



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DE CULTIVOS (SECANO Y BAJO RIEGO) EN EL ESTADO DE NUEVO LEÓN

GUSTAVO ANDRÉS RAMÍREZ GÓMEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada: Zonificación agroecológica de cultivos (secano y bajo riego) en el Estado de Nuevo León, realizada por el alumno: Gustavo Andrés Ramírez Gómez, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. J. Enrique Rubiños Panta

ASESOR



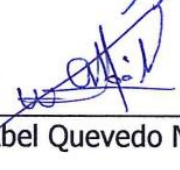
Dr. Carlos A. Ortiz Solorio

ASESOR



Dr. Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena

ASESOR



Dr. Abel Quevedo Nolasco

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2021

ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DE CULTIVOS (SECANO Y BAJO RIEGO) EN EL ESTADO DE NUEVO LEÓN

**Gustavo Andrés Ramírez Gómez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2021**

RESUMEN

La autosuficiencia alimentaria es crucial para el desarrollo de un país. Asimismo, se relaciona con la producción potencial de cultivos que es una de las principales metas de la zonificación de cultivos bajo diferentes escenarios que permitan tomar decisiones más racionales sobre el manejo y protección de las áreas agrícolas. Sin embargo, al desarrollar diferentes modelos con la carencia de datos de campo se desconoce la precisión de las metodologías. Por ende, los objetivos de la presente investigación son: 1) Determinar la aptitud edáfica y climática de 13 cultivos de interés para el estado de Nuevo León a través de distintas metodologías con los principios de la Zonificación Agroecológica; 2) evaluar la calidad de la información de mapas de perfiles de suelo y del SIAP; 3) contrastar las metodologías con los datos iniciales para cultivos de secano y bajo riego. Para lograr los objetivos se seleccionaron estaciones climatológicas con información mínima de 20 años, se compararon las metodologías de Zonificación Agroecológica Global (GAEZ por sus siglas en inglés), Papadakis y DIVA-GIS, como parámetros agronómicos se utilizó la base de datos de ECOCROP, se colectaron muestras de suelo de los primeros 30 cm de profundidad y se analizaron variables edáficas (pH, conductividad eléctrica, clase textural y drenaje interno), además de hacer correcciones de mapas con los resultados obtenidos.

Para las metodologías se utilizaron 13 cultivos iniciales y se redujo a seis cultivos con mayor presencia en campo, se entrevistó a 48 productores con 75 muestras de suelo. Asimismo, de los datos edáficos el de mayor precisión es la textura y conductividad eléctrica al tener una precisión mayor al 45%. De las metodologías agroclimáticas que obtuvieron una precisión mayor al 50% para riego son: GAEZ para el maíz y sorgo (57% y 100%, respectivamente) y DIVA-GIS para el sorgo y trigo (100% y 70%, respectivamente). Por otra parte, para secano se tiene a DIVA-GIS para el cultivo de naranja con 75% de precisión y Papadakis para el cultivo de sorgo con 75%. Al utilizar el álgebra de mapas la información edáfica, con una precisión mayor al 50%, se obtuvo en la modalidad de riego a DIVA-GIS para los cultivos de naranja, sorgo y trigo (57%, 100% y 71%, respectivamente), GAEZ para el cultivo del sorgo (100%), siendo en secano utilizando el método de DIVA-GIS el cultivo del frijol, naranja y trigo (78%, 50% y 73%, respectivamente), para el cultivo de sorgo y trigo (75% y 60%) con el método de GAEZ. No obstante, al clasificar los rendimientos municipales del SIAP con los datos de campo se tiene una precisión mayor o igual al 50% en los cultivos de maíz, naranja, sorgo y trigo. La zonificación agroecológica es factible. El método con mayor precisión y más cultivos fue DIVA-GIS, por otro lado, la información presentada por el INEGI solo se recomendaría la clase textural y de conductividad eléctrica al tener una precisión mayor al 45%. Además, la información del SIAP se recomienda usar sus rendimientos para establecer como máxima productividad en los cultivos ya mencionados.

Palabras clave: GAEZ, DIVA-GIS, Papadakis, comparación de metodologías.

AGROECOLOGICAL CROP ZONING (DRY LAND AND IRRIGATION) IN THE STATE OF NUEVO LEÓN

**Gustavo Andrés Ramírez Gómez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2021**

ABSTRACT

Food self-sufficiency is crucial for the development of a country. Likewise, it is related to the potential production of crops, which is one of the main goals of the zoning of crops under different scenarios that allow making more rational decisions about the management and protection of agricultural areas. However, when developing different models with the lack of field data, the precision of the methodologies is unknown. Therefore, the objectives of this research are: 1) To determine the edaphic and climatic aptitude of 13 crops of interest for the state of Nuevo León through different methodologies with the principles of Agroecological Zoning; 2) evaluate the quality of the information from the soil profile maps and the SIAP; 3) contrast the methodologies with the initial data for rainfed and irrigated crops. To achieve the objectives, climatological stations with a minimum information of 20 years were selected, the methodologies of Global Agroecological Zoning (GAEZ), Papadakis and DIVA-GIS were compared, as agronomic parameters the ECOCROP database was used, Soil samples were collected from the first 30 cm of depth and edaphic variables were analyzed (pH, electrical conductivity, textural class and internal drainage), in addition to making corrections of maps with the results obtained.

For the methodologies, 13 initial crops were used and it was reduced to six crops with a greater presence in the field, 48 producers were interviewed with 75 soil samples. Likewise, of the edaphic data, the one with the highest precision is the texture and electrical conductivity, as it has a precision greater than 45%. Of the agroclimatic methodologies that obtained a precision greater than 50% for irrigation are: GAEZ for corn and sorghum (57% and 100%, respectively) and DIVA-GIS for sorghum and wheat (100% and 70%, respectively). On the other hand, for rainfed there is DIVA-GIS for the cultivation of orange with 75% precision and Papadakis for the cultivation of sorghum with 75%. When using the map algebra, the edaphic information, with a precision greater than 50%, was obtained in the DIVA-GIS irrigation mode for the orange, sorghum and wheat crops (57%, 100% and 71%, respectively)., GAEZ for the cultivation of sorghum (100%), being in dry land using the DIVA-GIS method the cultivation of beans, oranges and wheat (78%, 50% and 73%, respectively), for the cultivation of sorghum and wheat (75% and 60%) with the GAEZ method. However, when classifying the municipal yields of the SIAP with field data, there is a precision greater than or equal to 50% in corn, orange, sorghum and wheat crops. Agroecological zoning is feasible. The method with greater precision and more cultures was DIVA-GIS, on the other hand, the information presented by INEGI would only recommend the textural and electrical conductivity class as it has a precision greater than 45%. In addition, the SIAP information recommends using their yields to establish the maximum productivity in the aforementioned crops.

Keywords: GAEZ, DIVA-GIS, Papadakis, methodologies comparison.

DEDICATORIA

A mi Madre y Padre

María del Carmen Gómez Chávez y Gustavo Ramírez Sandoval por darme su apoyo y amor incondicionalmente. Por enseñarme que las metas que uno se propone están más cerca cada día que se trabaja para lograrlo.

A mi hermana

Carmen Sofía Ramírez Gómez por su apoyo y de enseñanza para que nunca se rinda en las metas que se proponga en la vida.

A mi familia

Por su amor y apoyo incondicional.

A la familia **Ortíz-Gutiérrez y Gutiérrez-Garza**

Por aceptarme durante mi estancia de maestría y hacerme sentir como en un hogar, estare infinitamente agradecido.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis, sin lugar a dudas ha sido realizada con un gran esfuerzo y apoyo por parte de:

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por la beca otorgada para la realización de mis estudios de Maestría.

Al **Colegio de Postgraduados campus Montecillo** y a los posgrados de Edafología e Hidrociencias por brindarme apoyo para realizar la investigación en sus instalaciones.

A la **Fundación Produce Nuevo León, A.C.** y los **Centro de Apoyo al Desarrollo Rural (CADER)** del estado de Nuevo León por apoyarme en la logística con los productores de los **Distritos de Desarrollo Rural (DDR)**.

Al **Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio** por instruirme en el campo de agrometeorología y en el área de suelos, por sus comentarios y observaciones que permitieron concluir exitosamente la tesis.

Al **Dr. Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena** por su apoyo y consejos para el levantamiento de las muestras de suelos y las entrevistas con los productores.

Al **Dr. Juan Enrique Rubiños Panta** por sus enseñanzas en el aula y apoyo para culminar exitosamente la tesis.

Al **Dr. Abel Quevedo Nolasco** por su apoyo y comentarios para la tesis y sus enseñanzas en el área de climatología.

Al **Dr. Héctor Flores Magdaleno** por acceder a ser sinodal. Por tomarse el tiempo para revisar el manuscrito y sus observaciones que enriquecen la investigación.

A mis compañeros de la Facultad de Agronomía y del Colegio de Postgraduados por su inigualable amistad y apoyo durante la maestría.

Más que un conjunto de conocimientos, la ciencia es una forma de pensar

Carl Sagan (1934-1996)

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DEDICATORIAS.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE CUADROS	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Zonificación Agroecológica (ZAE; GAEZ)	3
2.2 Zonificación con el Método de Papadakis.....	5
2.3 Zonificación con el Método ECOCROP (DIVA-GIS)	7
2.4 Comentarios Finales.....	8
III. OBJETIVOS & HIPOTESIS.....	9
3.1 Objetivo General.....	9
3.2 Objetivos Específicos.....	9
3.3 Hipótesis General.....	10
3.4 Hipótesis Específicas.....	10
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
4.1 Descripción general del Estado de Nuevo León.....	10
4.2 Climatología.....	11
4.3 Selección de cultivos.....	12
4.4 Requerimientos de los cultivos en ECOCROP.....	12
4.5 Aptitud del cultivo.....	14
4.6 Selección y localización de las estaciones climatológicas.....	15
4.7 Cartografía de las Variables Climáticas.....	15
4.8 Propiedades Edáficas.....	15
4.9 Selección de los sitios de Perfiles de Suelos.....	16
4.10 Interpolación de propiedades Edáficas.....	16
4.11 Zonificación Agroecológica (GAEZ modificado)	17

4.11.1 Inventario Climático.....	18
4.12 Zonificación con el Método DIVA-GIS (ECOCROP)	19
4.13 Zonificación con el Método de Papadakis.....	19
4.14 Aptitud Edafoclimática de Cultivos.....	21
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
5.1 Estaciones climatológicas.....	22
5.2 Climatología.....	23
5.3 Propiedades edáficas.....	23
5.4 Zonificación Agroecológica (GAEZ modificado)	25
5.4.1 División y subdivisión climática.....	25
5.4.2 Periodos de Crecimiento y Unidades Calor.....	26
5.5 Cultivos seleccionados.....	29
5.6 Zonificación con el método GAEZ.....	29
5.7 Zonificación con el Método DIVA-GIS (ECOCROP)	33
5.8 Zonificación con el método Papadakis.....	37
5.9 Aptitud edáfica.....	40
5.10 Comprobación en campo.....	42
5.11 Análisis de Laboratorio y Corrección de Mapas.....	45
5.12 Aptitud edafoclimática de los cultivos.....	46
VI. CONCLUSIÓN.....	51
VII. LITERATURA CITADA.....	53
ANEXO	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Provincias Fisiográficas del estado de Nuevo León.....	11
Figura 2. Ubicación de los perfiles de suelo.....	17
Figura 3. Procedimiento para la aptitud por método GAEZ modificado.....	18
Figura 4. Bases de datos y variables climáticas para la aptitud por DIVA- GIS.....	20
Figura 5. Procedimiento para la zonificación de Papadakis.....	21
Figura 6. Procedimiento para la aptitud de cultivos.....	21
Figura 7. Localización de las estaciones climatológicas.....	22
Figura 8. A) Temperatura promedio anual y B) precipitación media anual para el estado de Nuevo León.....	23
Figura 9. Propiedades edáficas de Nuevo León: A) mapa de C.E.; B) mapa de pH; C) mapa de drenaje interno; D) mapa de clases texturales.....	24
Figura 10. Mapa de divisiones y subdivisiones climáticas (ANEXO I)	26
Figura 11. Periodos libres de helada: 284 días (40% superficie estatal), 240 (29%), 210 (6%), 180 (8%), 150 (4%), 120 (3%) y 90 (11%)	27
Figura 12. Periodos de Humedad: 204 días (1% superficie estatal), 180 (6%), 150 (12%), 120 (14%) y 90 (66%)	28
Figura 13. Unidades calor del estado de Nuevo León.....	29
Figura 14. Aptitud Agroclimática con el método GAEZ modificado para secano: A) Frijol, B) Maíz, C) Naranja, D) Papa, E) Sorgo y F) Trigo.....	30
Figura 15. Aptitud Agroclimática con el método GAEZ modificado bajo riego: A) Frijol, B) Maíz, C) Naranja, D) Papa, E) Sorgo y F) Trigo.....	32

Figura 16. Aptitud Agroclimática con el método ECOCROP (DIVA-GIS) en secano: A) Frijol, B) Maíz, C) Naranja, D) Papa, E) Sorgo y F) Trigo.....	34
Figura 17. Aptitud Agroclimática con el método ECOCROP (DIVA-GIS) bajo riego: A) Frijol, B) Maíz, C) Naranja, D) Papa, E) Sorgo y F) Trigo.....	36
Figura 18. Mapas climáticos del estado de Nuevo León: A) Tipo de Verano, B) Tipo de Invierno y C) Régimen Hídrico.....	38
Figura 19. Grupos y Subdivisiones climáticas de Papadakis (ANEXO)	39
Figura 20. Propiedades edáficas en Nuevo León: A) pH; B) Conductividad Eléctrica; C) Clases Texturales y D) Drenaje Interno.....	41
Figura 21. Aptitud Edáfica de los cultivos: A) Frijol, B) Maíz, C) Naranja, D) Papa, E) Sorgo y F) Trigo.....	42
Figura 22. Sitios de muestreo y localización de cultivos (ANEXO I)	43
Figura 23. Aptitud Edáfica de los cultivos corregida: A) Aptitud edáfica para los cinco cultivos de Frijol, Maíz, Naranja, Papa y Trigo, B) Aptitud edáfica del Sorgo.....	46
Figura 24. Aptitudes edafoclimáticas de las metodologías con mayor precisión; DIVA-GIS-R: A) Naranja, B) Sorgo y C) Trigo; GAEZ- R: D) Sorgo; DIVA-GIS-S: E) Frijol, F) Naranja y G) Trigo; GAEZ-S: H) Sorgo y I) Trigo.....	49

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Requerimientos climáticos de los cultivos.....	13
Cuadro 2. Requerimientos de unidades calor.....	13
Cuadro 3. Requerimiento Edáficos Óptimos.....	14
Cuadro 4. Rendimiento de los cultivos con base en su aptitud.....	44
Cuadro 5. Precisión Agroclimática para diferentes cultivos con la ZAE.....	45
Cuadro 6. Precisión de las metodologías para una Zonificación Agroecológica.....	48
Cuadro 7. Precisión del SIAP respecto a datos de campo.....	48

I. INTRODUCCIÓN

La autosuficiencia alimentaria es definida como “la satisfacción de los requerimientos alimenticios de un país desde su propia producción interna” (FAO, 1998). A nivel global se tuvo en el 2015 un total de 795 millones de personas subalimentadas, lo que equivale a una disminución del 23.3% al 12.9% en las regiones en desarrollo en su conjunto considerando los años de 1990 a 1992 (FAO *et al.*, 2009).

Sin embargo en México, a pesar de cumplir parcialmente las metas establecidas para el nuevo milenio (FAO *et al.*, 2009), sigue teniendo un total de 10.7 millones de personas que padecen de inseguridad alimentaria (Shamah *et al.*, 2017). Correspondiendo al estado de Nuevo León un 60% aproximadamente, con algún nivel de inseguridad alimentaria (Aguilar *et al.*, 2018). No obstante, tal situación se ha contrarrestado con el aumento de zonas agrícolas a nivel nacional con un equivalente entre 300,000 y 366,000 ha por año desde 1976 hasta 2007 con el efecto de ejercer mayor presión sobre los recursos naturales (Galeana *et al.*, 2018), siendo para el 2020 una superficie agrícola actual de 20.7 millones de hectáreas (SIAP, 2020b), en el caso de Nuevo León se tuvo para el año 2020 una superficie sembrada de 136 561 ha (SEDAGRO, 2021).

Este aumento constante de área agrícola lleva consigo un aumento en la presión de los recursos naturales, que contribuyen a la economía y ecología tanto local como nacional (Chang & Ying, 2005). Asimismo, la seguridad alimentaria está relacionada con la producción potencial de cultivos que es una de las principales metas de la zonificación de cultivos bajo diferentes escenarios que permitan tomar decisiones más racionales sobre el manejo y protección de las áreas agrícolas (Liu *et al.*, 2020).

La situación anterior generó la búsqueda de una solución que partió de la localización de las zonas con alta presión en la extracción de recursos surgiendo el término “agroecología” en los 60s como un movimiento de oposición a la industrialización agrícola, siendo más usado al considerar la relación de la agricultura, la sociedad y el espacio donde se ubican a partir de 1990s en E.U.A. y Latinoamérica principalmente (Wezel & Soldat, 2009).

Posteriormente, la FAO estableció la Zonificación Agroecológica (ZAE) para contrarrestar la excesiva presión en los recursos agrícolas y plantear nuevas perspectivas para la producción de alimentos con el afán de incentivar el aumento de producción por superficie para cubrir los requerimientos alimenticios de las generaciones futuras.

A su vez, se desarrollaron diferentes modelos con el mismo objetivo, no obstante una de las características necesarias para el estudio de los sistemas agrícolas, por su complejidad, es el uso de datos de campo con la limitante que en la mayoría de los casos no se hacen (Jones *et al.*, 2017). Además de no generar una metodología general para la comparación entre modelos de zonificación del potencial productivo de los cultivos (Akpoti *et al.*, 2019).

La falta de información y metodologías, para la comparación de ZAE y su uso a nivel estatal, por cultivo y por sistema productivo (secano o bajo riego) incentiva la generación de métodos que permitan determinar su confiabilidad y precisión de los mapas agroecológicos, para generar y demostrar una nueva perspectiva del potencial, que permita mejorar la toma de decisiones.

Por lo anterior, el presente estudio se centra en la generación de diferentes Zonificaciones Agroecológicas en el estado de Nuevo León y su evaluación entre los resultados de cada método contra los datos generados en campo para determinar la precisión en cada cultivo del estado y su nivel de aptitud respecto a las condiciones climáticas y edáficas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Zonificación Agroecológica (ZAE; GAEZ)

La información espacial sobre el rendimiento de los cultivos es valiosa tanto para su manejo (Lobell, 2013), como para la simulación de sus flujos nutrimentales, permitiendo maximizar el uso de los recursos naturales (agua y energía) que son piezas claves en la agricultura sostenible (Roy *et al.*, 2019). Por otra parte, el cambio climático tiene efectos que tienden a favorecer o perjudicar diferentes áreas que en su mayoría son sistemas de secano al depender intrínsecamente del clima (Gupta & Mishra, 2019).

Por ello, se han desarrollado metodologías que permiten la planeación y la toma de decisiones para el mejor uso de la tierra en beneficio del ser humano como fue la evaluación de tierras (FAO, 1976), la cual tuvo una adaptación para diferentes cultivos dividiendo un área en unidades más pequeñas con características similares de clima, suelo y nivel de inversión como el procedimiento de la Zonificación Agro-Ecológica (ZAE) de cultivos (FAO, 1978) inicialmente con el interés principal en la producción de secano.

La ZAE clasifica y delimita áreas en cuatro clases de aptitud de acuerdo con el porcentaje de sus rendimientos con respecto al máximo alcanzable para cultivos específicos, como sigue: Muy Apta (producción >80%), Apta (de 80% a 40%), marginalmente Apta (de 40% a 20%) y No Apta (< 20%) (Higgins & Kassam, 1981; Kassam, 1979). Esta metodología se considera que pertenece a los sistemas tradicionales (Akpoti *et al.*, 2019) del análisis de aptitud de tierras agrícolas (Prakash, 2003), por utilizar requerimientos biofísicos de los cultivos para el análisis de la información a través de métodos cualitativos (clases de aptitud) y cuantitativos (índices numéricos) (Akpoti *et al.*, 2019). Además, se considera como un esquema de zonificación por matrices al utilizar las variables climáticas y edáficas para delimitar áreas en clases o rangos con base en la opinión de un experto o en la distribución de los valores que representan (Van Wart, van Bussel, *et al.*, 2013).

Un ejemplo de la ZAE es en Asia en donde se generó para ocho países (Bangladesh, Malasia, Filipinas, Tailandia, Indonesia, China, Sri Lanka y Vietnam) de manera interdisciplinaria para determinar las zonas más aptas, el uso y planeación de la tierra, impactos del cambio climático y la vulnerabilidad ambiental, entre otros (FAO, 1994).

