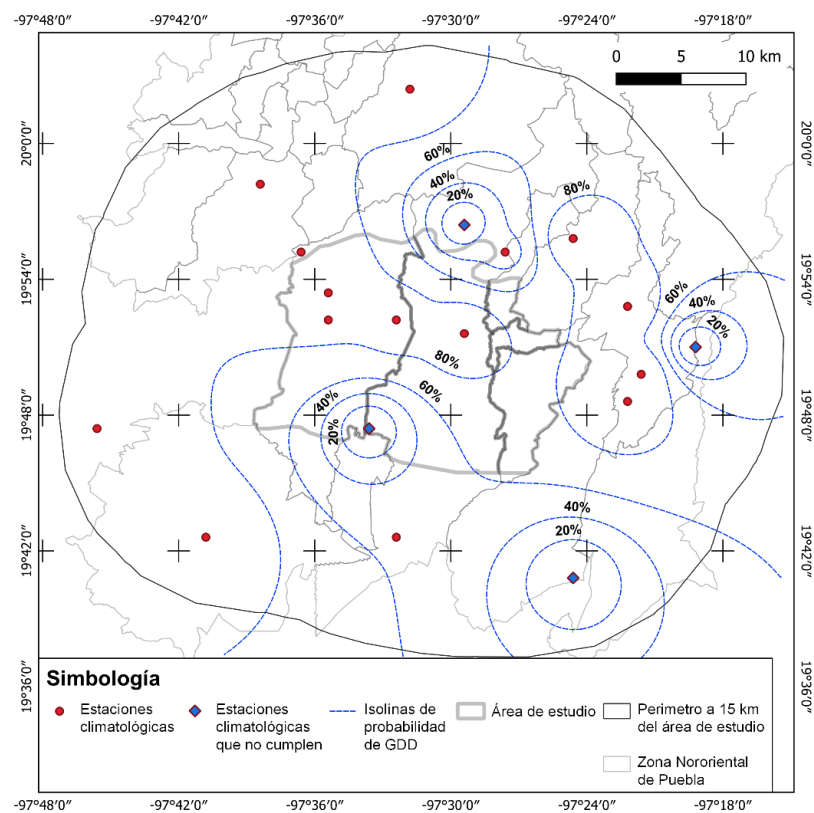


Figura 36. Isolíneas de probabilidad de ocurrencia de las unidades calor igual o mayor a 1500 GDD en el periodo de crecimiento.

4.4.6 Probabilidad de precipitación

Las probabilidades de que se supere el valor umbral de 500 mm se encuentran al norte de la zona de estudio: con 99.6, 99.5 y 97.3% para las estaciones 21011 Tetelilla (CFE), 21032 Cuetzalan del progreso, 21055 La Pagoda respectivamente. Siendo la ultima la única que se encuentra dentro del área de estudio. De igual modo, las estaciones con menor probabilidad se encuentran dentro del área de estudio al este: con 51.1, 50.3 y 30.6 % para las estaciones 21091 Teziutlan, 21103 Zacapoaxtla (SMN) y 21208 Gómez poniente (CFE) respectivamente. Lo que puede poner en riesgo la producción de maíz hasta en siete de 10 años como sucede en la última estación. Pues Reshmidevi *et al.*, (2009) refiere que la escasez de agua durante el período de cultivo afecta el crecimiento y reduce la producción.