Siendo los mapas uno de los productos más notables en cuanto a la aptitud de cultivos a nivel mundial con el inconveniente de no ser producidos periódicamente con nuevas actualizaciones de mapas que permitan ver el comportamiento de la aptitud a través del tiempo (Peter et al., 2020).

En su versión más reciente, la ZAE fue modificada y se le denominó Zonificación Agroecológica Global (GAEZ, por sus siglas en inglés), que incluye la modalidad bajo riego, utiliza los Sistemas de Información Geográfico (SIG), la Percepción Remota (APR) (Dutta et al., 2020; Fischer & Sun, 2001; IIASA/FAO, 2012) y bases de datos climáticos desde 10 años de registro diario (Deng et al., 2019), 20 años (Van Wart, Kersebaum, et al., 2013) o 30 años (Fischer et al., 2000) para una zonificación más exacta y precisa en grandes extensiones territoriales.

Actualmente se utilizan modelos de simulación de cultivos para obtener los parámetros biofísicos de sitios específicos y se zonifica con datos locales para extrapolarlos a escalas más pequeñas (1:1 000 000 o 1:250 000) que permitan dar resultados más realistas (Tian et al., 2014). Sin embargo, el modelo GAEZ tiene limitaciones al ser de escala global (Akpoti et al., 2019), por tener una resolución robusta de 400 km² (20 km × 20 km) (Van Wart et al., 2013). Por otra parte, los paisajes con topografías más accidentadas representan mayor dificultad para obtener una predicción precisa de las aptitudes al poseer una gran variabilidad climática junto con la baja densidad de estaciones climáticas en zonas agrícolas lo que limita los estudios de escala regional o nacional (Van Wart et al., 2013).

En cuanto a la limitante del suelo, la variabilidad de los datos disponibles es también amplia al contar con información a escalas pequeñas y extrapolarlas a escalas más grandes (1:50 000 o 1:20 000) (Fischer et al., 2000). Además, la disponibilidad de agua en el suelo y las prácticas agrícolas son parte esencial para obtener resultados robustos, esos datos generalmente no están disponibles para la mayoría de los sistemas de cultivo con un adecuado detalle geoespacial, incluso en los países desarrollados (Van Ittersum et al., 2013).

Por otro lado, el uso de las unidades de suelos facilita la clasificación edáfica al tener de manera más homogénea las variables físicas y químicas del suelo (Aguilar et al., 2017), con el inconveniente de no tener mapas actualizados o con densidades de muestreo óptimas que permitan resultados veraces.

Con respecto a México, uno de los primeros estudios fue en condiciones de temporal, para maíz, frijol y sorgo en el cual se dividió al territorio nacional por temperatura o altitud, para conocer a sus divisiones climáticas, las cuales, junto con intervalos de duración de periodos de crecimiento, constituyen un inventario climático al cual se sobrepone un inventario edáfico integrado por las unidades de suelo, la pendiente y clases texturales dominantes (Ortíz, 1987).

Posteriormente, se diversificó el uso y la escala, al ser más detallada, la ZAE al utilizar índices diferentes a los establecidos originalmente como índices de sequía para predecir rendimientos de maíz en temporal con adaptaciones a la información edáfica (Ruiz, 1998). Otro caso, fue la generación de bases de datos para el ordenamiento ecológico con el fin de revertir la degradación de los recursos naturales, incluyendo datos de oscilaciones térmicas, unidades calor, horas frío, relación del año seco al año húmedo, e índice de estacionalidad, y los periodos de crecimiento para cultivos anuales y perennes (Díaz Hernández et al., 2000).

Un problema recurrente en nuestro medio ha sido la falta de datos, resolviéndolo con frecuencia, a través de procesos estadísticos con información de 10 años de antelación en cuestiones de temperatura (Jiménez Córdova et al., 2004). En caso contrario al contar con información suficiente, el modelo ZAE permite determinar los factores más limitantes del cultivo en la zona de estudio, como el suelo para el estado de Tabasco con el cultivo de yuca, ya que al considerarlo se degradó la clase muy apta a media en el 30% de su superficie (Rivera Hernández et al., 2012).

2.2 Zonificación con el método de Papadakis

El método de Papadakis es un sistema matricial el cual utiliza la precipitación y temperatura para calcular rangos de variables para cada estación del año, basados en los requerimientos de los cultivos (Van Wart, van Bussel, et al., 2013). Además, Reid et

al., (1976) indicó que este procedimiento cuenta con una clasificación climática que utiliza un mínimo de información disponible para el área de estudio y basada en las necesidades de las plantas que se desean introducir, con el único inconveniente de tomar en cuenta 189 condiciones especiales.

Al cumplir con los tipos de verano, tipos de invierno y el régimen hídrico se establecen los grupos climáticas y sus subdivisiones con las recomendaciones para los cultivos (Gomez Diaz, 1999; Papadakis, 1970). Coelho & Pinto (2019) determinaron las áreas aptas para cultivos bajo riego a escala regional con el uso de mapas de suelos combinándolos con el método de Papadakis. Por otra parte, los índices de humedad hacen un buen uso para determinar que meses se necesitaría el riego o si es apto para secano durante todo el año, lo que facilita la planeación de los recursos hídricos en una región en Irán (Moghtaderi & Khorramdel, 2014). Al igual que en la península de Malasia donde se determina los únicos meses secos (Enero a Abril) con sus grados de mayor a menor estrés (Adzemi & Rawayau, 2016).

Otro tipo de estudios son con base a características agromorfológicas en lentejas donde se determinan que las condiciones del microclima los comportamientos fenológicos son poco influyentes para la caracterización sino todo lo contrario para el rendimiento del cultivo donde afecta drásticamente (Lázaro et al., 2001). Además, se ha encontrado relaciones significativas en estudios de resistencia a enfermedades de la cebada donde los climas con mayor afectación son Subtropical Mediterráneo y Marítimo Mediterráneo (Silvar et al., 2010).

Además, recientemente se ha usado el método de Papadakis para futuros escenarios climáticos, al tener la bondad de coincidir la clasificación de los datos meteorológicos del año 2018 con los cultivos tradicionales entre un 90% (cítricos) y 100% (alfalfa, cebada y olivo), indicando aquellas áreas que serán desplazadas, que son las zonas más frías, y que por otra parte necesitaran riego al dejar de ser aptas para el secano (Montsant et al., 2021).

Por otra parte, en México, se han definido las zonas climáticas para la planeación de las necesidades hídricas de los cultivos al conocer las estaciones del año que tengan como

limitante a la disposición del agua en la mayor parte del ciclo productivo (Velasco & Pimentel, 2010). Además, en trabajos relacionados con la aptitud de pastos se han eliminado a los periodos de crecimiento por ser semipermanente o perennes lo que disminuye a las variables climáticas a temperatura mensual y precipitación anual (Vázquez González & González Mancillas, 2017). Asimismo, la determinación de idoneidad para cultivos tiene limitantes en regiones con una gama alta de diversidad de cultivos al solo poseer un listado de recomendaciones para ciertos grupos de cultivos que sirven más como indicadores para cultivos semejantes (Mendoza Cariño et al., 2021).

2.3 Zonificación con el método ECOCROP (DIVA-GIS)

El programa DIVA-GIS fue concebido originalmente para el análisis de datos de bancos de genes y hallar patrones genéticos, ecológicos y geográficos de distribución de especies tanto silvestres como cultivadas, con la facilidad de no necesitar un amplio conocimiento en el uso de los Sistemas de Información Geográfica, junto con la herramienta para extraer datos climáticos de los sitios de interés (Hijmans et al., 2001). Además, la resolución de los datos climáticos fue de 1 km² al interpolar información de 9 000 a 60 000 estaciones climatológicas del periodo 1970 al 2000, e información satelital con correlaciones ≥ 0.99 para la temperatura y 0.86 en precipitación (Fick & Hijmans, 2017; Hijmans et al., 2005).

Los periodos de crecimiento son definidos entre el inicio del crecimiento de la planta y su fin, con esa idea se generan 12 posibles estaciones de crecimiento con el inicio de cada mes, siendo la aptitud evaluada para el conjunto de meses que cubran el periodo de crecimiento del cultivo (Hijmans et al., 2012).

Sin embargo, ECOCROP tiene limitantes como son los parámetros biofísicos de los cultivos desactualizados, no considera a las variedades de cultivos y la subestimación de la aptitud para cultivos de ciclos largos (Manners et al., 2021), no toman en cuenta las condiciones del suelo o los eventos climatológicos como sequías o inundaciones, pero a pesar de los inconvenientes tiene la flexibilidad de agregar procesos de distintas áreas (Ramírez et al., 2013).

No obstante, sigue siendo uno de los modelos utilizados para la simulación de manera robusta de cultivos a nivel global o regional al cumplir con facilidades de obtención, de manejo y cambios en la parametrización de los cultivos para adaptarse a las condiciones que uno investiga (Manners & van Etten, 2018).

En México el mayor uso se tiene para la distribución de nichos ecológicos de plantas silvestres (Palacios et al., 2017) o determinar la biodiversidad de ecosistemas (Santillán et al., 2021). El cual da resultados favorables, dando la posibilidad de aplicación en cultivos agrícolas como con el cacahuete, la papa y el capuí (Jarvis et al., 2008); girasol, vino y romero (Gardner et al., 2021); o legumbres y pseudocereales (Manners et al., 2020).

2.4 Comentarios finales

La flexibilidad del concepto de la ZAE es dada a través del tiempo al tener más y mejores bases de datos, implementar interpolaciones y algoritmos para la interpretación de datos, el uso y agregación de mapas a diferentes escalas que mejor se adapten para dar el mejor resultado posible (Wood & Pardey, 1998). Sin embargo, la validación de los modelos y/o resultados de zonificaciones para determinar las aptitudes no están definidos, siendo el método más usado la correlación entre la productividad del cultivo con la clase de aptitud (Akpoti et al., 2019).

Por ello, es necesario comparar aquellas metodologías que se adapten a la situación que siempre ha prevalecido en México, que es la falta de datos tanto en campo como en teórico, y seleccionar las que den los resultados más veraces comparándolas con información recolectada en campo para los cultivos de interés.

Esto reduce la brecha en el conocimiento para determinar la aptitud de cultivos y permite generar y responder preguntas como: ¿Cuál es el mejor método para cada cultivo?, ¿Cuál método necesita el mínimo de datos?, ¿Cuándo debo sembrar esos cultivos para obtener la máxima cosecha?, ¿Qué tipo de nivel de inversión se debe aplicar?, ¿Es posible generar nuevas bases de datos climáticos y edáficos para aplicar íntegramente una metodología?, y de ser así, ¿Cuáles datos son los principales limitantes?.

Con los resultados obtenidos se ejemplificará para un estado con la posibilidad de extrapolar la metodología que más se acopló a otras partes del país, además de comparar la información empleada en otros trabajos en el país.

III. OBJETIVOS E HIPOTESIS

3.1 Objetivo general

El objetivo general de la presente investigación consistió en:

Determinar la aptitud climática y edáfica de 13 cultivos en Nuevo León a través de la comparación de distintas metodologías con los principios de la zonificación agroecológica (ZAE), evaluando los resultados con información colectada directamente en campo.

3.2 Objetivos específicos

Para lograr lo anterior se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Predecir la aptitud agroclimática y edáfica para la modalidad de temporal y riego.
2. Estimar los rendimientos para las clases de aptitud con relación a los factores clima y suelo.
3. Comprobar la calidad de información de los mapas de suelos de INEGI con datos de muestras de campo.
4. Contrastar las metodologías con los datos iniciales necesarios para obtener resultados.
5. Pronosticar el rendimiento máximo alcanzable para los cultivos.
6. Verificar los periodos de crecimiento, los periodos libres de heladas y las zonas donde se necesita irrigación con información de campo.
7. Corroborar la información del SIAP y los resultados con datos de campo para comprobar la certeza de los resultados.

3.3 Hipótesis general

A pesar de la escasez de datos climáticos y edáficos es posible generar información y demostrar que la aplicación de los principios de la metodología de la ZAE (GAEZ) tiene mayor validez por ser más detallada la información necesaria para su aplicación.

3.4 Hipótesis específicas

1. La aptitud agroclimática es la principal limitante para la agricultura de temporal y la edafológica para la de riego.
2. La ubicación del estado en una zona de transición climática y fisiográfica afecta a los rendimientos de los cultivos.
3. Las bases de datos de perfiles de suelo del INEGI son similares a los obtenidos en muestras de campo.
4. La metodología más precisa es aquella que tiene mayor semejanza con la información de campo y que usa la menor cantidad de datos.
5. La información de campo y del SIAP sirven para estimar el máximo rendimiento de los cultivos.
6. Los periodos de crecimiento y libres de heladas estimados coinciden con los datos recabados de campo y las zonas con necesidades de irrigación son estimables con la metodología de zonificación.
7. La información presentada por el SIAP de rendimiento a nivel municipal y estatal tienen equivalencias con la información de campo.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción general del estado de Nuevo León

El estado de Nuevo León se ubica entre las coordenadas geográficas 98°26'24" y 101°13'55" de longitud oeste y los 23°10'27" y 27°46'06" de latitud norte, con un área de 63,559 km², distribuido en 51 municipios (ANEXO), del total solo un 5 % de su superficie

corresponde a un uso agrícola tanto para cultivos cíclicos como perennes(SIAP, 2020b). Por otra parte, la actividad agrícola representa el 49.2% de las actividades primarias del estado con cinco municipios principales por valor de la producción como: Galeana, General Terán, Cadereyta Jiménez, Aramberri y Montemorelos (\$1795, \$732, \$605, \$530 y \$460 millones de pesos respectivamente) (SIAP, 2020a).

De acuerdo con el INEGI (2021) el estado está cubierto por tres provincias fisiográficas: la Gran Llanura Norteamericana (Norte y Noreste del estado), la Llanura del Golfo (Centro y Sureste) y la Sierra Madre Oriental (Noroeste, Centro y Sur del estado) (Figura 1). Con altitudes que oscilan desde los 70 msnm hasta los 3700 msnm.

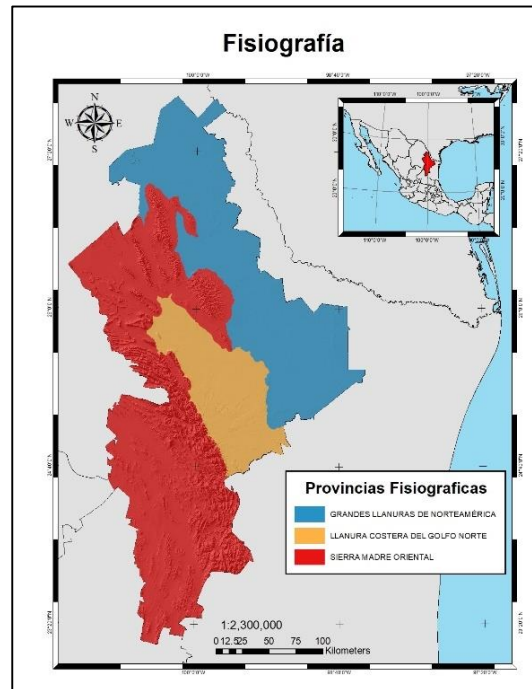


Figura 1. Provincias Fisiográficas del estado de Nuevo León.

4.2 Climatología

Las temperaturas varían drásticamente con el cambio de estación al encontrarse en una zona en donde las oscilaciones del viento del sureste de los Estados Unidos (Cavazos, 1994), junto con la fisiografía local (Cavazos, 1997). Además, se tiene influencia de fenómenos como el Niño, las oscilaciones del Atlántico entre otros que afectan a la temperatura y evaporación dentro del estado (Herrera et al., 2007).

Las temperaturas promedio oscilan entre 20°C a 24°C en las zonas citrícolas con precipitaciones de 600 a 900 mm (Maciel et al., 2020), con excepciones de 45°C en el verano (González et al., 2014), hasta temperaturas promedio anuales de 17°C en las zonas montañosas (Constante et al., 2021).

Como se mencionó anteriormente, el relieve topográfico que origina la fisiografía del estado da una variedad de climas desde semicálido, templado, semiárido, árido, muy árido y semifrío con base a clasificación de Köppen modificada por García (SIAP, 2020a).

4.3 Selección de cultivos

La selección de los cultivos más importantes para el estado de Nuevo León fue con base en el trabajo de Monfreda et al., (2008) al utilizar la superficie de siembra, en este caso para el año 2019, con un límite mínimo de 10000 ha, siendo 13 cultivos con información proporcionada por el SIAP (2019): alfalfa, frijol, maíz de grano, mandarina, naranja, nuez, pasto bermuda, pasto buffel, pasto maralfalfa, pasto ryegrass, sorgo de grano y trigo de grano.

4.4 Requerimientos de los cultivos en ECOCROP

Los rendimientos máximos por superficie para diferentes cultivos están condicionados por sus necesidades climáticas y edáficas, las cuales se generan con base en trabajos experimentales y la acumulación de estos generan la opinión de expertos para determinar las condiciones óptimas para su desarrollo. Una de estas bases es ECOCROP de la FAO la cual cuenta con 1710 especies de plantas con sus requerimientos en una base de datos de manera general (Sikder, 2009) (Cuadros 1, 2 y 3).

Cuadro 1. Requerimientos climáticos de los cultivos.

Cultivo	Nombre Científico	Temp. Min. Opt. (°C)	Temp. Max. Opt. (°C)	Pre. Min. Opt. (mm)	Pre. Max. Opt. (mm)
Maíz de Grano	Zea mays ssp. mays	18	33	600	1200
Naranja	Citrus sinensis	20	30	1200	2000
Trigo de Grano	Triticum aestivum	15	23	750	900
Sorgo de Grano	Sorghum bicolor	22	35	400	600
Nuez	Juglans regia	15	30	800	1700
Mandarina	Citrus reticulata	23	34	1200	1800
Frijol	Phaseolus vulgaris	16	25	500	2000
Papa	Solanum tuberosum	15	25	500	800
Alfalfa	Medicago sativa	21	27	600	1200
Pasto Bermuda	Cynodon dactylon	17	35	625	1750
Pasto Buffel	Cenchrus ciliaris	22	37	400	1000
Pasto Marafalfa	Pennisetum purpureum	21	40	1500	2500
Pasto Ryegrass	Lolium multiflorum	14	30	500	900

Nota: Temp. Es abreviación de temperatura; min. Es abreviación de mínima; max. es abreviación de máxima; opt. Es abreviación de optima y pre. Es abreviación de precipitación.

Cuadro 2. Requerimientos de unidades calor.

Cultivo	Unidades Calor Min. Opt.	Unidades Calor Max. Opt.
Maíz de Grano	2400	4125
Naranja	5500	9200
Trigo de Grano	1625	2250
Sorgo de Grano	2350	3900
Nuez	5500	9200
Mandarina	1800	2600
Frijol	2100	2800
Papa	3125	8213
Alfalfa	1050	11863
Pasto Bermuda	1050	11863
Pasto Buffel	1050	11863

Continuación

Pasto Marafalfa	838	9125
Pasto Ryegrass	2400	4125

Nota: La temperatura base de cada cultivo no se reporta en ECOCROP.

Cuadro 3. Requerimiento Edáficos Óptimos.

Cultivo	pH min.	pH max.	Textura	C.E. dS m ⁻¹	Drenaje Interno
Frijol	6 (4)	8 (9)	Media (Fina)	<4	Bien drenado
Maíz	5	7 (9)	Media (Fina)	<4 (10)	Bien drenado (excesivamente drenado a moderado)
Naranja	5 (4)	6 (8)	Media (Fina)	<4	Bien drenado
Papa	5 (4)	6 (9)	Media (Fina)	<4	Bien drenado (excesivamente drenado a moderado)
Sorgo	6 (5)	8	Media y Fina	<4 (10)	Bien drenado (excesivamente drenado a moderado)
Trigo	6	7 (9)	Media (Fina)	<4 (10)	Bien drenado

Nota: Los atributos dentro de los paréntesis indican el requerimiento absoluto permisible.

4.5 Aptitud del cultivo

Para establecer la aptitud del cultivo se utilizó un proceso similar a lo estipulado por Higgins & Kassam (1981) pero modificado a solo tres categorías: Muy Apta (producción >80% del máximo), Apta (de 80% a 40%), y marginalmente Apta (de 40% a 0%).

4.6 Selección y localización de las estaciones climatológicas

Para seleccionar a las estaciones climatológicas se utilizó la información de las normales de 1981-2010 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que cumplieran con los siguientes requisitos:

1. Tener datos de un periodo mínimo de 20 años.
2. Estar actualmente operando.
3. Contar con 69% de los datos completos.

4.7 Cartografía de las variables climáticas

Dado que en estudios previos en el estado se ha recomendado el uso de kriging ordinario para determinar la precipitación con estaciones con registros de 25 años teniendo gran precisión y exactitud al coincidir con trabajos previos de las zonas más lluviosas que pertenecen a la zona citrícola (Villareal Maces & Díaz Viera, 2018), Además, para la temperatura se usó la ponderación de distancia inversa (IDW por sus siglas en inglés) al tener resultados más significativos en trabajos previos (Chai et al., 2011; Kurtzman & Kadmon, 1999), en este estudio se decidió también emplearlo.

4.8 Propiedades edáficas

En México no se cuenta con mapas a nivel nacional de las propiedades del suelo la cual sería muy útil para el estudio en otros campos como la agricultura o el ambiente (Cruz et al., 2014). Además, la información de los mapas comúnmente es desactualizada y subjetiva, siendo objeto de conflicto en el análisis y generación de mapas con técnicas geoestadísticas al obtener por parte del modelador de percepciones cualitativas con información incierta o imprecisa (McBratney et al., 2000). Por consiguiente, los mapas disponibles presentan una exactitud y precisión bajas, 0% y 8%, respectivamente (Lleverino González et al., 2000).

Por otra parte, las técnicas geoestadísticas son eficaces y precisas para predecir la variabilidad espacial de las propiedades edáficas en extensas regiones (Campos et al., 2021; Shahriari et al., 2019). Con la limitante del tamaño de muestreo y su variación entre

la distancia de las muestras que determinan la precisión de la variable estimada (Oliver & Webster, 2015).

4.9 Selección de los sitios de perfiles de suelos

Para la interpolación de las propiedades físicas y químicas se utilizó la información de los Perfiles de Suelos del INEGI con 114 puntos con una profundidad máxima de 30 cm para las variables de conductividad eléctrica (CE, dS m^{-1}), pH, drenaje interno y clase textural. Estos parámetros edáficos se seleccionaron con base a los requerimientos agronómicos de los cultivos estudiados presentados en la base de datos ECOCROP para delimitar la aptitud del suelo (Figura 2).

4.10 Interpolación de propiedades edáficas

Para la generación de mapas de las variables físicas y químicas en el estado se utilizó Kriging Ordinario al tener la mayor precisión para la textura (Zebec & Plaš, 2020), el pH (FU et al., 2020), conductividad eléctrica (de Assis Silva et al., 2021) y drenaje interno.

En cualquier caso, la corroboración de los mapas interpolados tendrá que ser comprobada con muestreo en campo para confirmar su de precisión y considerarlos como mapas de alta fiabilidad (Henríquez et al., 2013).

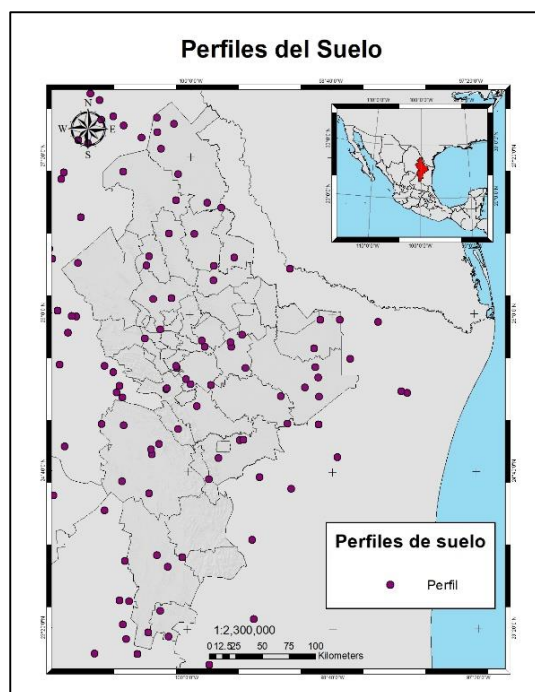


Figura 2. Ubicación de los perfiles de suelo.

4.11 Zonificación agroecológica (GAEZ modificado)

El modelo de GAEZ consta de 7 módulos originalmente los cuales describen las fórmulas para obtener cada una de las variables con sus requerimientos de información necesarios (IIASA/FAO, 2012), por el contrario, el presente estudio se utilizaron parcialmente los módulos del 1 al 5 por no disponer de la información necesaria para aplicar el procedimiento en su forma original (Figura 3).

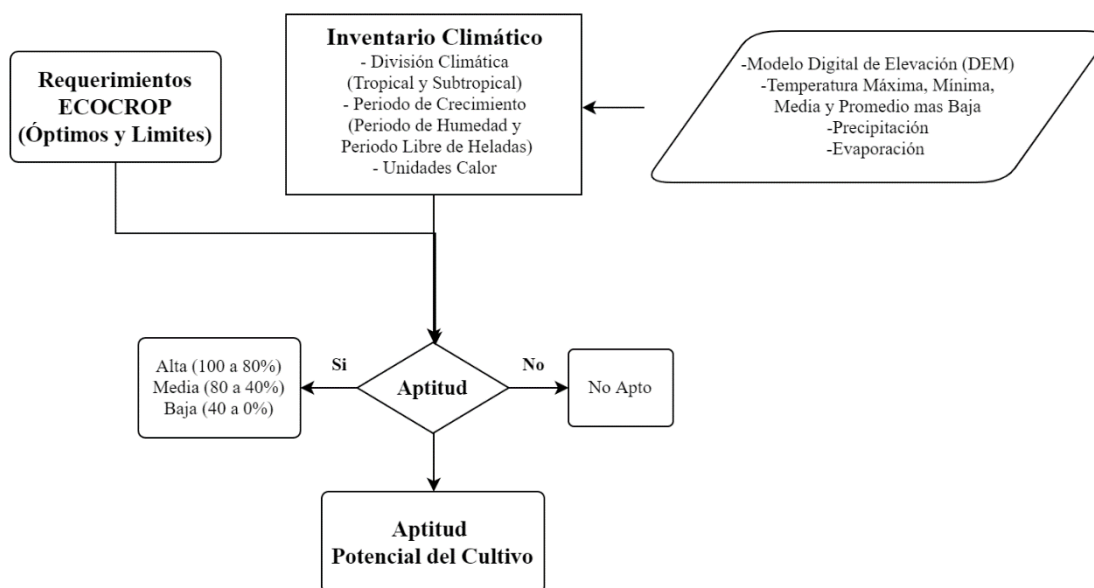


Figura 3. Procedimiento para la aptitud por método GAEZ modificado.

4.11.1 Inventario climático

El inventario climático se basa en las variables que determinan la aptitud del cultivo, iniciando con la división climática ya que al tener diferentes tipos de climas se generan condiciones y periodos de crecimiento (P.C.) con diferentes duraciones, pudiendo ser largos, intermedios o cortos. Además de utilizar la elevación para generar un mapa de tierras altas (o valles altos) y bajas con el criterio de 1500 msnm, siendo aquellas tierras mayores a 1500 msnm tierras altas y su contraparte, las bajas.

El periodo de crecimiento como fue mencionado en un principio es el tiempo, en días, que tienen condiciones mínimas que permiten el desarrollo de las plantas, que en este caso se dividen para dos modalidades: seco y riego, siendo los periodos de humedad y libres de heladas para analizar a la agricultura de seco (GAEZ-S). Por otra parte, cuando el cultivo está bajo riego (GAEZ-R) se considera solo el periodo libre de heladas al asumir hipotéticamente que el recurso hídrico siempre está presente y por ello, los cultivos están condicionados solo por la temperatura. Asimismo, se optó por utilizar un mínimo de 90 días consecutivos como P.C. mínimo ya que permite utilizar variedades de ciclo corto para cada uno de los cultivos anuales.

El método en ambos casos para determinar el día de inicio y fin de cada ciclo se basó en el trabajo de Pájaro & Ortiz (1992) en el cual se detalla el procedimiento de interpolación lineal entre dos puntos para determinar el día en el que comienza el periodo de humedad o libre de heladas y en el otro extremo el fin del periodo de crecimiento.

Otro dato necesario son las unidades calor las cuales se obtuvieron a nivel mensual al multiplicar el número de días por la temperatura media, al no contar con información a nivel diario, con una temperatura base de 0°C para cada cultivo, similar al conocido como método directo (Ortíz, 1987).

4.12 Zonificación con el método DIVA-GIS (ECOCROP)

La metodología de DIVA-GIS emplea únicamente dos requerimientos climáticos (Temperatura y Precipitación) de ECOCROP al ser un programa basado en información de la FAO con la diferencia de contar con bases de datos climáticos a una resolución de 1 km por 1 km lo que genera mayor detalle de los mapas.

Paralelamente, la clasificación de aptitud se crea al utilizar la aptitud consecutiva de cada mes utilizando el mayor número de meses que cumplan con el ciclo del cultivo y la aptitud más alta (Hijmans et al., 2012). Cabe resaltar que para las modalidades de producción se utilizó la precipitación y temperatura en secano (DIVA-GIS-S) y solamente la temperatura para cultivos en riego (DIVA-GIS-R) (Figura 4).

4.13 Zonificación con el método de PAPADAKIS

La metodología de Papadakis se basa en su clasificación generando los tipos de verano, invierno y régimen hídrico para recomendar que cultivos son los que mejor se producirían en la zona. La metodología se especifica en el trabajo de Ortiz (2015) con los requerimientos para cada una de las variables climáticas, así como algunas recomendaciones para completar la información requerida en la zonificación.

El tipo de verano es definido por el periodo libre de heladas mínimo y disponible, las temperaturas máximas, de los seis meses más calientes y de los cuatro meses más calientes.

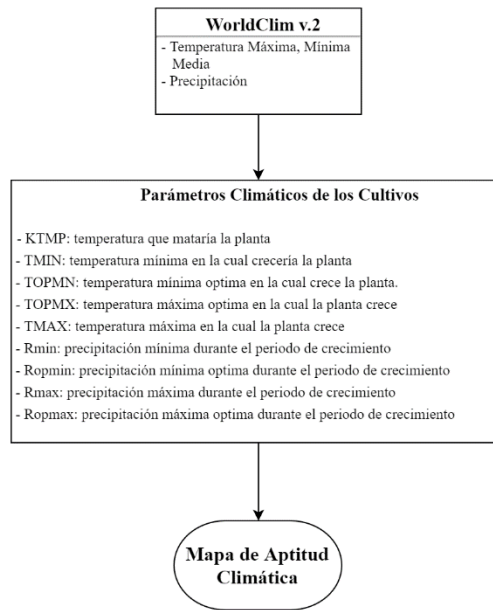


Figura 4. Bases de datos y variables climáticas para la aptitud por DIVA-GIS.

Además, el tipo de invierno se determina con el mes más frío del año seleccionado mediante la temperatura media mensual y para él se obtiene la temperatura promedio más baja, la temperatura mínima y la temperatura máxima.

El régimen hídrico se genera a través de un balance de humedad, indicando si es necesario riego en las interpretaciones posteriores o la producción puede lograrse bajo condiciones de secano. Se utilizan varios índices como el índice de Humedad Anual (IHA) y mensuales (IHm), los meses no húmedos, La estación anual más lluviosa, la Lluvia de lixiviación (Ln), y la temperatura máxima para el régimen desértico (Figura 5).

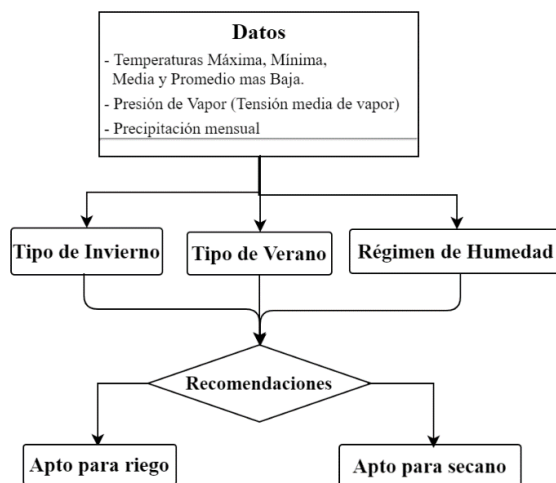


Figura 5. Procedimiento para la zonificación de Papadakis.

4.14 Aptitud edafoclimática de cultivos

Una vez obtenidos los mapas de las tres metodologías climáticas y los de las aptitudes con las variables edáficas se utilizará el álgebra de mapas para generar el mapa final de la aptitud de los cultivos distribuidos en cada municipio del estado (Figura 6).

Estos mapas serán corroborados con un muestreo en campo realizado en 11 municipios del estado: Allende, Anáhuac, Aramberri, Bustamante, Cadereyta Jiménez, Dr. Arroyo, Galeana, Gral. Terán, Lampazos del Naranjo, Linares y Montemorelos.

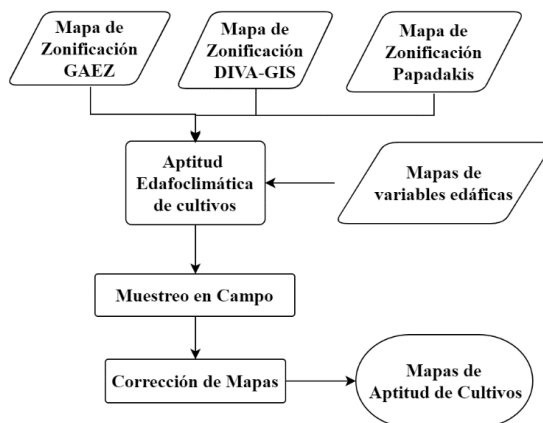


Figura 6. Procedimiento para la aptitud de cultivos.

Después de la etapa de muestreo se realizarán en laboratorio determinaciones analíticas que siguen la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002).

Al obtener los datos se corrigen los mapas al eliminar aquellas variables que tuvieron mayor discrepancia con relación a los mapas previos para determinar el mapa de aptitud de cultivos.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Estaciones climatológicas

En el caso de Nuevo León al aplicar los parámetros de selección para las estaciones se eliminaron 43 de 103 generando un total de 60 estaciones tanto dentro como fuera del estado (Figura 7).

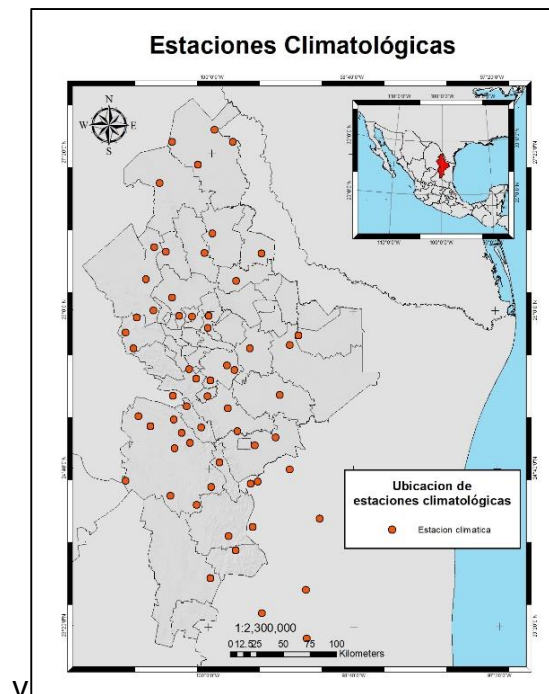


Figura 7. Localización de las estaciones climatológicas.

5.2 Climatología

La precipitación coincide con lo reportado por Villareal & Díaz (2018) al predecir las mayores concentraciones de precipitación en la zona citrícola y en menor medida en el noroeste y suroeste (Figura 8). Por otra parte, la temperatura promedio anual oscila entre 14°C y 23°C, con temperaturas promedio máximas de 26°C y mínimas promedio de 10°C con una temperatura promedio más baja de 5°C. Los cambios de temperatura se comportan de manera extrema al tener temperaturas inferiores a las temperaturas mínimas optimas de los cultivos lo que ocasiona un descenso en su aptitud (Figura 8).

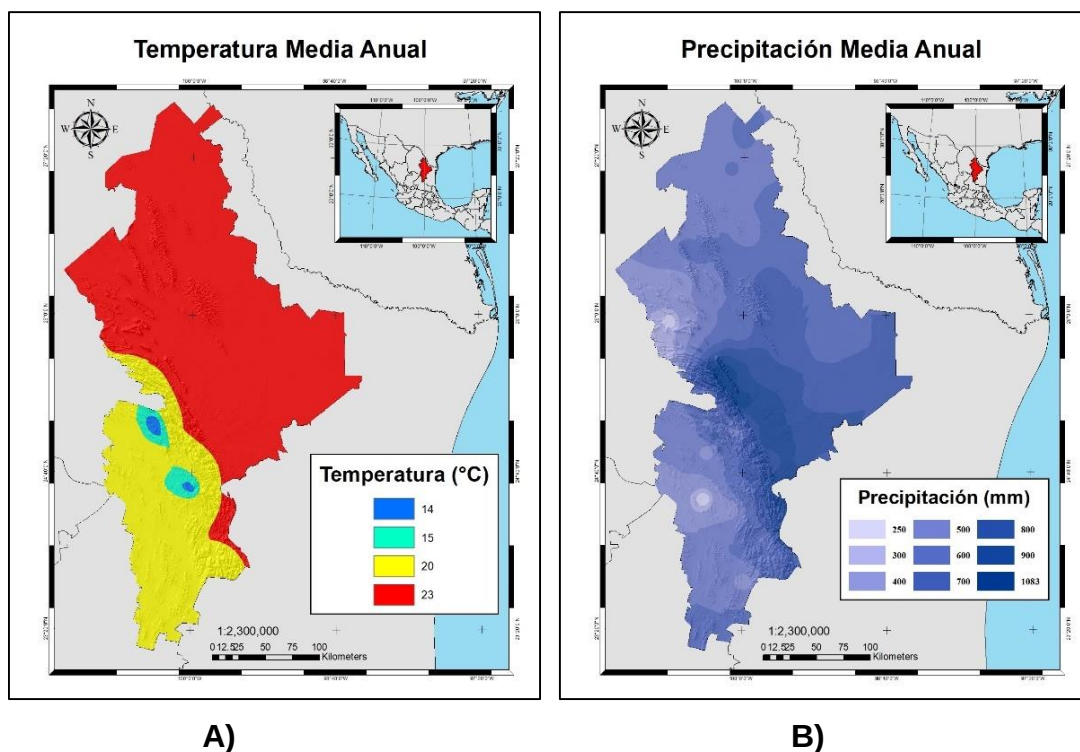


Figura 8. Variación espacial de la temperatura promedio (A) y precipitación media (B) anual respectivamente para el estado de Nuevo León.

5.3 Propiedades edáficas

Las propiedades edáficas se basan en los lineamientos de la FAO (2009) y el diccionario de datos edafológicos del INEGI (2020), correspondiendo para la C.E. una dominancia secuencial de ligeramente salino, no salino, moderadamente salino y fuertemente salino (57%, 40%, 4% y 0.05% de la superficie estatal, respectivamente). En cuanto al pH se

obtuvo una dominancia de alcalino, posteriormente neutro, y después de ligeramente a moderadamente ácido en un 78%, 22% y 0.1% del área, respectivamente. El drenaje interno es moderado en un 65% de la superficie estatal, escasamente drenado en un 32%, drenado en el 2% y 0.3% escasamente drenado, de manera aislada en el centro del estado. Por último, la clase textural que prevalece en un 54% del estado es la media y con un 46% la textura fina (Figura 9).

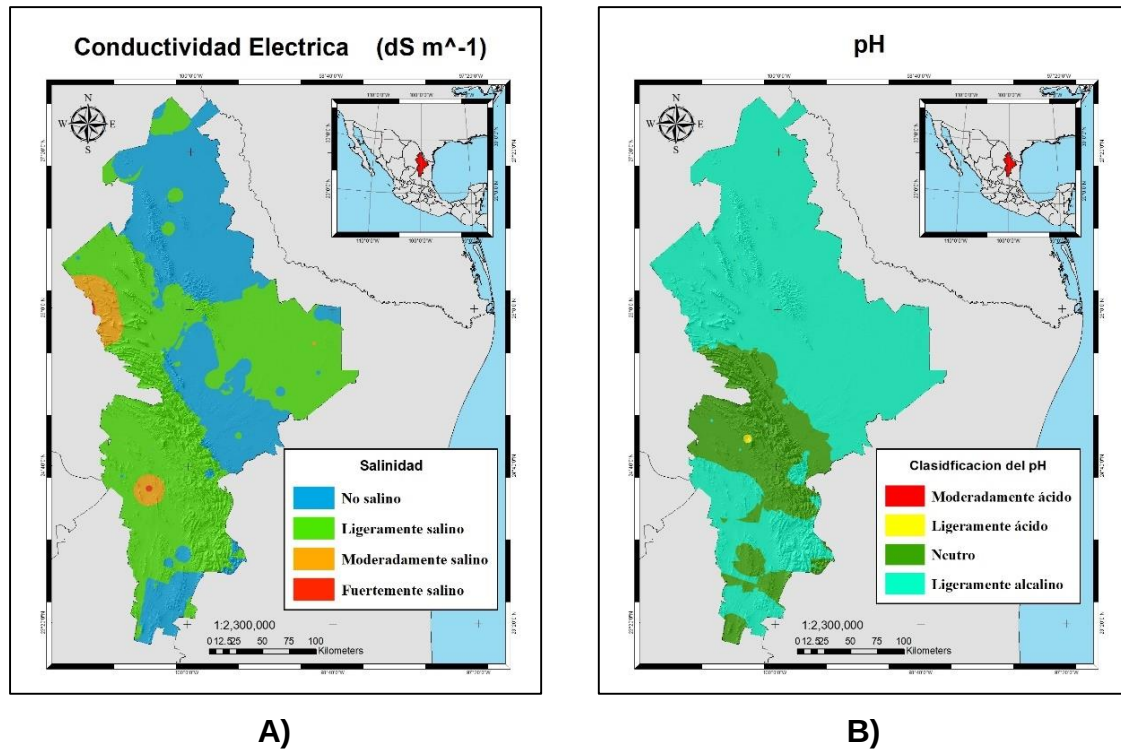


Figura 9. Propiedades edáficas de Nuevo León: A) mapa de C.E.; B) mapa de pH.