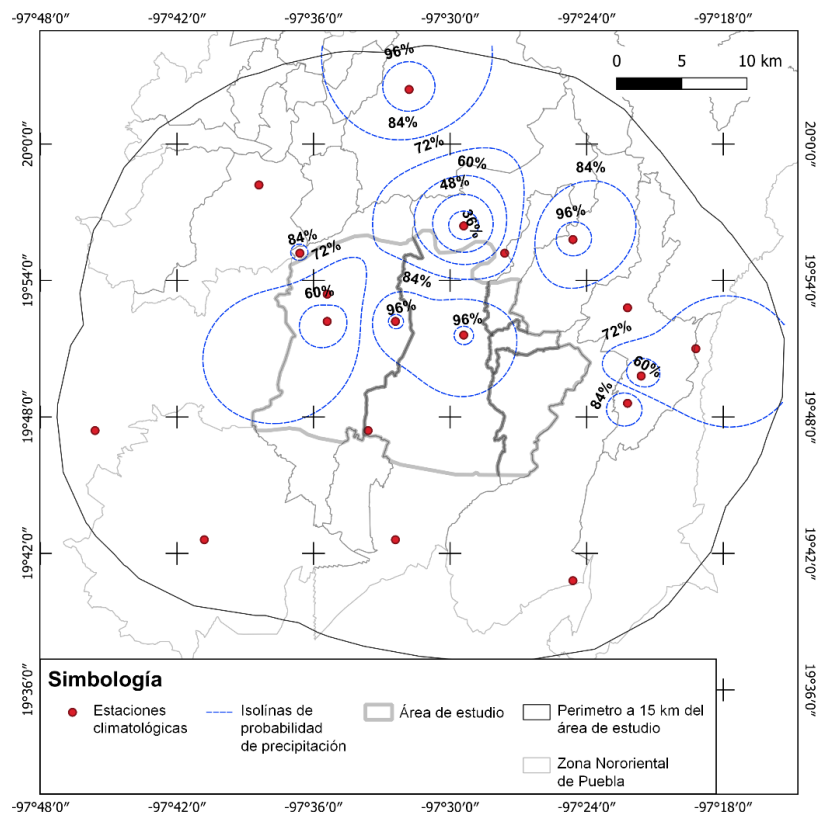


Figura 37. Isótopos de probabilidad de ocurrencia de precipitación igual o mayor a 500 mm en el periodo de crecimiento.

4.4.7 Periodos secos

La sequía es un factor crítico en la agricultura de temporal en cualquier etapa fenológica del cultivo, principalmente en el momento de su establecimiento y llenado del grano (Lupi & Kibert, 2019). La figura 38 muestra la fecha límite en la cual se presenta una probabilidad de periodos secos. Por lo que, desde la fecha de siembra hasta el valor mostrado, presentan una probabilidad mayor a 20%.

Por lo que, las fechas más tempranas en las que se puede presentar riesgo de periodos secos son 13-may, 21-may y 27-may para las estaciones 21162 Campo Experimental Teziutlán, 21011 Tetelilla (CFE) y 21032 Cuetzalan del progreso respectivamente que se localizan al norte y este de la zona de estudio.

De forma similar, las fechas más tardías en las que se pueden presentar son 24-ago en la estación 21207 Zaragoza, y 5-sep para las estaciones 21098 Tlatlauquitepec (CFE) y 21021 Capuluaque que comparten el mismo valor, y se localizan en la parte central del área y oeste.

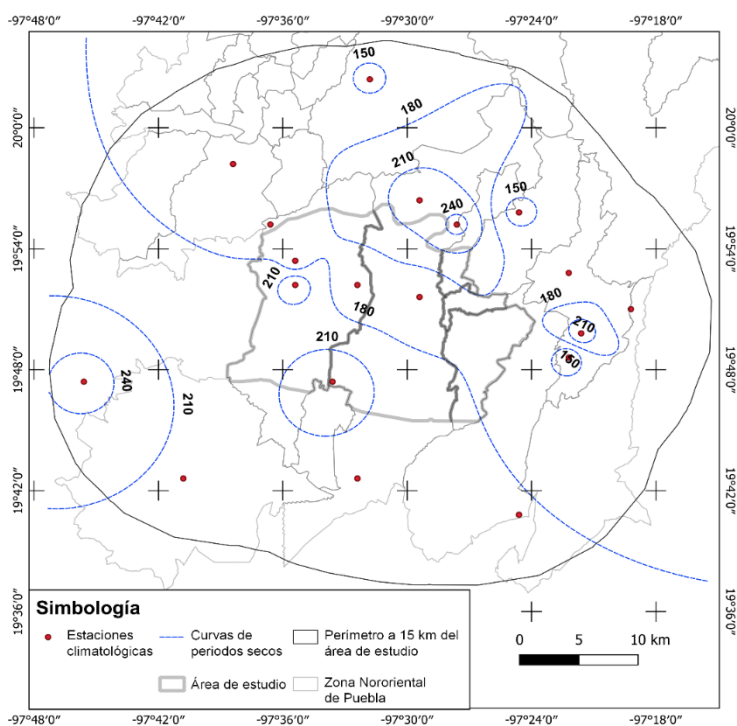


Figura 38. Isolíneas probabilidad al 20% de ocurrencia de periodos secos de 7 días en los próximos 30 días.

4.5 Conclusiones

Según las condiciones del área de estudio, se cuenta con las características apropiadas para el desarrollo del maíz. Sin embargo, hay excepción de algunos sitios que no cumplen con las características adecuadas. Las unidades térmicas, presentaron dos sitios que no cumplen con el criterio establecido, influenciados por la elevación en la que se encuentran, y en la precipitación, las estaciones que se encuentran al suroeste del área de estudio ya que están a sotavento. En cuestión de los periodos secos, estos limitan la seguridad de crecimiento de cultivo de maíz en la región. En el caso de la duración del periodo de crecimiento, cumple con el tiempo adecuado para el desarrollo del cultivo de entre 119 y 260 días. Solo limitadas por los periodos secos, que pueden causar perdidas por limitaciones hídricas.