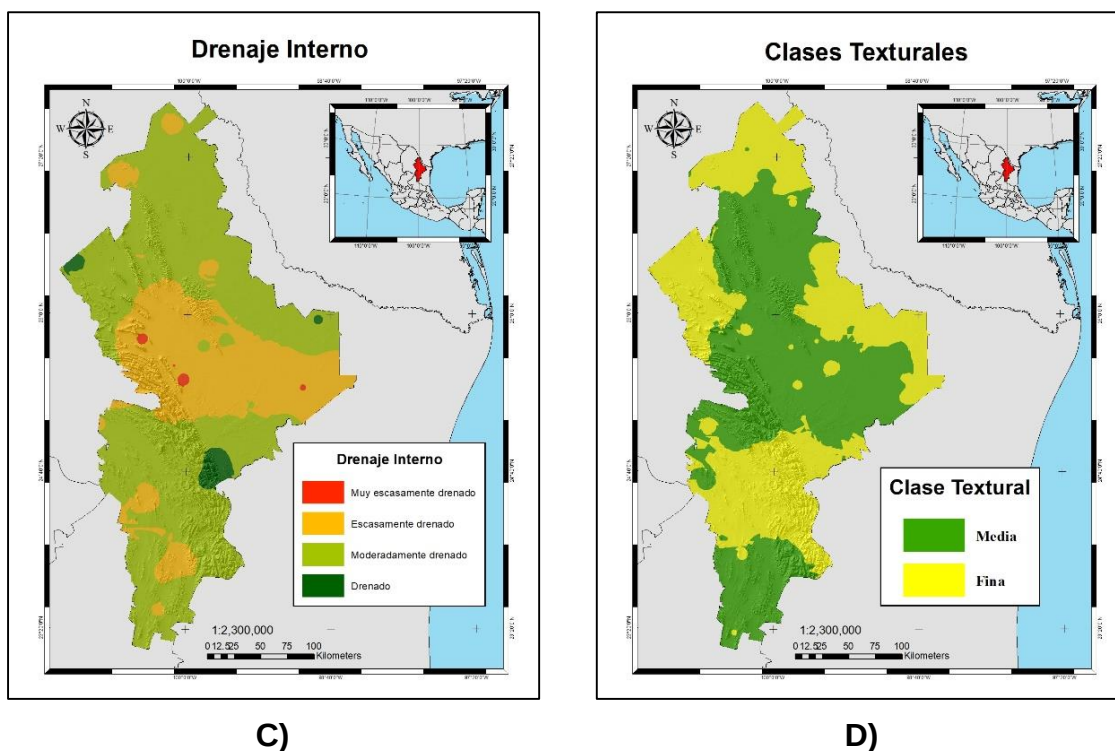


Figura 9. Propiedades edáficas de Nuevo León: C) mapa de drenaje interno; D) mapa de clases texturales (continuación).

5.4 Zonificación agroecológica (GAEZ modificado)

5.4.1 División y subdivisión climática

La división climática del estado corresponde en su mayoría al clima subtropical (70% del área estatal) y en menor medida el clima tropical (30%), siendo la principal fuerza climática que genera un parteaguas entre ambas divisiones la topografía ocasionada por la Sierra Madre Oriental. Al usar la altitud como subdivisión se obtuvo como clima caliente en un 72% de la zona, 27% pertenece a templado y 0.2% a un clima frío (Figura 10).

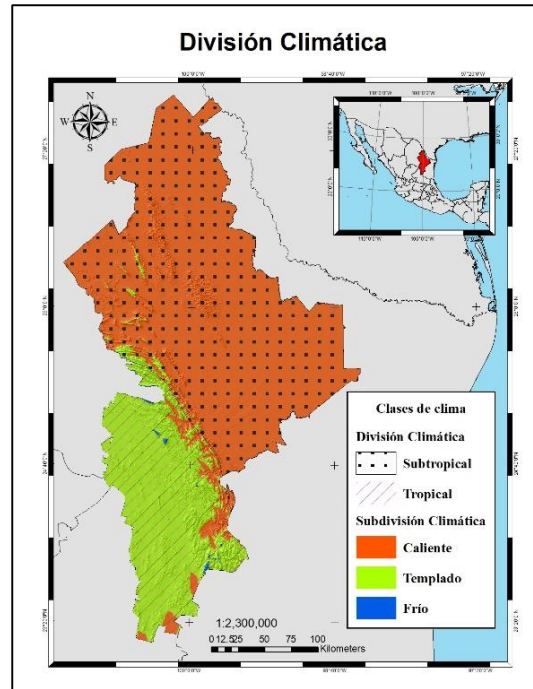


Figura 10. Mapa de divisiones y subdivisiones climáticas (ANEXO I).

5.4.2 Periodos de crecimiento y unidades calor

En cuanto a los P.C. se generaron dos mapas uno para seco y otro para riego, en el caso de los cultivos bajo riego se usó el mapa de periodos libres de heladas para determinar el periodo de crecimiento de los cultivos con un plazo máximo de 284 días y abarcando una superficie del 40% del estado (Figura 11).

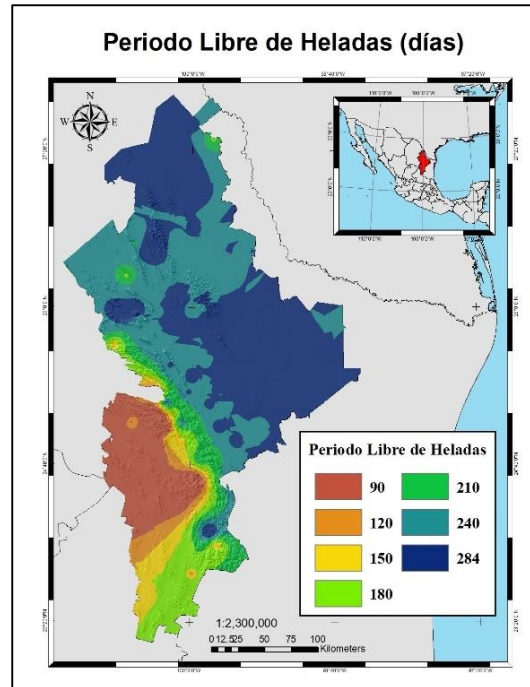


Figura 11. Periodos libres de helada: 284 días (40% superficie estatal), 240 (29%), 210 (6%), 180 (8%), 150 (4%), 120 (3%) y 90 (11%).

Para los P.C. de secano tienen mayor importancia los periodos con humedad disponible junto con la temperatura, por ello, se obtuvo con mayor superficie el periodo mínimo de 90 días en un 66% del área estatal y como máximo de 204 días en el 1% del estado (Figura 12).

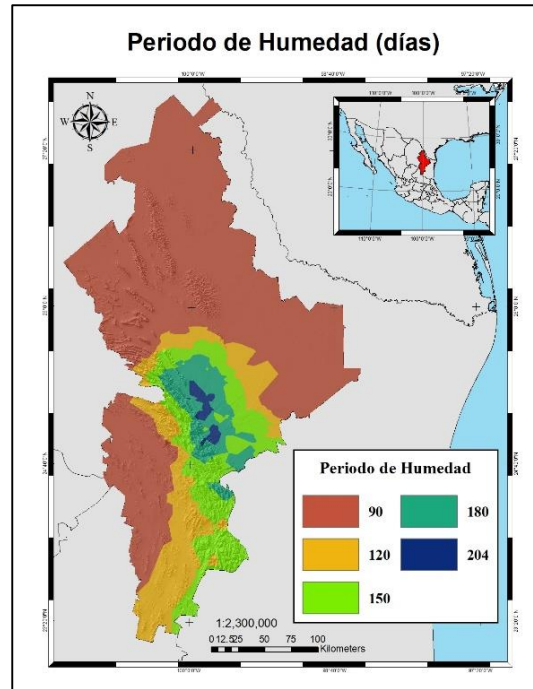


Figura 12. Periodos de Humedad: 204 días (1% superficie estatal), 180 (6%), 150 (12%), 120 (14%) y 90 (66%).

En cuanto a las unidades calor (U.C.) de 7000 a 8444 grados acumulados abarca un 72% del norte y centro del estado, consecutivamente se tienen de 6000 a 7000 en un 15% de la superficie y en el 13% restante de 5150 a 6000 localizado principalmente en el suroeste, que se considera las zonas más frías en Nuevo León (Figura 13).

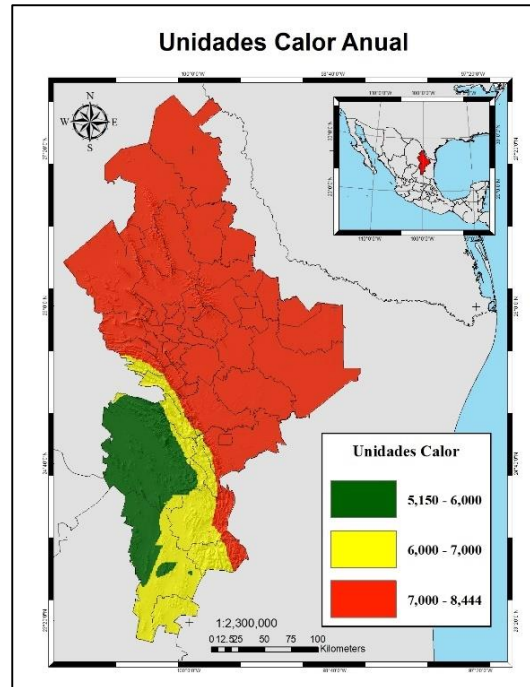


Figura 13. Unidades calor del estado de Nuevo León.

5.5 Cultivos seleccionados

Al comparar los resultados de campo se encontró 75 sitios diferentes, participaron 48 productores y solo 10 de los 13 cultivos propuestos para su estudio, sin embargo, de estos 10 solo 6 se reportaron en un mínimo de tres sitios, resultando en el estudio que al considerar una mayor variabilidad y poder comparar más de dos lugares, los cultivos importantes fueron: frijol, maíz, naranja, papa, sorgo y trigo.

5.6 Zonificación con el método GAEZ

Una vez generado los datos climáticos se utiliza el álgebra de mapas de cada variable climática para ambas modalidades y se obtiene la aptitud agroclimática de los cultivos que en la modalidad de secano el frijol, papa y sorgo obtienen zonas muy aptas en el estado (5%, 1% y 7% de la superficie estatal, respectivamente), por otra parte, el cultivo de maíz, naranja y trigo se tienen zonas Aptas como predominantes (7%, 1% y 19% del estado, respectivamente) con un hecho particular para el cultivo de la naranja al presentar la menor superficie relacionada en la zona más lluviosa en el estado. Además, coinciden para los seis cultivos la ubicación del centro y centro-sur del estado las zonas

con humedad mínima para su crecimiento, lo que resulta en las zonas más lluviosas del estado (Figura 14).

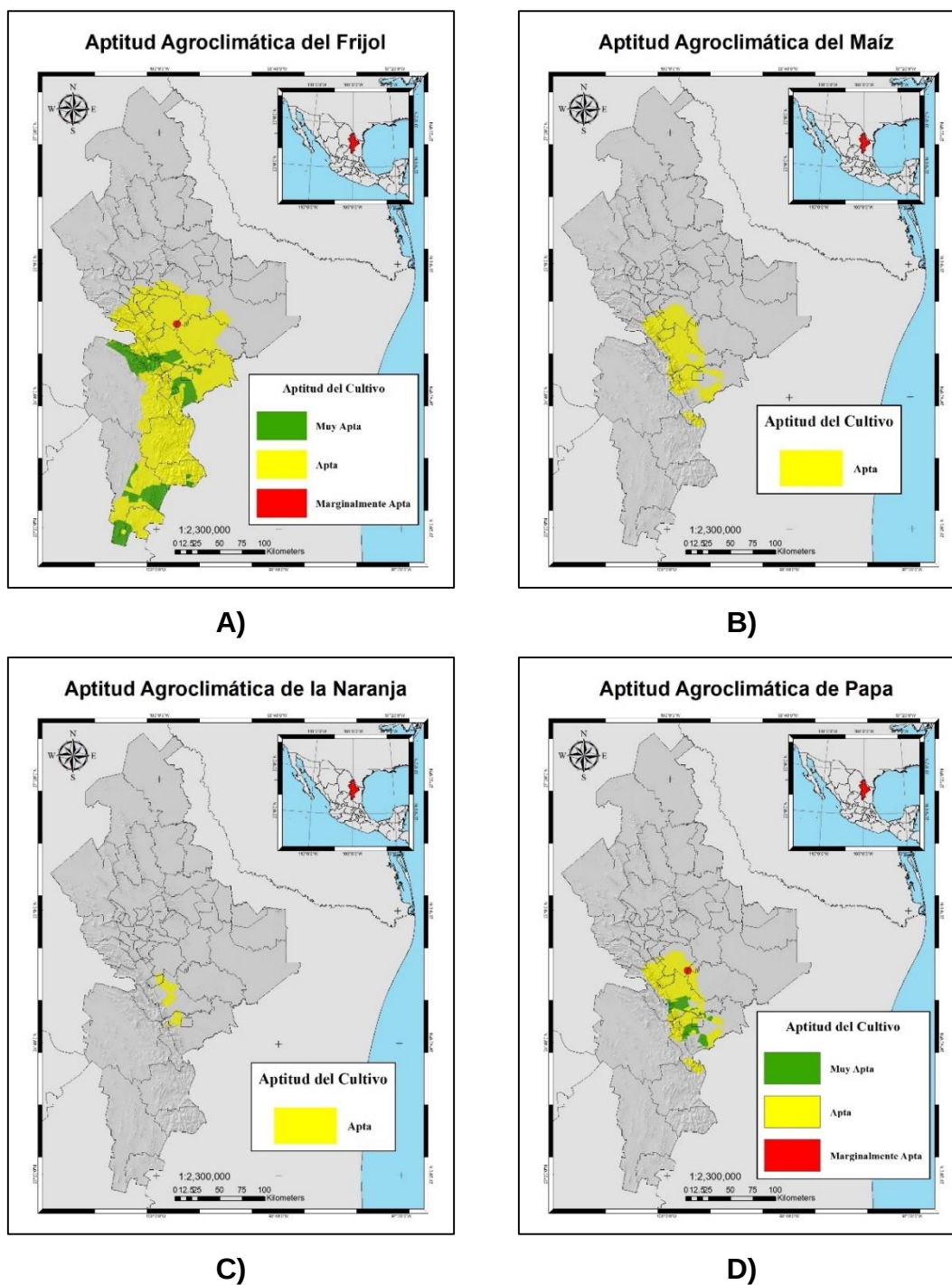


Figura 14. Aptitud Agroclimática con el método GAEZ modificado para secano: A) Frijol, B) Maíz, C) Naranja, D) Papa.

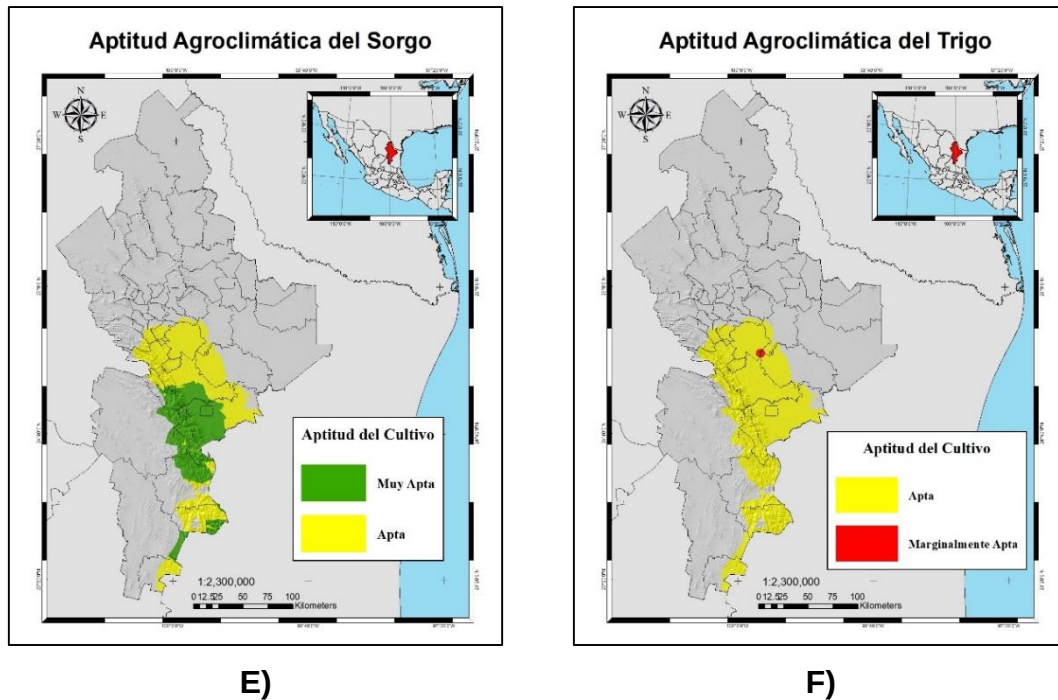
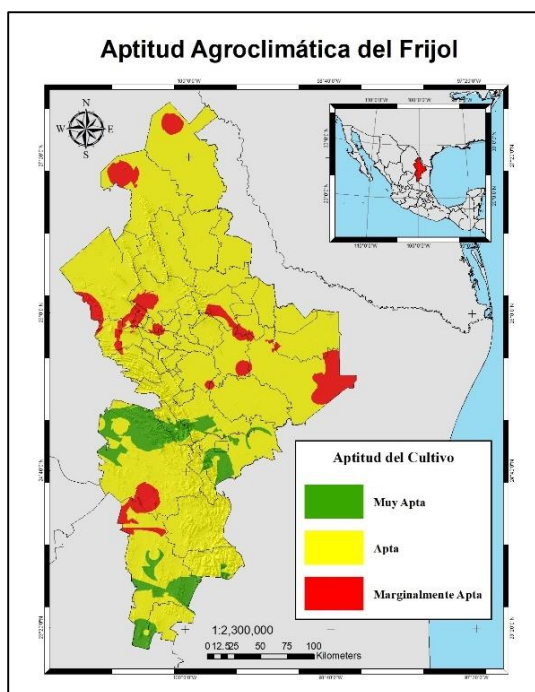
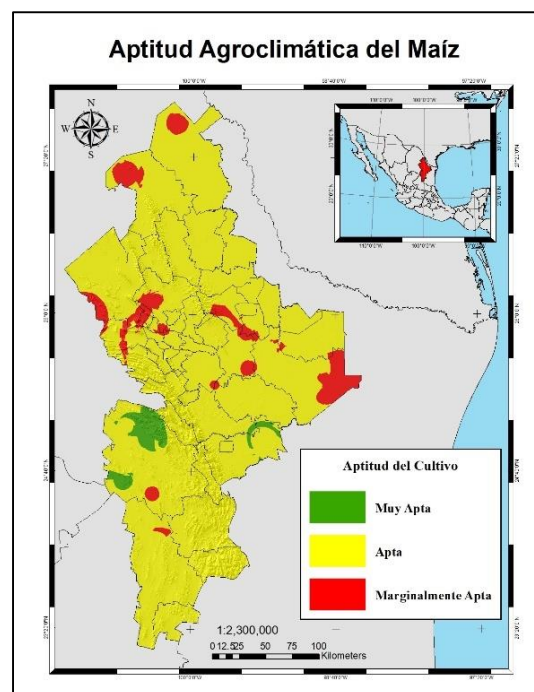


Figura 14. Aptitud Agroclimática con el método GAEZ modificado para secano: E) Sorgo y F) Trigo (continuación).