4.6 Literatura citada

- Aceves, L. A., López, J. F., López, D. J., López, R. L., Rivera, B., Rincón, J. A., Morales, A. R., Hernández, R., & Hernández, J. L. (2008). Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo del maíz (*Zae mays* L) en el estado de Tabasco. Recuperado de <https://campotabasco.gob.mx/wp-content/uploads/2021/04/MAIZ.pdf>
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Addou, R., Hanchane, M., Obda, K., Krakauer, N. Y., El Khazzan, B., Kessabi, R., & Achiban, H. (2022). Monthly Precipitation over Northern Middle Atlas, Eastern Morocco: Homogenization and Trends. *Applied Sciences*, 12(23), 12496. <https://doi.org/10.3390/app122312496>
- Arista-Cortes, J., Quevedo Nolasco, A., Zamora Morales, B. P., Bauer Mengelberg, R., Sonder, K., & Lugo Espinosa, O. (2018). Temperaturas base y grados días desarrollo de 10 accesiones de maíz de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(5), 1023–1033. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i5.1507>
- Bekele, F., Korecha, D., & Negatu, L. (2017). Demonstrating Effect of Rainfall Characteristics on Wheat Yield: Case of Sinana District, South Eastern Ethiopia. *Agricultural Sciences*, 08(05), 371–384. <https://doi.org/10.4236/as.2017.85028>

- Berhe, A. G., Misgna, S. H., Abraha, G. G., & Abraha, A. Z. (2021). Variability and Trend Analysis of Temperature , Rainfall and Characteristics of Crop Growth Season in Eastern Zone of Tigray Region, Northern Ethiopia. *Research Square*, 1–21. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-474956/v1>
- CENAPRED. (2001). Centro Nacional de Prevención de Desastres. Serie fascículos: heladas. In Centro nacional de prevencion de desastres. Recuperado de <https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/serie-de-fasciculo-heladas?state=published>
- Chen, C., Qian, C., Deng, A., & Zhang, W. (2012). Progressive and active adaptations of cropping system to climate change in Northeast China. *European Journal of Agronomy*, 38(1), 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.07.003>
- CICESE. (2019). Base de Datos Climatológica Nacional. Recuperado de <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Coll, J., Domonkos, P., Guijarro, J., Curley, M., Rustemeier, E., Aguilar, E., Walsh, S., & Sweeney, J. (2020). Application of homogenization methods for Ireland's monthly precipitation records: Comparison of break detection results. *International Journal of Climatology*, 40(14), 6169–6188. <https://doi.org/10.1002/joc.6575>
- CONABIO. (2018). División política municipal, 1:250000. 2018. Recuperado de http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/muni_2018gw.html
- Da Silva, V. de P. R., Da Silva, B. B., Albuquerque, W. G., Borges, C. J. R., De Sousa, I. F., & Neto, J. D. (2013). Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. *Agricultural Water Management*, 128, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.007>
- Dumitrescu, A., Cheval, S., & Guijarro, J. A. (2020). Homogenization of a combined hourly air temperature dataset over Romania. *International Journal of Climatology*, 40(5), 2599–2608. <https://doi.org/10.1002/joc.6353>
- Dunaieva, I., Vecherkov, V., Filina, Y., Popovych, V., Barbotkina, E., Pashtetsky, V., Terleev, V., Mirschel, W., & Akimov, L. (2021). Review of automatized meteorological stations use for agricultural purposes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 937(3), 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032097>
- FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo. In Estudio fao riego y drenaje 56 (Vol. 56). Recuperado de <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s.pdf>
- Fioravanti, G., Piervitali, E., & Desiato, F. (2019). A new homogenized daily data set for temperature variability assessment in Italy. *International Journal of Climatology*, 39(15), 5635–5654. <https://doi.org/10.1002/joc.6177>
- Gaona, G., Quentin, E., & Labus, J. (2013). Homogeneidad y variabilidad espacial de series meteorológicas del área del proyecto “Ciudad del Conocimiento -