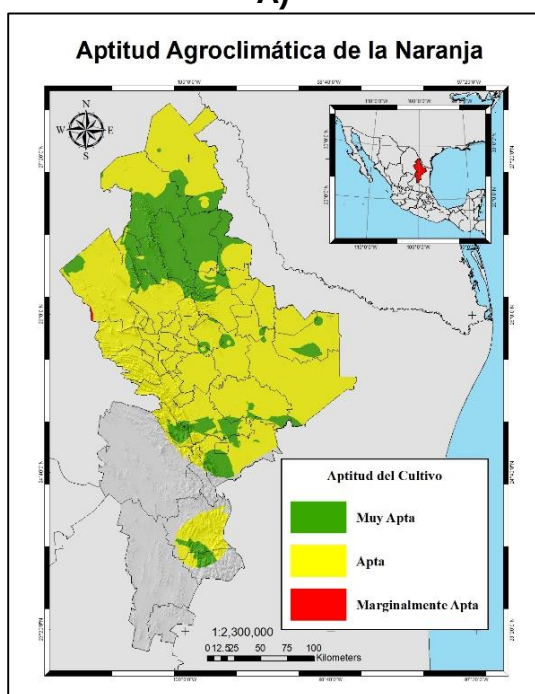
En el caso de la modalidad bajo riego, los cultivos más sobresalientes son la naranja y el sorgo al obtener una superficie equivalente al 18% del estado como Muy Apta ubicadas en la zona norte y sur respectivamente, por otro lado, para la clase Apta se tiene a los cultivos de frijol, maíz, papa, sorgo y trigo con 85%, 91%, 85%, 82% y 92% de la superficie respectivamente (Figura 15).



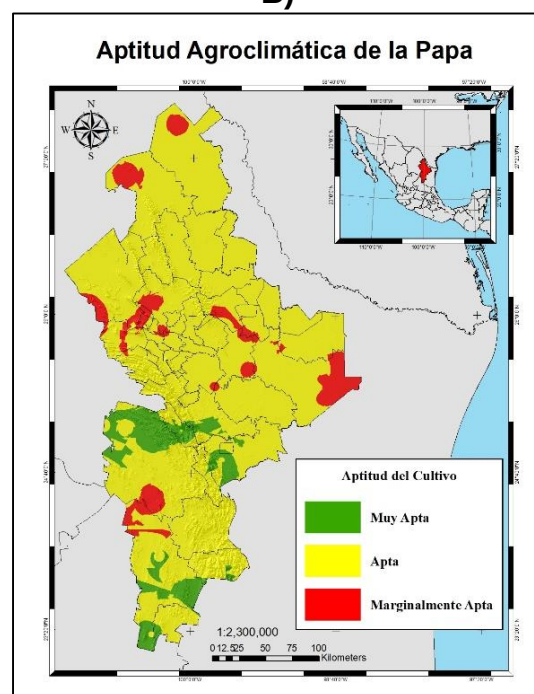
A)



B)



C)



D)

Figura 15. Aptitud Agroclimática con el método GAEZ modificado bajo riego: A) Frijol, B) Maíz, C) Naranja, D) Papa.

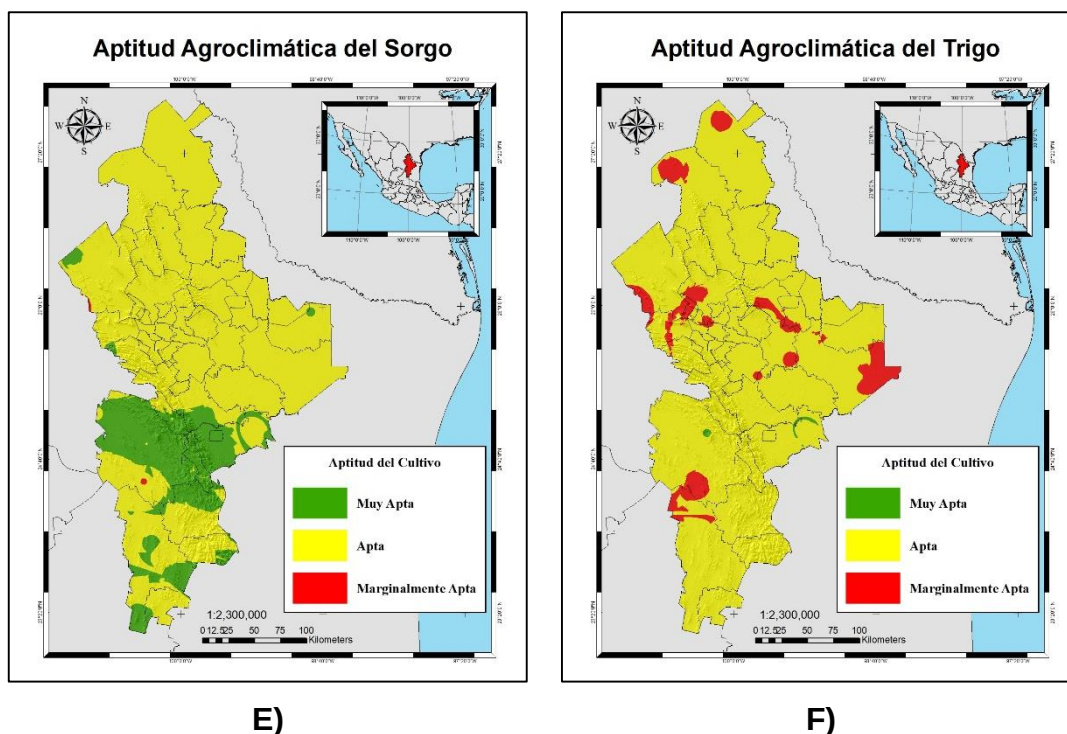
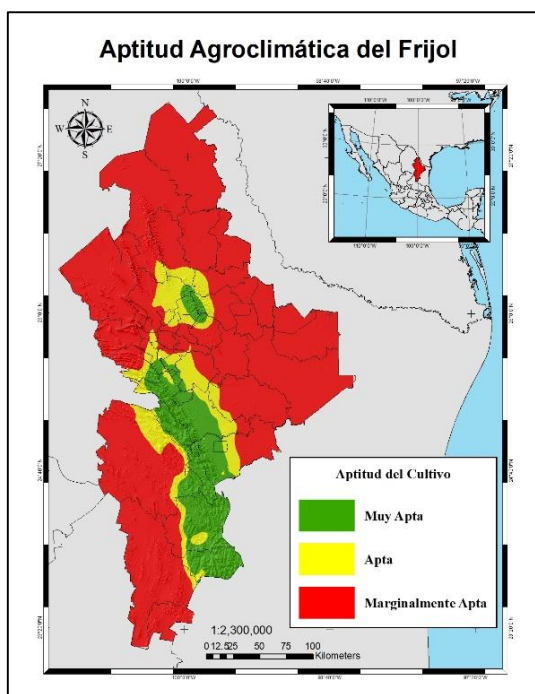


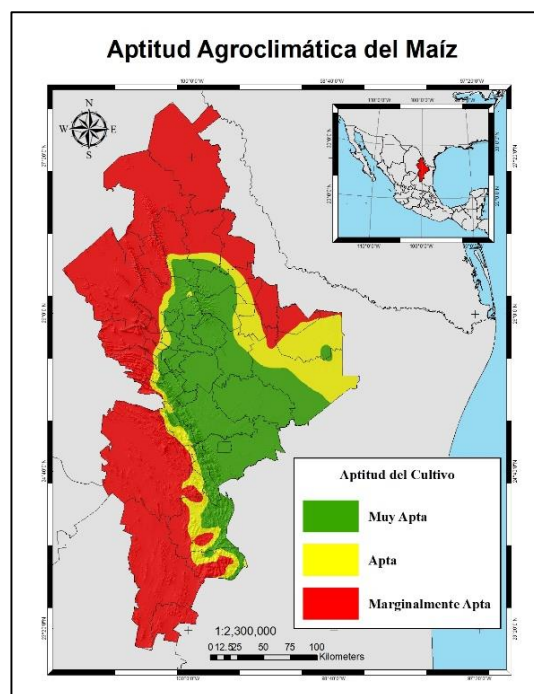
Figura 15. Aptitud Agroclimática con el método GAEZ modificado bajo riego: E) Sorgo y F) Trigo (continuación).

5.7 Zonificación con el método DIVA-GIS (ECOCROP)

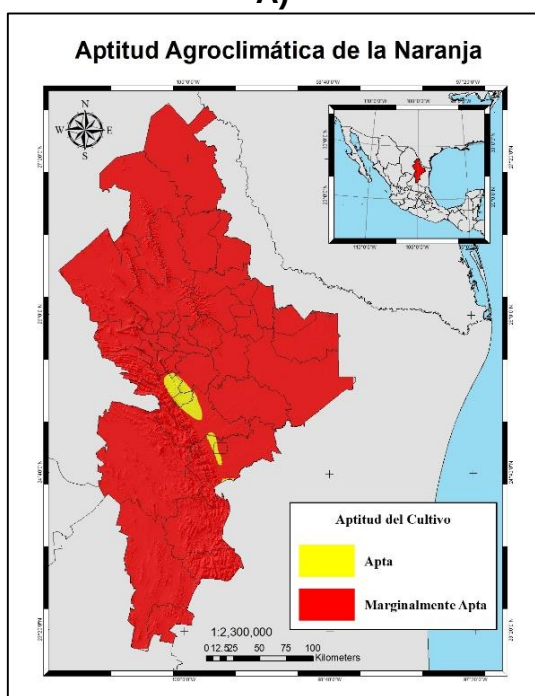
Con la metodología de DIVA-GIS se tiene una cobertura total debido a la base de datos establecida por el SIG, siendo en la modalidad de secano, que el cultivo con mayor superficie y de aptitud Muy Apta es el sorgo con un 37% de la superficie estatal ubicado principalmente en el centro-este y noreste del estado. Además, el cultivo de maíz se ubica en la segunda posición al contar con un 30% con una aptitud Muy Apta del noreste al sureste del estado. En contraparte el cultivo con más área y una aptitud marginalmente Apta fue la naranja en un 98% del estado, subsecuentemente el trigo con un 93%, la papa en un 79% y el frijol en un 76% del estado (Figura 16).



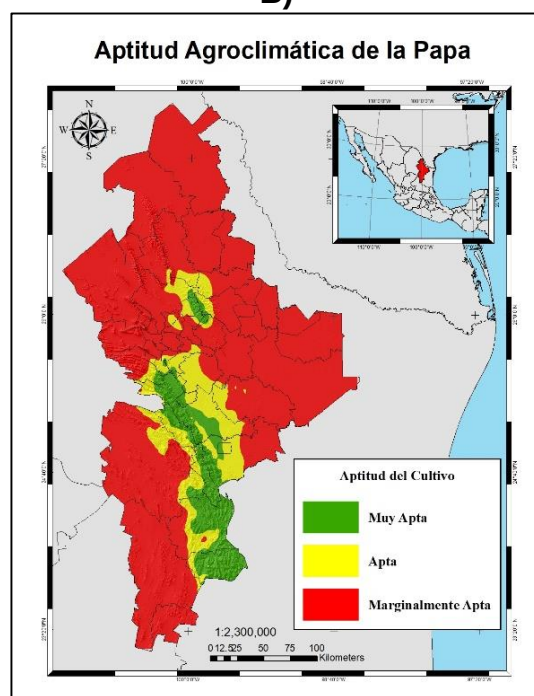
A)



B)



C)



D)

Figura 16. Aptitud Agroclimática con el método ECOCROP (DIVA-GIS) en seco: A) Frijol, B) Maíz, C) Naranja y D) Papa.

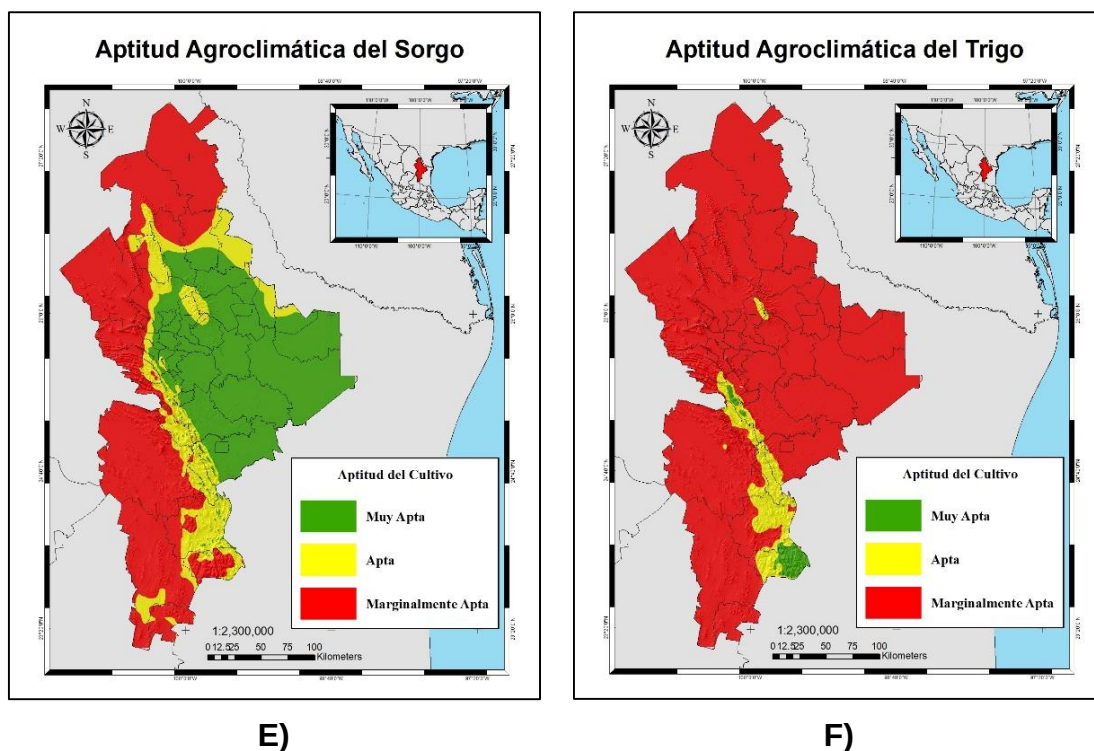
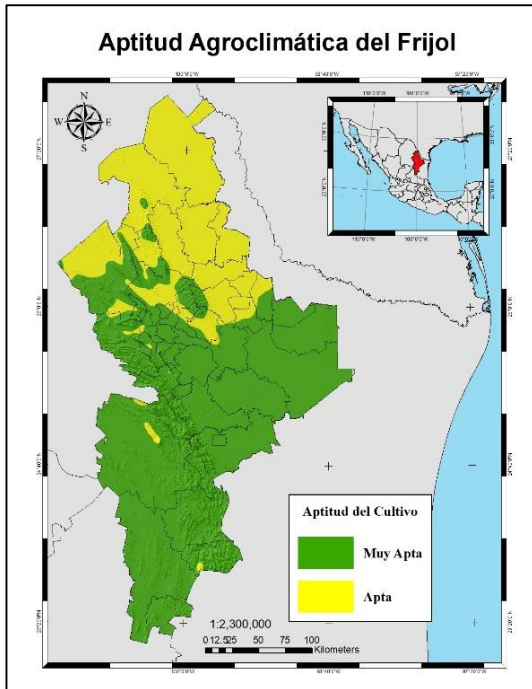
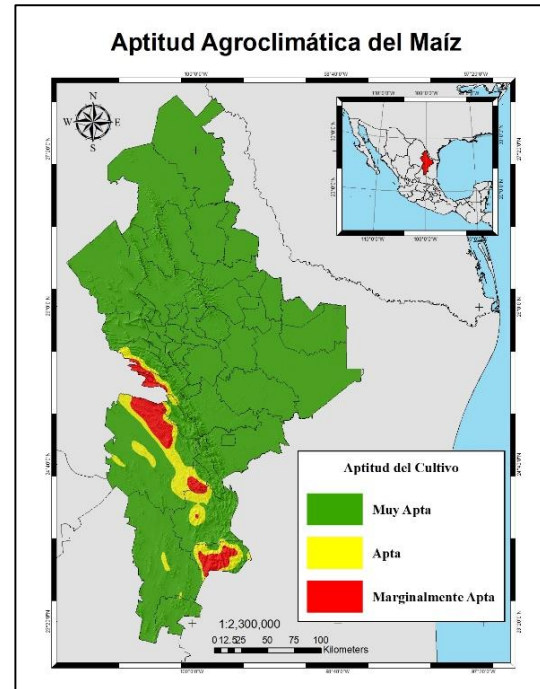


Figura 16. Aptitud Agroclimática con el método ECOCROP (DIVA-GIS) en seco: E) Sorgo y F) Trigo (continuación).

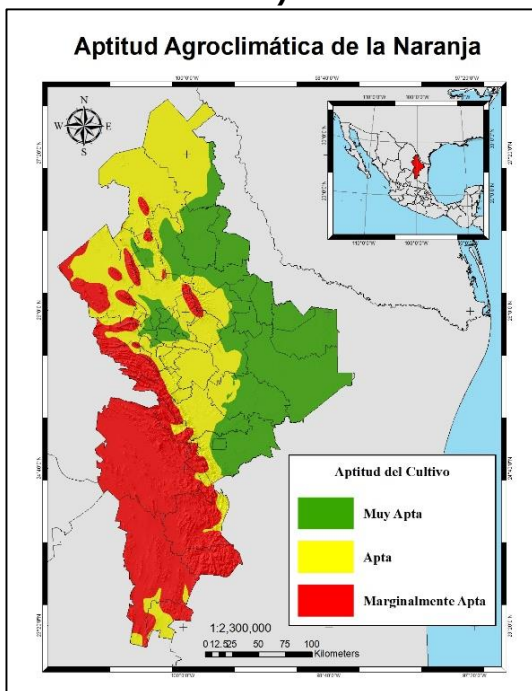
En el caso de los cultivos bajo riego se tiene al maíz con mayor superficie Muy Apta en un 92% del área estatal, le sigue la papa en un 89% y el trigo en un 76%, los cultivos de frijol, naranja y sorgo cuentan con las mayores zonas Aptas, además, la naranja cuenta también con un 34% de superficie con aptitud marginalmente Apta en las zonas más frías que se ubican en el sur de Nuevo León (Figura 17).



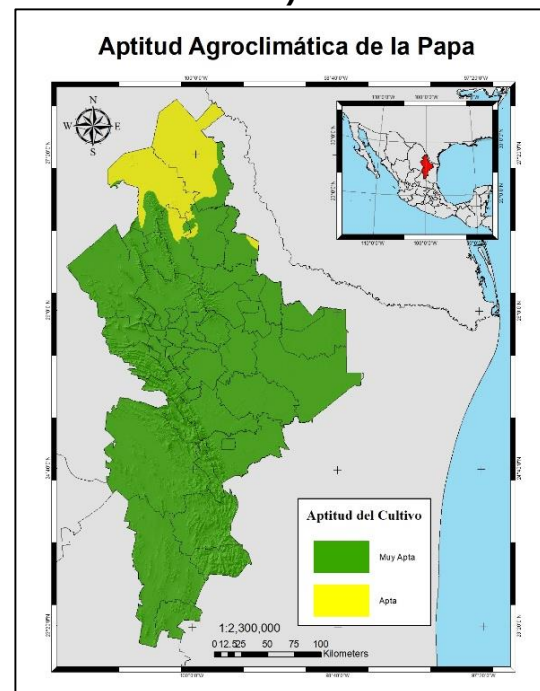
A)



B)



C)



D)

Figura 17. Aptitud Agroclimática con el método ECOCROP (DIVA-GIS) bajo riego: A) Frijol, B) Maíz, C) Naranja y D) Papa.