- Yachay .” *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 5(2), 1–13.
<https://doi.org/10.18272/aci.v5i2.138>
- Goñi, C., & Otero, A. (2018). Caracterización climática y edafológica en la zona de los ensayos de algarrobo y pecan de INIA Salto Grande. *Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria*, 13–21. Recuperado de :
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/9338/1/SAD-697p13-21.pdf>
- Guijarro. (2016). Automatización de la homogeneización de series climáticas: nuevas funciones del paquete Climatol 3.0. In *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio* (pp. 153–160). *Servicio de Publicaciones de la UA*.
<https://doi.org/10.14198/XCongresoAECAlicante2016-14>
- Guijarro, J. A. (2021). Homogenization of climatic series with Climatol. In *State Meteorological Agency (AEMET), Balearic Islands Office, Spain* (Vol. 1, Issue Marzo). <https://cran.r-project.org/web/packages/climatol/index.html>
- Guijarro, J. A. (2004). Climatol: Software libre para la depuración y homogeneización. *Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria*, 4, 493–502. Recuperado de
<https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9036>
- Guijarro, J. A. (2019). Homogeneización de series climáticas con Climatol. In *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*. Recuperado de
http://www.climatol.eu/homog_climatol-en.pdf
- Guijarro, J. A. (2023). Guía de uso del paquete de R climatol (versión 4) (No. 4; pp. 1–20). Recuperado de <https://www.climatol.eu/climatol4-en.pdf>
- Guijarro, J. A., López, J. A., Aguilar, E., Domonkos, P., Venema, V. K. C., Sigró, J., & Brunet, M. (2017). Comparison of homogenization packages applied to monthly series of temperature and precipitation: the MULTITEST project. *Proceedings of the 9th Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases*, 46–62. Recuperado de
https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/8392/1/Comparison_GuijarroWCDMP_85.pdf
- Hou, P., Liu, Y., Xie, R., Ming, B., Ma, D., Li, S., & Mei, X. (2014). Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize. *Field Crops Research*, 158, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.021>
- INEGI. (2008). *Climatología*. Recuperado de
<https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/default.html#Descargas>
- INEGI. (2010). *Hidrografía*. Recuperado de
<https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/#descargas>
- INEGI. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Recuperado de
<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

- Íñiguez-Covarrubias, M., Ojeda-Bustamante, W., & Sifuentes-Ibarra, C. D. E. (2014). Análisis de cuatro variables del período de lluvias asociadas al cultivo maíz de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(1), 101–114. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000100009
- Jasso-miranda, M., Soria-Ruiz, J., & Antonio-Némiga, X. (2022). Pérdida de superficies cultivadas de maíz de temporal por efecto de heladas en el valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(2), 207–222. Recuperado de <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2587>
- Kessabi, R., Hanchane, M., Guijarro, J. A., Krakauer, N. Y., Addou, R., Sadiki, A., & Belmahi, M. (2022). Homogenization and Trends Analysis of Monthly Precipitation Series in the Fez-Meknes Region, Morocco. *Climate*, 10(5), 64. <https://doi.org/10.3390/cli10050064>
- Konjit, S., Fitsume, Y., Asfaw, K., & Shoeb, Q. (2016). Wet and dry spell analysis for decision making in agricultural water management in the eastern part of Ethiopia, West Haraghe. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 8(7), 92–96. <https://doi.org/10.5897/IJWREE2016.0650>
- Lupi, A., & Kibert, K. (2019). Analysis of main growing seasonal (Kirmet or Genna) rainfall and dry spell occurrence in semi-arid central Rift Valley of Oromia Regional State, Ethiopia. *Journal of Horticultural Science and Crop Research*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.15744/2767-8709.1.101>
- Mamara, A., Argiriou, A. A., & Anadranistakis, M. (2013). Homogenization of mean monthly temperature time series of Greece. *International Journal of Climatology*, 33(12), 2649–2666. <https://doi.org/10.1002/joc.3614>
- Marquínez, J., Lastra, J., & García, P. (2003). Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, 270(1–2), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00110-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00110-5)
- Matovelle, C., Heras, D., & Solano-Peláez, J. (2022). Eficiencia de la imputación de datos faltantes de precipitaciones utilizando herramientas computacionales en la cuenca hidrográfica, Jubones - Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(2), 23–30. <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n2.03>
- Medauar, C. C., Menezes, A. A., Ramos, A., Galvão, Í. M., & Silva, S. D. A. (2020). Climatic characterization and evaluation of the need for supplementary irrigation for cacao in southern Bahia, Brazil. *Agronomía Colombiana*, 38(2), 272–279. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v38n2.84700>
- Mondragón, L. (2005). Manual para el cultivo de maíz en sistema a doble hilera. Recuperado de

[https://icamex.edomex.gob.mx/sites/icamex.edomex.gob.mx/files/files/publicaciones/2013 MAIZ DOBLE H.pdf](https://icamex.edomex.gob.mx/sites/icamex.edomex.gob.mx/files/files/publicaciones/2013%20MAIZ%20DOBLE%20H.pdf)

- Muñoz, W., Bedoya, O. F., & Rincón, M. E. (2020). Aplicación de redes neuronales para la reconstrucción de series de tiempo de precipitación y temperatura utilizando información satelital. *Revista EIA*, 17(34). <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1292>
- Neto, H., Calheiros, A. J., Santos, R., Quiles, M., Muralikrishna, A., Almeida, A., & Souza, F. (2020). Aplicação de redes neurais recorrentes em séries temporais de estações meteorológicas para imputação de dados: uma abordagem sobre micro-estações meteorológicas na região oeste do Pará. *Anais Do Workshop de Computação Aplicada à Gestão Do Meio Ambiente e Recursos Naturais (WCAMA 2020)*, 171–180. <https://doi.org/10.5753/wcama.2020.11031>
- Ouda, S. A. H., & Norledin, T. A. (2017). Evapotranspiration data to determine agro-climatic zones in Egypt. *Journal of Water and Land Development*, 32(1), 79–86. Recuperado de <https://journals.pan.pl/publication/117177/edition/101859/journal-of-water-and-land-development-2017-no-32-evapotranspiration-data-to-determine-agro-climatic-zones-in-egypt-ouda-samiha-a-h-norledin-tahany-a?language=en>
- Pérez-de la Luz, R., López-Sánchez, H., Antonio, P., Gil-Muñoz, A., Santacruz-Varela, A., & Guerrero-Rodríguez, J. de D. (2011). Evaluación de poblaciones nativas de maíz en ambientes con heladas en valles altos de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(5), 703–714. <https://doi.org/10.29312/remexca.v2i5.1619>
- Radin, B., & Matzenauer, R. (2016). Uso das informações meteorológicas na agricultura do Rio Grande do Sul. *Agrometeoros*, 24(1), 41–54. <https://doi.org/10.31062/agrom.v24i1.24880>
- Reshmidevi, T. V., Eldho, T. I., & Jana, R. (2009). A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds. *Agricultural Systems*, 101(1–2), 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.04.001>
- Reyes-García, O., Vaquera-Huerta, H., Rendón-Sanchez, G., & Valdez-Lazalde, J. R. (2021). Estimación del riesgo de ocurrencia de heladas aplicando teoría de valores extremos. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(6), 328–362. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-08>
- Ricce, W. D. S., Carvalho, S. L. C. de, Caramori, P. H., Auler, P. A. M., & Roberto, S. R. (2014). Zoneamento agroclimático da cultura do abacaxizeiro no Estado do Paraná. *Semina: Ciências Agrárias*, 35(4), 2337–2346. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n4Suplp2337>

- Sarmiento-Herrera, N. G., Aguilar-Ariza, A., & Camacho-Tamayo, J. H. (2024). Identificación de los factores que limitan el rendimiento de la producción de maíz a partir de datos observacionales. *Acta Agronómica*, 72(3), 1–14. <https://doi.org/10.15446/acag.v72n3.106012>
- Talchabhadel, R., Karki, R., Yadav, M., Maharjan, M., Aryal, A., & Thapa, B. R. (2019). Spatial distribution of soil moisture index across Nepal: a step towards sharing climatic information for agricultural sector. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3–4), 3089–3102. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02801-3>
- Veiga, H., Herrera, N., & Skansi, M. de los milagros. (2015). Descripción de controles de calidad de datos climáticos diarios implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur. In *Serie Reportes Técnicos – Reporte Técnico CRC-SAS-2014-001*. Recuperado de https://www.crc-sas.org/es/pdf/reporte_tecnico_CRC-SAS-2014-001.pdf
- Velázquez, J., Juárez, J. P., Ramírez, B., Del Valle, M., Jiménez, J., & Taboada, O. R. (2019). Regionalización de la producción de maíz de temporal en el Estado de Puebla, México. *Cuadernos Geográficos*, 58(2), 152–167. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i2.7531>
- Zamora-Salgado, S., Ruiz-Espinoza, F. H., Beltrán-Morales, F. A., Fenech-Larios, L., Murillo-Amador, B., Loya-Ramírez, J., & Troyo-Diéguez, E. (2011). Régimen hídrico del maíz en una zona árida, determinado en porcentajes de evaporación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), 181–186. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93917767013>