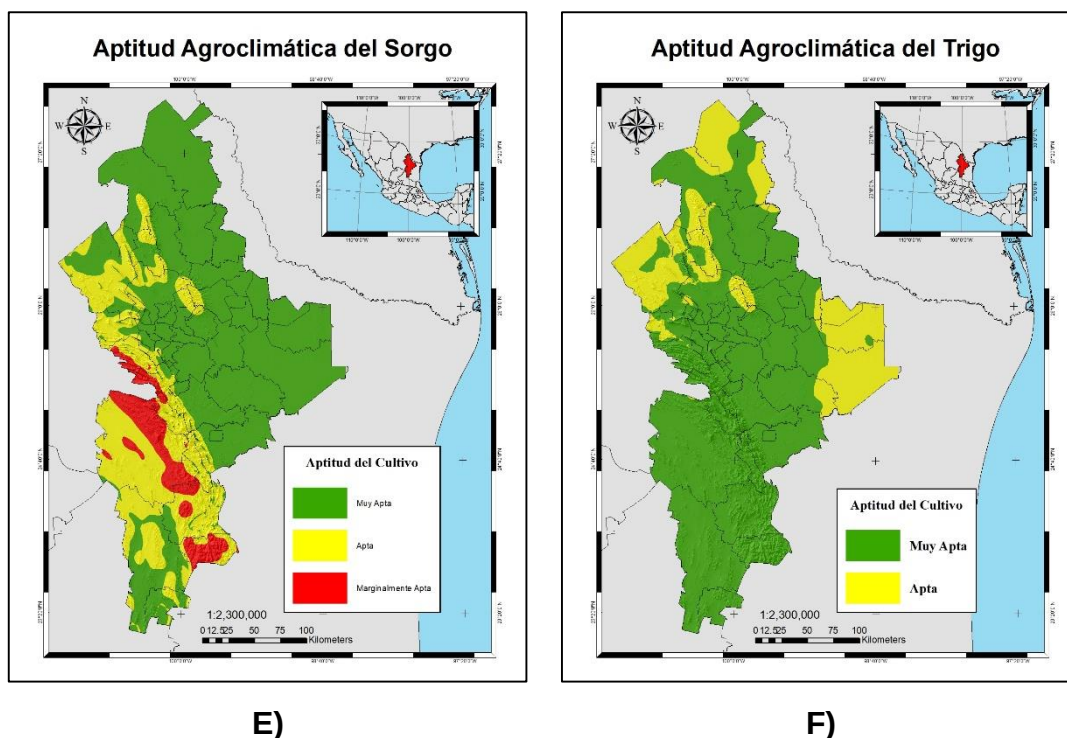


Figura 17. Aptitud Agroclimática con el método ECOCROP (DIVA-GIS) bajo riego: E) Sorgo y F) Trigo (continuación).

5.8 Zonificación con el método PAPADAKIS

En la clasificación de Papadakis se eliminó al cultivo de frijol por no presentar recomendaciones para el dicho cultivo, por lo cual solo se estudiaron 5. El tipo de verano predominante corresponde a la Zona Algodonera con un 67% de la superficie estatal ubicada en toda la zona norte y centro del estado, secundado por la Zona Maicera (15%), la Zona Algodonera menos cálida (11%), la Zona Arrocera (7%), y también se encontró Zona triguera pero no alcanza una superficie de más de 1% del estado al tener un total de 2,225 ha (Figura 18).

Por otra parte, el tipo de invierno más común es el Citrícola típico en un 79% del estado desde el norte al sur, el invierno de Avena abarca el 12% en la zona suroeste y el Citrícola tropical en el noreste (10%) (Figura 18).

En cuanto al régimen hídrico, se tiene una prevalencia de clima Monzónico en un 88% del estado, con clima Mediterráneo en 11% en el Norte y Desértico en el noroeste (1%) (Figura 18).

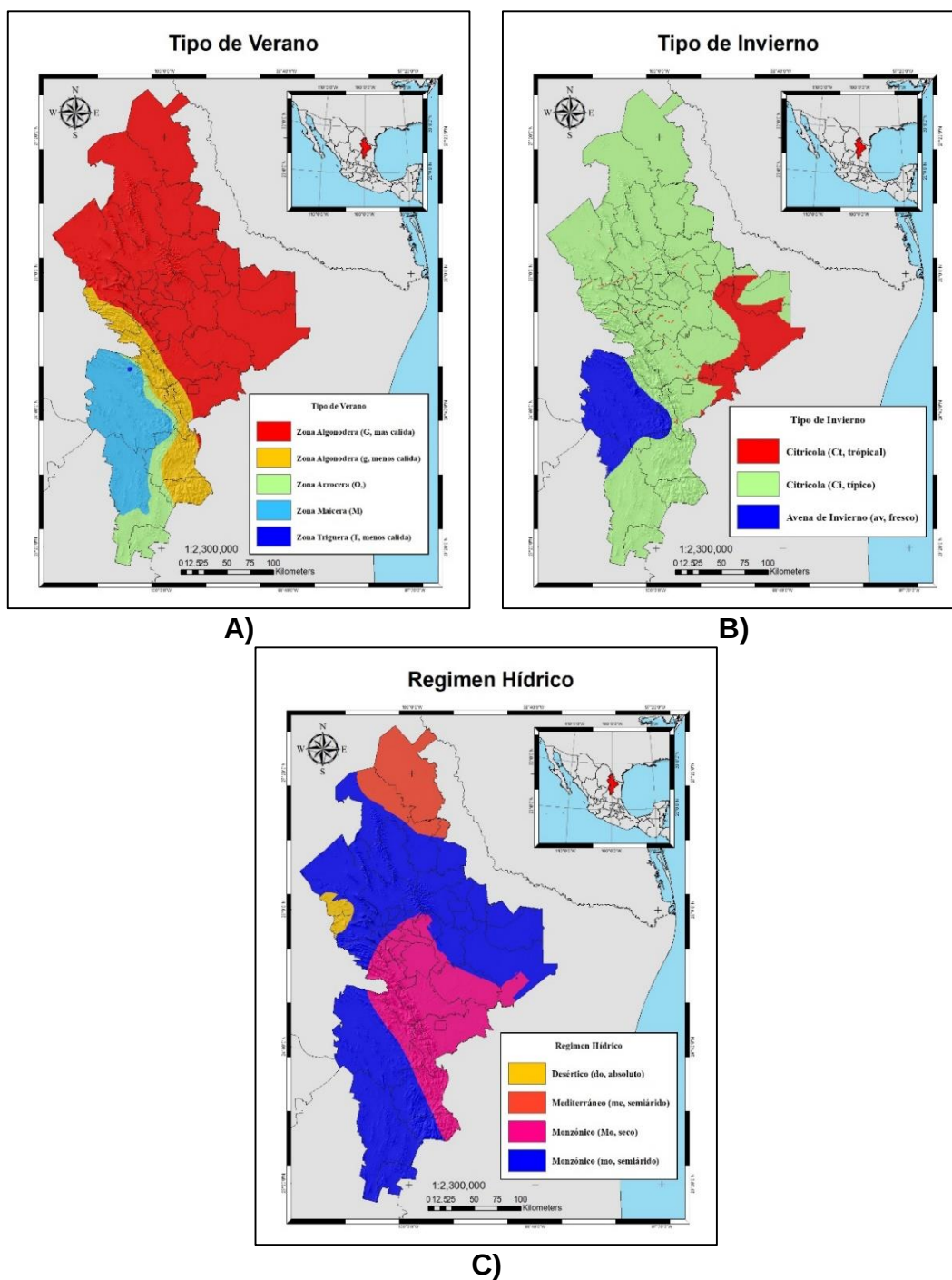


Figura 18. Mapas climáticos del estado de Nuevo León: A) Tipo de Verano, B) Tipo de Invierno y C) Régimen Hídrico.

La subdivisión climática se obtuvo para dos decimales con un total de 18 grupos diferentes que abarcan tres grupos principales: Tierra Fría (2), Desértico (3) y Subtropical (4). el primer grupo abarca un 36% de la superficie estatal, el segundo un 1% y el ultimo un 63% de la superficie. De los grupos principales solamente 11 grupos superan el 1% de la superficie estatal, siendo la Tierra Fría Media (2.39) con la mayor superficie con un 14% del suroeste del estado con una aptitud Muy Apta para el trigo y la papa con riego, Apta para el maíz de secano y marginalmente Apta para la naranja y sorgo de grano. En el segundo grupo se tiene Caliente Subtropical Desértico (3.26), ubicado en el noroeste, el maíz, naranja, trigo y sorgo son Muy Aptos con riego siendo el sorgo el de menor necesidad y el maíz con siembra en el ciclo de otoño, el cultivo de naranja tiene buen color y para el trigo se recomiendan variedades con poca necesidad de vernalización y el uso de retardantes del crecimiento. Para el cultivo de la papa es Apto con riego para zonas libres de heladas. El último grupo es el Continental Subtropical (4.22), localizado en el norte y centro del estado, con una superficie de 45% del estado Muy Apto para el sorgo de secano y la naranja rinde bien bajo riego, el maíz es Apto con riego por las altas temperaturas nocturnas y el trigo necesita riego y retardantes de crecimiento para su producción, el cultivo de la papa posee una aptitud Apta al sembrarse en primavera u otoño con inviernos libres de heladas y con la necesidad de riego (Figura 19).

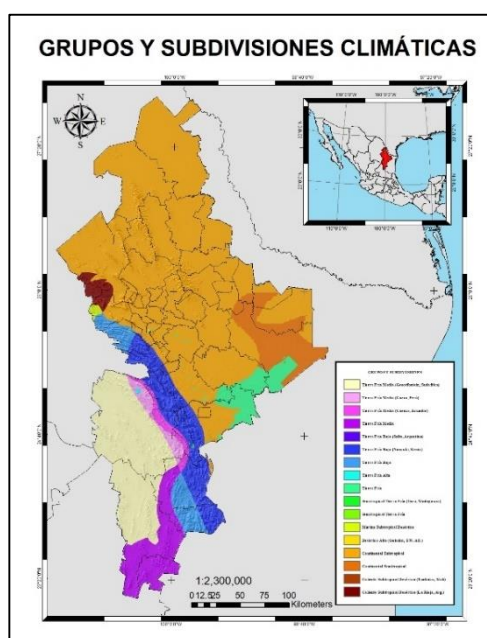


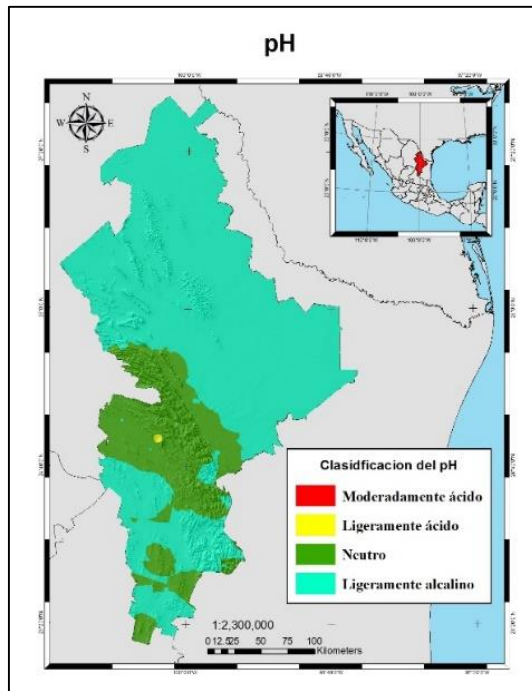
Figura 19. Grupos y Subdivisiones climáticas de Papadakis (ANEXO).

5.9 Aptitud edáfica

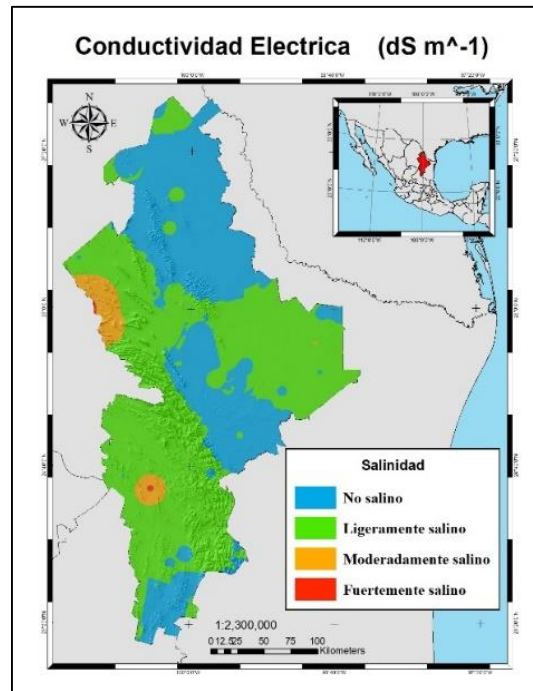
La segunda limitante de los cultivos para su aptitud es el suelo al tener la capacidad de aumentar o disminuir su productividad en el estado. Inicialmente se generan los mapas de las propiedades edáficas a través de la interpolación para conocer su distribución.

De las propiedades químicas del suelo el pH de 8 abarca el 78% de la superficie estatal, la conductividad eléctrica de 0 a 1 dS m⁻¹ se ubica en el 85% del estado, además, la textura más frecuente es la media en un 54% de la zona y el 65% del estado posee un drenaje moderado (Figura 20).

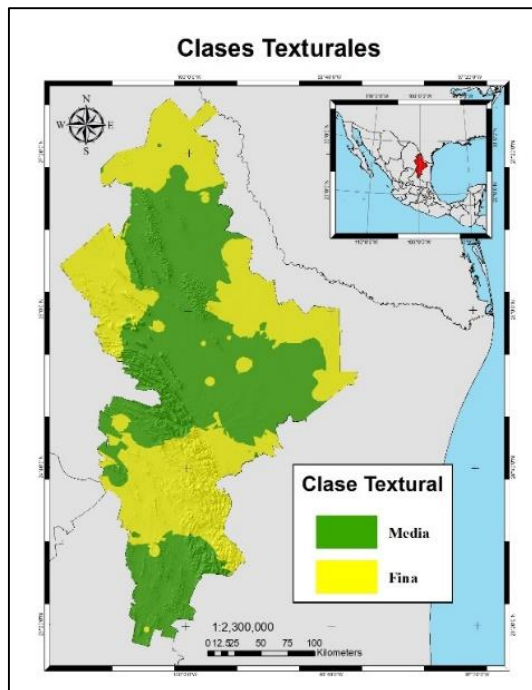
Posteriormente, se utiliza el álgebra de mapas para determinar la aptitud del cultivo, el cual se clasifica con los parámetros de ECOCROP, en la clasificación de Muy Apta el cultivo del sorgo presenta la mayor superficie en un 72% del estado, el frijol y la papa con un 45% en la zona norte, en la zona centro-sur y en el sur del estado, el maíz, la naranja y el trigo son localizados en un 30% del área, pero de forma dispersa en las municipalidades. En la clase Apta el maíz, la naranja y el trigo abarcan el 70%, el frijol y la papa un 55% y el sorgo un 28%, no obstante, las áreas Marginalmente Aptas no superan el 1% para ningún cultivo (Figura 21).



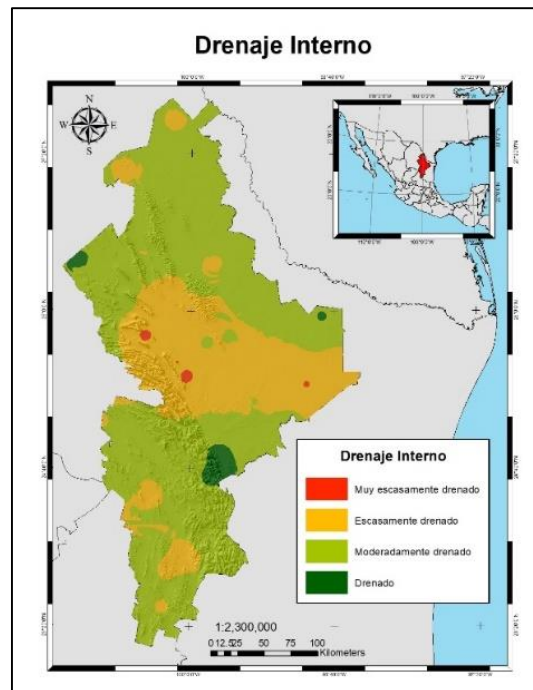
A)



B)



C)



D)

Figura 20. Propiedades edáficas en Nuevo León: A) pH; B) Conductividad Eléctrica; C) Clases Texturales y D) Drenaje Interno.

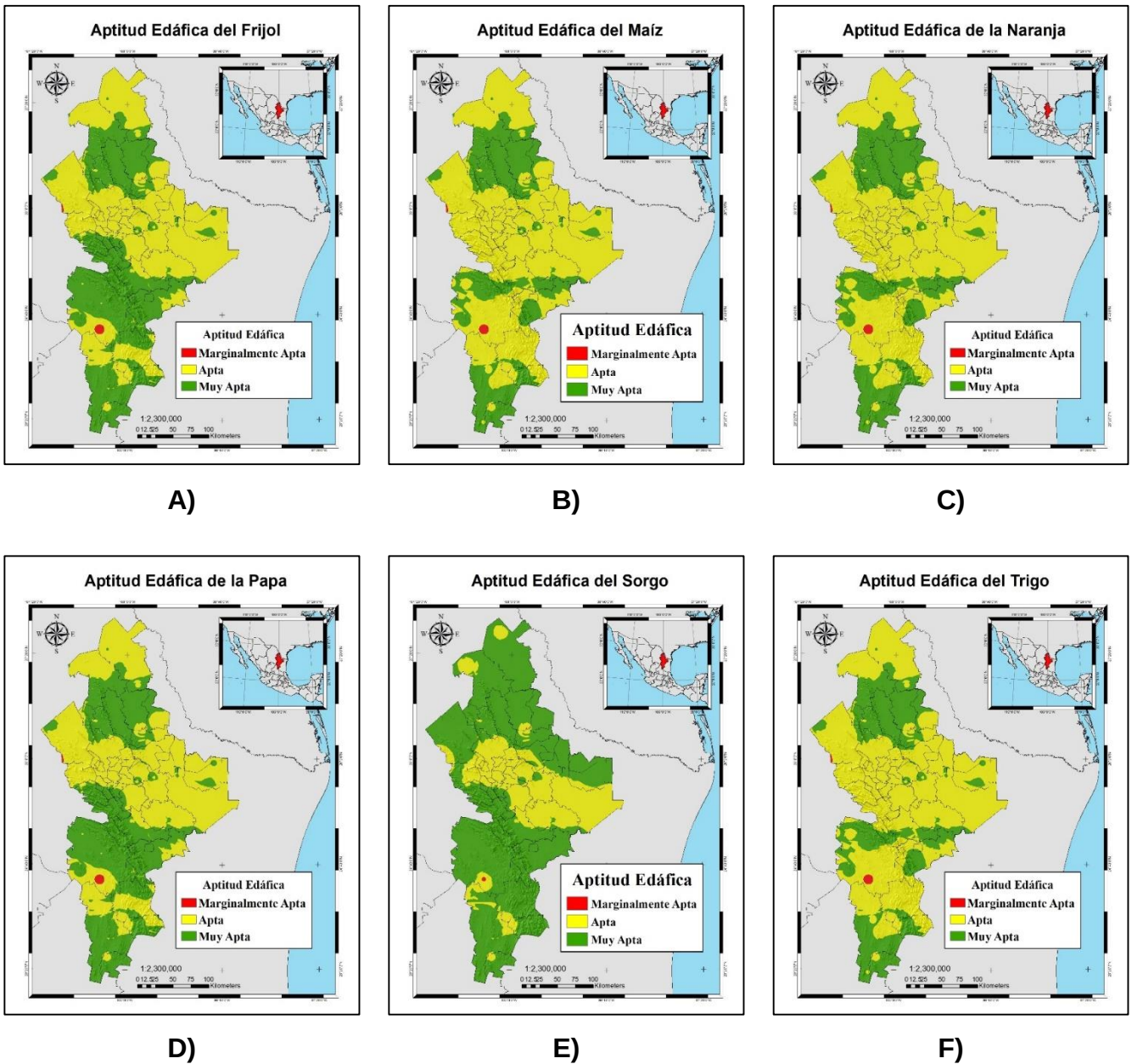


Figura 21. Aptitud Edáfica de los cultivos: A) Frijol, B) Maíz, C) Naranja, D) Papa, E) Sorgo y F) Trigo.

5.10 Comprobación en campo

Para comprobar la información de los mapas climáticos y edáficos se recorrió el estado y se entrevistó a un total de 48 productores ubicados en 11 municipios (Allende, Anáhuac, Aramberri, Bustamante, Cadereyta Jiménez, Dr. Arroyo, Galeana, Gral. Terán,

Lampazos del Naranjo, Linares y Montemorelos). Donde se obtuvieron 75 muestras de suelo a una profundidad de 30 cm y se registró de la productividad de 23 cultivos, siendo encontrados 11 diferentes cultivos a los propuestos inicialmente, (aguacate, avena, cacahuete, limón, maíz forrajero, moringa, pasto estrella y pretorian, repollo, sorgo forrajero y tomate rojo), no obstante, seis cultivos son los que tienen mayor presencia, en el 86% de los sitios, al sembrarse durante el año en distintos ciclos agrícolas, el maíz con presencia en 35 de los sitios, en segundo lugar el trigo con 25 sitios, el sorgo en 17, el frijol en 12, la naranja en 11 y la papa en 4 del total de los sitios de muestreo (Figura 22). Además, se comprobó la precisión de los datos para los periodos libres de heladas (PLH) y el periodo de lluvias que equivaldrían al periodo de crecimiento necesario para los cultivos de secano, siendo para el inicio del PLH una precisión de 13% y de 20% para el fin del PLH. Por otra parte, el inicio del periodo de lluvias no coincidió en ninguno de los 75 sitios solamente el fin del periodo de lluvias tuvo una precisión del 15%.

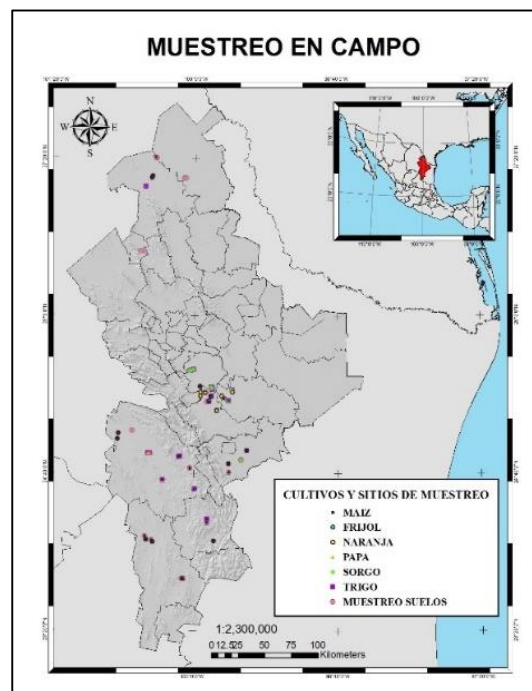


Figura 22. Sitios de muestreo y localización de cultivos (ANEXO).

Al obtener los registros de rendimientos se compara las aptitudes con los porcentajes de acuerdo con Higgins & Kassam (1981) divididos de 100 a 80%, 80 a 40%, y de 40 a 20%. Asimismo, se tiene una mayor área de los mejores rendimientos en la zona citrícola para

secano, por otra parte, para los cultivos bajo riego se ubican las mejores áreas en la zona centro y sur del estado (Cuadro 4). Un hecho en particular, que llamo la atención, fue la similitud en algunos cultivos para diferentes áreas al tener los mismos rendimientos, pero en diferentes sistemas productivos.

Cuadro 4. Rendimiento de los cultivos con base en su aptitud.

Cultivo	Municipio		Aptitud en Secano (t ha ⁻¹)			Aptitud Bajo Riego (t ha ⁻¹)		
	Secano	Bajo riego	MA	A	Ma	MA	A	Ma
Frijol	038	032	2-1.6	1.6-0.6	0.6-0.1	3-2.4	2.4-1	1-0.2
Maíz	022	017	3-2.4	2.4-1	1-0.2	11-8.8	8.8-3.5	3.5-0.7
Naranja	038	038	12-9.6	9.6-3.8	3.8-0.8	45-36	36-14.4	14.4-2.9
Papa	N/A	017		N/A		47-37.6	37.6-15	15-3
Sorgo	022	009	4-3.2	3.2-1.3	1.3-0.3	4-3.2	3.2-1.3	1.3-0.3
Trigo	022	017	5-4	4-1.6	1.6-0.3	5-4	4-1.6	1.6-0.3

Nota: MA= Muy Apta, A= Apta, Ma= Marginalmente Apta; N/A= No aplica al no tenerse registro en campo: 009= Cadereyta Jiménez; 017= Galeana; 022= Gral. Terán; 032= Lampazos de Naranjo; 038= Montemorelos.

Asimismo, al utilizar únicamente los mapas agroclimáticos se tuvo una precisión para el frijol en riego de 33% con las metodologías DIVA-GIS-R y GAEZ-R, además, en seco posee 33% de precisión con DIVA-GIS-S y nula para la GAEZ-S. En el caso del maíz bajo riego resultó que la GAEZ-R tiene 57% y en seco GAEZ-S un 29%. Para el cultivo de naranja se tuvo un 43% con la metodología de GAEZ-R y Papadakis, siendo para seco DIVA-GIS-S con un 75%. Además, para el cultivo de la papa, solo DIVA-GIS-R generó una precisión de 33% y resultó inexistente con las otras metodologías. Para el sorgo se tiene una precisión completa en los sitios para la condición bajo riego con el método de DIVA-GIS-R y GAEZ-R, por otra parte, el 75% corresponde para el método de Papadakis en seco. Por último, el cultivo del trigo posee una precisión de 70% con DIVA-GIS-R y de 27% con Papadakis para seco (Cuadro 5).

Cuadro 5. Precisión Agroclimática para diferentes cultivos con la ZAE.

Cultivos	BAJO RIEGO			SECANO		
	DIVA-GIS-R	GAEZ-R	PAPADAKIS	DIVA-GIS-S	GAEZ-S	PAPADAKIS
Frijol	33	33	N/A	33	-	N/A
Maíz	29	57	-	29	-	7
Naranja	29	43	43	75	-	-
Papa	33	-	-	-	-	-
Sorgo	100	100	-	17	8	75
Trigo	70	-	-	-	-	27

Nota: N/A= No Aplica.

5.11 Análisis de laboratorio y corrección de mapas

Una vez colectadas las muestras de suelo se procesaron con los mismos procedimientos analíticos establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002) y al comparar sus resultados con la información de INEGI para los sitios de muestreo se obtuvo una correlación del 4% en el pH y 48% para la conductividad eléctrica. En relación con las clases texturales se tuvo una precisión de 55% y en el drenaje interno solo un 13%. Por lo anterior, se decidió eliminar a las variables de pH y drenaje interno y se corrigieron los mapas.

Por consiguiente, al poseer los mismos requerimientos tanto de la C.E. y la textura, la mayoría de los cultivos se establece como Muy Apta la zona centro-norte y sur del estado con un equivalente a 53% de la superficie estatal, las zonas Marginalmente Aptas se ubican en el noroeste y suroeste con un 17%. Por otra parte, para el cultivo del sorgo su aptitud es Muy Apta en casi la totalidad del estado con un 93% y el 7% restante localizado en el noroeste y suroeste es Apta (Figura 23).

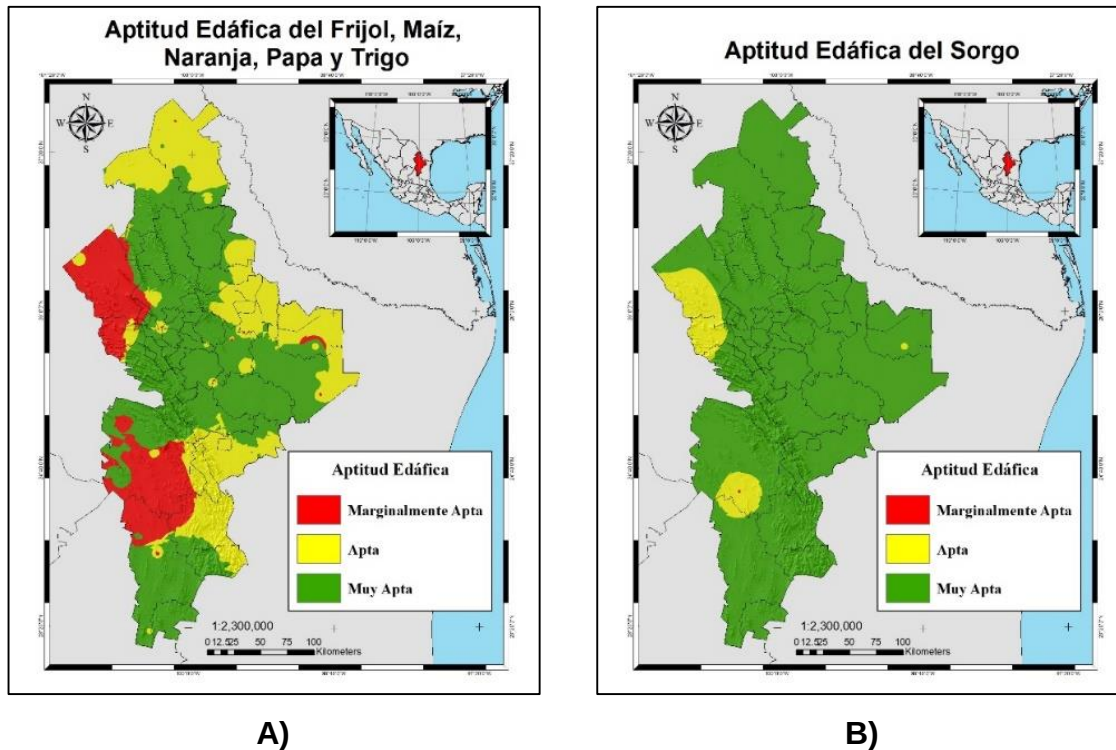


Figura 23. Aptitud Edáfica de los cultivos corregida: A) Aptitud edáfica para los cinco cultivos de Frijol, Maíz, Naranja, Papa y Trigo, B) Aptitud edáfica del Sorgo.

5.12 Aptitud edafoclimática de los cultivos

Las clases de aptitud se relacionaron con los rendimientos de los cultivos al ser determinados los rangos óptimos, por lo que, si en el sitio de muestreo se tiene el mismo rendimiento y la metodología se consideraba que acertaba, entonces se incrementa el porcentaje de la precisión, y entonces, se recomendaría el método para un cultivo específico.

Para el frijol las metodologías con mayor aproximación en la modalidad de riego fueron dos con los mismos aciertos, DIVA-GIS-R y GAEZ-R, con un 33% de precisión. Sin embargo, en el caso de la agricultura de secano el DIVA-GIS-S contó con 78% de precisión y la GAEZ-S con 22%.

En el caso del maíz de riego resultaron con un 29% de precisión nuevamente las metodologías DIVA-GIS-R y GAEZ-R, pudiendo considerar a ambas como semejantes. En cambio, para secano el método Papadakis conto con 34% y más aún, se recomienda

también para riego al acertar en el 49% de los sitios de muestreo, superior al 29% ya mencionado. Con esa clasificación el maíz pertenece al grupo climático de Tierra Fría Media.

En condiciones de maíz de temporal, la metodología de DIVA-GIS-S presento un 7% y GAEZ-S un 0% de precisión. Para el cultivo de la Naranja bajo riego el método más apto es DIVA-GIS-R con un 57% de precisión, seguido de Papadakis con un 36%, con la necesidad de establecer riego en el grupo climático de Continental Subtropical, al acertar en todos los sitios la necesidad de irrigación, y GAEZ-R obtuvo un 29%. En la modalidad de secano, DIVA-GIS-S resulto con un 50% y con la menor precisión resultó la GAEZ-S de secano con 0% (Figura 24).

Con el cultivo de la papa ninguna metodología resulto apropiada para determinar las aptitudes al tener una precisión de 0%. En el cultivo del sorgo, los mejores métodos en la modalidad de riego son DIVA-GIS-R y GAEZ-R al coincidir su aptitud en la totalidad de los puntos de muestreo. No obstante, para la modalidad de secano se tiene a la metodología de GAEZ-S en primer lugar con un 75% de precisión y el método de Papadakis fue el más apropiado para la condición de secano al establecer su ubicación con los grupos climáticos, Tierra Fría Media y Continental Subtropical, la nula necesidad de riego en el 71% de los sitios, dando una precisión de 41% y de 17% para DIVA-GIS-S (Figura 24).

En cuanto al trigo, el mejor método para riego es DIVA-GIS-R con un 71% de precisión, seguido de Papadakis con 44% al recomendar irrigación en la totalidad de los sitios bajo riego. La metodología de GAEZ-R posee 43% de precisión. En el caso de secano se tiene como mejor método al DIVA-GIS-S con 73% de precisión y el método de GAEZ-S con 60% (Cuadro 6) (Figura 24).

Además, se compara la información del SIAP de los rendimientos y se clasifica en cada aptitud junto con una correlación de la productividad. En el cultivo del frijol se tiene una precisión de 0% en riego y de 33% para secano. El maíz muestra una precisión de 71% para riego y 50% en secano, con una correlación de 57%. Para el cultivo de la naranja se tiene una aproximación de 43% bajo riego y de 75% en secano, relacionando los

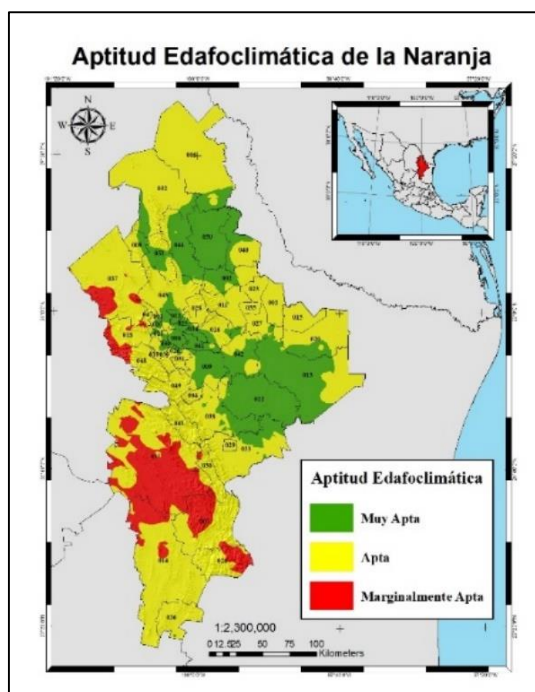
cultivos con un 34%. La precisión del sorgo es la más alta al poseer un 83% en seco, todo lo contrario, bajo riego al ser inexistente, además se tiene una correlación equivalente al 30%. Por último, el cultivo del trigo bajo riego tiene 29% de precisión y en seco un 73% con una correlación de 27% (Cuadro 7).

Cuadro 6. Precisión de las metodologías para una Zonificación Agroecológica (%).

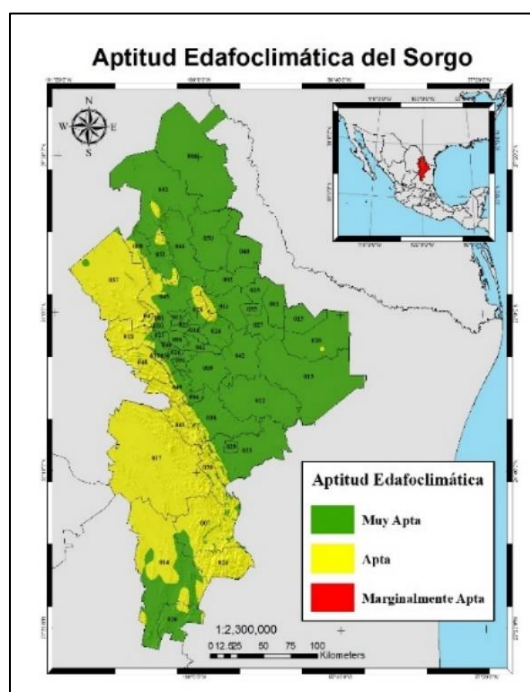
Cultivos	BAJO RIEGO			SECANO		
	DIVA-GIS-R	GAEZ-R	PAPADAKIS	DIVA-GIS-S	GAEZ-S	PAPADAKIS
Frijol	33	33	-	78	22	-
Maíz	29	29	-	7	-	34
Naranja	57	29	36	50	-	-
Papa			-			
Sorgo	100	100	-	17	75	41
Trigo	71	43	44	73	60	-

Cuadro 7. Precisión del SIAP respecto a datos de campo (%).

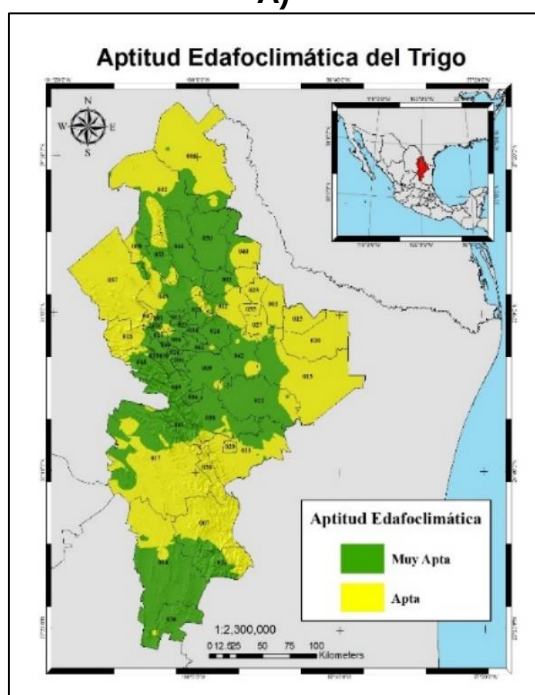
Cultivos	SIAP	
	Riego	Secano
Frijol	-	33
Maíz	71	50
Naranja	43	75
Papa		-
Sorgo	-	83
Trigo	29	73



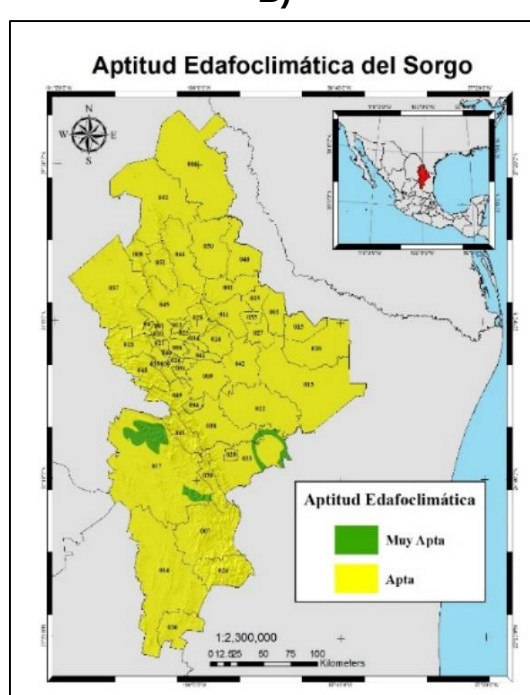
A)



B)



C)



D)

Figura 24. Aptitudes edafoclimáticas de las metodologías con mayor precisión; DIVA-GIS-R: A) Naranja, B) Sorgo y C) Trigo; GAEZ-R: D) Sorgo.

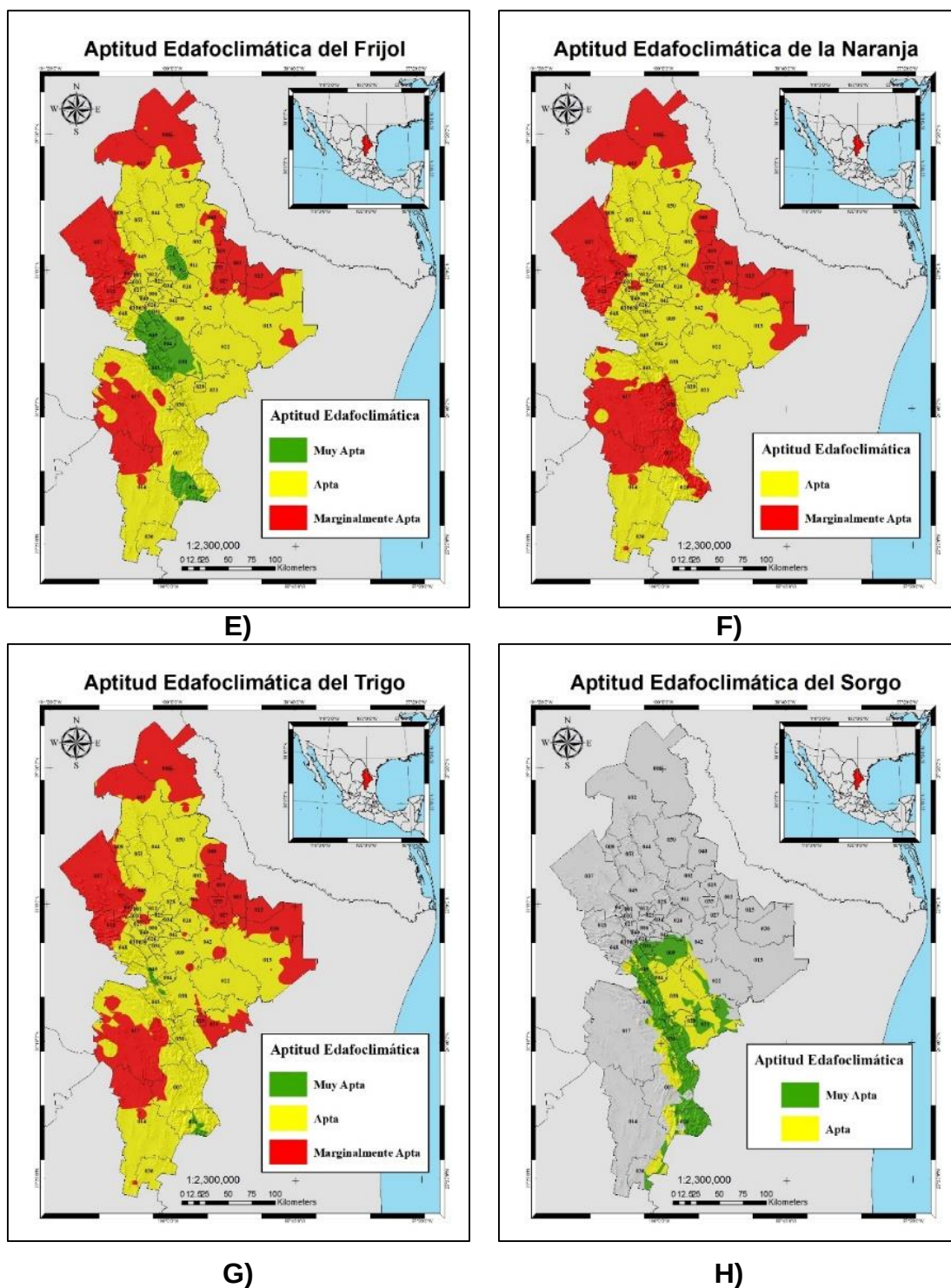
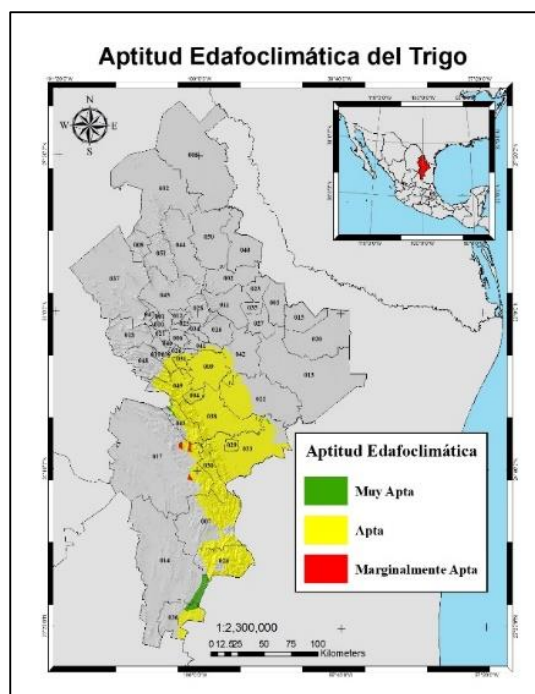


Figura 24. Aptitudes edafoclimáticas de las metodologías con mayor precisión; DIVA-GIS-S: E) Frijol, F) Naranja y G) Trigo; GAEZ-S: H) Sorgo y I) Trigo (continuación).



I)

Figura 24. Aptitudes edafoclimáticas de las metodologías con mayor precisión: GAEZ-S; I) Trigo (continuación).

VI. CONCLUSIÓN

La Zonificación Agroecológica que se realizó en Nuevo León, fue factible, a pesar de contar con una baja densidad de estaciones climatológicas. Sin embargo, la metodología de la GAEZ no resultó apropiada para todos los cultivos en estudio, al descartar gran parte de las zonas donde se tiene producción, tanto en secano como en riego. Por lo tanto, es necesario utilizar metodologías específicas a los requerimientos de los cultivos que mejor se adapten a la información disponible. Respecto a las hipótesis específicas se concluye:

1. El tipo de agricultura en temporal o bajo riego es una limitante en los resultados, se obtuvieron resultados más precisos en temporal para el frijol, maíz, sorgo y trigo al utilizar mapas de clima y suelo. En su contraparte se tiene al cultivo de naranja donde se prefiere la información climática. En riego, se tienen los mismos resultados al usar clima o clima-suelo para el frijol y el sorgo siendo preferible los métodos climáticos al necesitar menor información de entrada. Para el maíz y

papa es mejor usar mapas agroclimáticos. En el caso de la naranja y el trigo la mejor opción es usar clima y suelo.

2. La ubicación geográfica del estado, que es una zona de transición tanto climática como fisiográfica, es la principal causa de la presencia de diferentes cultivos. Se producen diferentes grupos climáticos, además las propiedades del suelo difieren de la zona norte y sur con el límite entre ambas áreas de la Sierra Madre Oriental.
3. La base de datos de los perfiles del suelo del INEGI no se recomienda para generar mapas de las variables edáficas al tener como máxima precisión el 55% solo para las texturas.
4. La metodología que abarca más cultivos y con mayor precisión es DIVA-GIS-R y DIVA-GIS-S, en comparación con GAEZ-R que necesita más información de entrada para su uso. GAEZ-S solo es apta para el sorgo en seco y el método de Papadakis es óptima solamente para maíz de seco, además de tener la más baja precisión en el resto de cultivos.
5. Los datos de máximos rendimientos del SIAP y de campo solo son recomendables para el cultivo de naranja en seco.
6. Los periodos de crecimiento y el periodo libre de heladas poseen muy baja precisión por consiguiente abre la oportunidad de generar nuevos modelos para Nuevo León que estimen dichas variables climáticas. La única metodología capaz de estimar zonas con necesidades hídricas es Papadakis.
7. La información del SIAP con base a la clasificación de las aptitudes solo tiene una precisión por encima del 70% en maíz de riego; naranja, sorgo y trigo de seco.

Por otra parte, se recomendaría hacer estudios más detallados a nivel municipal y con cultivos en específico con los métodos ya recomendados, además de generar nueva información o modelos climáticos y edáficos para aumentar la precisión de los mapas.

El uso de la información del SIAP es confiable solo para los cultivos mencionados en el séptimo punto, junto con una recomendación para el SIAP de obtener los máximos rendimientos registrados por municipio.

VII. LITERATURA CITADA

- Adzemi, M. A., & Rawayau, H. Y. (2016). Climatic Classification for Agricultural Potential in Peninsular Malaysia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 6(August), 5–13. <https://core.ac.uk/download/pdf/234662035.pdf>
- Aguilar Rodríguez, J. R., Zavala Cruz, J., Juárez López, F., Palma López, D. J., Castillo Acosta, O., & Shirma Torres, E. (2017). Aptitud Edáfica de *Eucalyptus urophylla* S.T Blake en la terraza de Huimanguillo Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10(12), 79–84.
- Akpoti, K., Kabo-bah, A. T., & Zwart, S. J. (2019). Agricultural land suitability analysis: State-of-the-art and outlooks for integration of climate change analysis. *Agricultural Systems*, 173(January 2018), 172–208. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.02.013>
- Campos Mantovanelli, B., Teresinha Petry, M., Broetto Weiler, E., & Carlesso, R. (2021). Geostatistical interpolation based ternary diagrams for estimating water retention properties in soils in the Center-South regions of Brazil. *Soil and Tillage Research*, 209(February), 104973. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104973>
- Cavazos, T. (1994). The influence of the southern oscillation on the winter climate of Nuevo León state, Mexico. *Geofísica Internacional*, 33(2), 295–302.
- Cavazos, T. (1997). Downscaling large-scale circulation to local winter rainfall in North-Eastern Mexico. *International Journal of Climatology*, 17(10), 1069–1082. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0088\(199708\)17:10<1069::aid-joc183>3.0.co;2-i](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0088(199708)17:10<1069::aid-joc183>3.0.co;2-i)
- Chai, H., Cheng, W., Zhou, C., Chen, X., Ma, X., & Zhao, S. (2011). Analysis and comparison of spatial interpolation methods for temperature data in Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. *Natural Science*, 03(12), 999–1010. <https://doi.org/10.4236/ns.2011.312125>

- Coelho, J. C., & Pinto, P. A. (2019). Brief Characterization And Analysis Of Soils And Climate And An Analysis Of Suitability To Irrigation Of The Portuguese Continental Territory. *International Journal of Agriculture and Environmental Science*, 6(4), 86–95. <https://doi.org/10.14445/23942568/ijaes-v6i4p113>
- Constante García, V., Nava Reyna, E., Maciel Torres, S. P., & Villanueva Díaz, J. (2021). ASOCIACIÓN ENTRE EL CRECIMIENTO DEL ROBLE Y EL CLIMA: TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN. *Ciencia e Innovación Revista Científica Semestral Investigación, Desarrollo e Innovación*, 4(1), 31–41.
- Cruz Cárdenas, G., López Mata, L., Ortiz Solorio, C. A., Villaseñor, J. L., Ortiz, E., Silva, J. T., & Estrada Godoy, F. (2014). Interpolation of mexican soil properties at a scale of 1:1,000,000. *Geoderma*, 213, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.014>
- de Assis Silva, S., Oliveira dos Santos, R., de Queiroz, D. M., de Souza Lima, J. S., Fraga Pajehú, L., & Carvalho Medauar, C. (2021). Apparent soil electrical conductivity in the delineation of management zones for cocoa cultivation. *Information Processing in Agriculture*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.04.004>
- Deng, N., Grassini, P., Yang, H., Huang, J., Cassman, K. G., & Peng, S. (2019). Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. *Nature Communications*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09447-9>
- Díaz Hernández, B. M., Plascencia Vargas, H., Arteaga Ramírez, R., & Vázquez Peña, M. A. (2000). Estudio y zonificación agroclimáticos en la región Los Altos de Chiapas, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, 42, 7–27.
- Dutta, S., Rahman, S., Rahman, H., Sharif, N. H., & Sultana, N. (2020). Pertinence of FAO Land Evaluation Model for Optimum Agricultural Land Use Planning Using Remote Sensing and GIS. 2(1), 10–21.
- FAO. (1976). A framework for land evaluation. In *FAO soils bulletin n. 32*.

<https://doi.org/10.1007/BF01203810>

FAO. (1978). *Report on the Agro-Ecological Zones Project* (Vol. 1). Methodology and Results for Africa. FAO.

FAO. (1994). *AEZ in Asia Proceedings of the Regional Workshop on Agro-Ecological Zones Methodology and Applications* (F. R. O. for A. and the P. (RAPA) (ed.); 1st ed.). and Agriculture Organization of the United Nations.

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

Fischer, G., & Sun, L. (2001). Model based analysis of future land-use development in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85(1–3), 163–176. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00182-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00182-7)

Fischer, G., van Velthuisen, H., Nachtergaele, F. O., & FAO/IIASA. (2000). *Global Agro-Ecological Zones Assessment: Methodology and Results, Interim Report*. 338.

FU, C., ZHANG, H., TU, C., LI, L., LIU, X., & LUO, Y. (2020). Spatial interpolation of orchard soil pH using soil type and planting duration as auxiliary information. *Pedosphere*, 30(5), 628–637. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60045-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60045-1)

Gardner, A. S., Gaston, K. J., & Maclean, I. M. D. (2021). Combining qualitative and quantitative methodology to assess prospects for novel crops in a warming climate. *Agricultural Systems*, 190(September 2020), 103083. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103083>

Gomez Diaz, J. D. (1999). *Clasificación Climática de Papadakis con aplicaciones para México*. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

González Saldivar, F., Uvalle Saucedo, J., Cantú Ayala, C., Resendiz Davila, L., Gonzalez Uribe, D., & Olguín Hernández, C. A. (2014). EFECTO DE LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DEL MATORRAL ESPINOSO

- TAMAULIPECO DISPONIBLE PARA *Odocoileus virginianus*. *Agroproductividad*, 7(5), 3–9. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20153002734>
- Gupta, R., & Mishra, A. (2019). Climate change induced impact and uncertainty of rice yield of agro-ecological zones of India. *Agricultural Systems*, 173(October 2018), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.009>
- Henríquez, C., Méndez, J. C., & Masís, R. (2013). Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el análisis Kriging y su validación. *Agronomía Costarricense*, 37(2), 71–82. <https://doi.org/10.15517/rac.v37i2.12763>
- Herrera Salcedo, S., Valdez Cepeda, R. D., Vidales Contreras, J. A., Olivares Sáenz, E., Rodríguez Fuentes, H., Vazquez Alvarado, R., & Pando Moreno, M. (2007). Cambio Climático: Comportamiento De Las Temperaturas Extremas Y La Evaporación En Nuevo Leon, Mexico Climate Change: Extreme Temperatures Behavior and Evaporation in Nuevo Leon, Mexico. *Revista Chapingo Serie Zonas Aridas*, 6(2), 155–163.
<http://www.chapingo.mx/revistas/revistas/articulos/doc/rchszaVI1001.pdf%5Cnhttp://files/1140/rchszaVI1001.pdf>
- Higgins, G. M., & Kassam, A. H. (1981). The FAO Agro-ecological zone approach to determination of land potential. *Pedologie*, 2, 147–168.
- Hijmans, R. J., Guarino, L., & Mathur, P. (2012). *DIVA-GIS Version 7.5 Manual* (Issue 7.5). <http://www.diva-gis.org>
- Hijmans, R.J., Guarino, L., Cruz, M., & Rojas, E. (2001). Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data: 1. DIVA-GIS. *Plant Genetic Resources Newsletter*, 127, 15–19.
- Hijmans, Robert J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- IIASA/FAO. (2012). Global agro-ecological zone V4 – Model documentation. *Global*

Agro-Ecological Zone V4 – Model Documentation.

<https://doi.org/10.4060/cb4744en>

INEGI. (2021). *Fisiografía*. <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>

Jarvis, A., Lane, A., & Hijmans, R. J. (2008). The effect of climate change on crop wild relatives. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 126(1–2), 13–23.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.013>

Jiménez Córdova, A., Vargas Tristán, V., Salinas Castillo, W. E., Aguirre Bortoni, M. D. J., & Rodríguez Cabrera, D. (2004). Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geograficas*, 53, 58–74.

Kassam, A. H. (1979). The Agro-Ecological Zones Project. *ESA Special Publication*, 1020, 32–33. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979ESASP1020...32K>

Kurtzman, D., & Kadmon, R. (1999). Mapping of temperature variables in Israel: A comparison of different interpolation methods. *Climate Research*, 13(1), 33–43. <https://doi.org/10.3354/cr013033>

Lázaro, A., Ruiz, M., De La Rosa, L., & Martín, I. (2001). Relationships between agro/morphological characters and climatic parameters in Spanish landraces of lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 48(3), 239–249. <https://doi.org/10.1023/A:1011234126154>

Lleverino González, E., Ortiz Solorio, C. A., & Gutiérrez Castorena, M. del C. (2000). Calidad de los mapas de suelos en el ejido de Atenco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 18(2), 103–113.

Lobell, D. B. (2013). The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crops Research*, 143, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.08.008>

Maciel Torres, S. P., González Figueroa, S. S., Maltos Buendía, J., Hernandez-Leal, E., & Grageda Cabrera, O. A. (2020). EFECTO DE SUSTRATO CON COMPOSTA EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE TOMATE (*Solanum Lycopersicum* L.) EN

NUEVO LEÓN, MÉXICO. *Ciencia e Innovación Revista Científica Semestral Investigación, Desarrollo e Innovación*, 3(2), 437–442.

Manners, R., & van Etten, J. (2018). Are agricultural researchers working on the right crops to enable food and nutrition security under future climates? *Global Environmental Change*, 53(October), 182–194.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.09.010>

Manners, R., Vandamme, E., Adewopo, J., Thornton, P., Friedmann, M., Carpentier, S., Ezui, K. S., & Thiele, G. (2021). Suitability of root, tuber, and banana crops in Central Africa can be favoured under future climates. *Agricultural Systems*, 193, 103246. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103246>

Manners, R., Varela-Ortega, C., & van Etten, J. (2020). Protein-rich legume and pseudo-cereal crop suitability under present and future European climates. *European Journal of Agronomy*, 113(June 2018), 125974.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125974>

McBratney, A. B., Odeh, I. O. A., Bishop, T. F. A., Dunbar, M. S., & Shatar, T. M. (2000). An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 97(3–4), 293–327. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00043-4)

Mendoza Cariño, M., Bautista Olivas, A. L., Mendoza Cariño, D., Ortiz Solorio, C. A., Duarte Tagles, H., & Cruz Flores, G. (2021). Agroclimatic zoning of the state of Nayarit, Mexico. *Atmósfera*. <https://doi.org/https://doi.org/10.20937/ATM.53002>

Moghtaderi, G., & Khorramdel, F. (2014). EVALUATION OF CLIMATIC AGRICULTURAL POTENTIALS OF FARS PROVINCE USING PAPADAKIS TECHNIQUE. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 4(1), 60–70.

Montsant, A., Baena, O., Bernárdez, L., & Puig, J. (2021). Modelling the impacts of climate change on potential cultivation area and water deficit in five Mediterranean crops. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 19(2), e0301.
<https://doi.org/10.5424/sjar/2021192-17112>

- Oliver, M. A., & Webster, R. (2015). *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging* (S. I. P. A. S. is part of S. S. Media (ed.); 1er ed.). SpringerBriefs in Agriculture. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15865-5>
- Ortíz Solorio, C. A. (1987). *Evaluación de las tierras de México para la producción de maíz, frijol y sorgo en condiciones de temporal*. Serie Cuadernos de Edafología 8. Centro de Edafología.
- Ortíz Solorio, C. A. (2015). *Elementos de AGROMETEROLOGIA CUANTITATIVA con aplicaciones en la república mexicana* (C. A. Ortiz Solorio (ed.); 7°).
- Pájaro Huertas, D., & Ortíz Solorio, C. A. (1992). Estimación del periodo de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la República Mexicana. *Geografía Agrícola Analisis Regional de La Agricultura*, 17, 119–125.
- Palacios Romero, A., Rodríguez Laguna, R., & Hernández Flores, M. de la L. (2017). Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston basada en un modelo de nicho ecológico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(34), 035–046. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i34.81>
- Papadakis, J. (1970). *Climates of the World: Their Classification, Similitudes, Differences and Geographic Distribution*.
- Peter, B. G., Messina, J. P., Lin, Z., & Snapp, S. S. (2020). Crop climate suitability mapping on the cloud: a geovisualization application for sustainable agriculture. *Scientific Reports*, 10(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72384-x>
- Prakash, T. (2003). Land suitability analysis for agricultural crops: A fuzzy Multicriteria Decision Making Approach. In *MS Theses international institute for geo-information* http://itc.eu/library/Papers_2003/msc/gfm/prakash.pdf%5Cnhttp://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00298259/
- Ramirez Villegas, J., Jarvis, A., & Läderach, P. (2013). Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: The EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 67–78.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.005>

- Reid, R., Ryan, D. M., & Burt, R. L. (1976). EXPLORATION FOR, AND UTILIZATION OF, COLLECTIONS OF TROPICAL PASTURE LEGUMES II. The Papadakis system of climatic classification applied to testing areas in northern Australia. *Agro-Ecosystems*, 2, 309–318.
- Rivera Hernández, B., Aceves Navarro, L. A., Juárez López, J., Palma López, D. J., González Mancillas, R., & González Jiménez, V. (2012). Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 16(1), 29–47.
- Roy, P. C., Guber, A., Abouali, M., Nejadhashemi, A. P., Deb, K., & Smucker, A. J. M. (2019). Crop yield simulation optimization using precision irrigation and subsurface water retention technology. *Environmental Modelling and Software*, 119(June 2018), 433–444. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.07.006>
- Ruiz Vega, J. (1998). Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los valles centrales de Oaxaca. I. Determinación del potencial productivo. *Terra Latinoamericana*, 16(3), 269–275.
- Santillán Fernández, A., Vargas Cabrera, I. I., Pelcastre Ruiz, L. M., Carrillo Ávila, E., Alatorre Cobos, F., & Bautista Ortega, J. (2021). Resiliencia de la cobertura vegetal en el Suroeste de México ante los efectos del cambio climático. *Revista Peruana de Biología*, 28(2), e18187. <https://doi.org/10.15381/rpb.v28i2.18187>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. In *Diario Oficial de la Federación*. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002
- Shahriari, M., Delbari, M., Afrasiab, P., & Pahlavan-Rad, M. R. (2019). Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran. *Catena*, 182(June), 104149. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104149>

- SIAP. (2020). *Nuevo León Infografía agroalimentaria 2020*.
https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2020/Nuevo-Leon-Infografia-Agroalimentaria-2020
- Sikder, I. U. (2009). Knowledge-based spatial decision support systems: An assessment of environmental adaptability of crops. *Expert Systems with Applications*, 36(3 PART 1), 5341–5347.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.06.128>
- Silvar, C., Casas, A. M., Kopahnke, D., Habekuß, A., Schweizer, G., Gracia, M. P., Lasa, J. M., Ciudad, F. J., Molina-Cano, J. L., Igartua, E., & Ordon, F. (2010). Screening the Spanish Barley Core Collection for disease resistance. *Plant Breeding*, 129(1), 45–52. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2009.01700.x>
- Tian, Z., Zhong, H., Sun, L., Fischer, G., van Velthuisen, H., & Liang, Z. (2014). Improving performance of Agro-Ecological Zone (AEZ) modeling by cross-scale model coupling: An application to japonica rice production in Northeast China. *Ecological Modelling*, 290(C), 155–164.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.020>
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *Field Crops Research*, 143, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Van Wart, J., Kersebaum, K. C., Peng, S., Milner, M., & Cassman, K. G. (2013). Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Research*, 143, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.018>
- Van Wart, J., van Bussel, L. G. J., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N. D., Claessens, L., van Ittersum, M. K., & Cassman, K. G. (2013). Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research*, 143, 44–55.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.023>
- Vázquez González, A., & González Mancillas, R. (2017). ZONIFICACIÓN

AGROECOLÓGICA DEL PASTO (*Pennisetum purpureum* Schumach), VARIEDAD TAIWÁN EN CHIAPAS, MÉXICO. *Agroproductividad*, 10(2), 25–32.

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fap&AN=122441043&site=ehost-live>

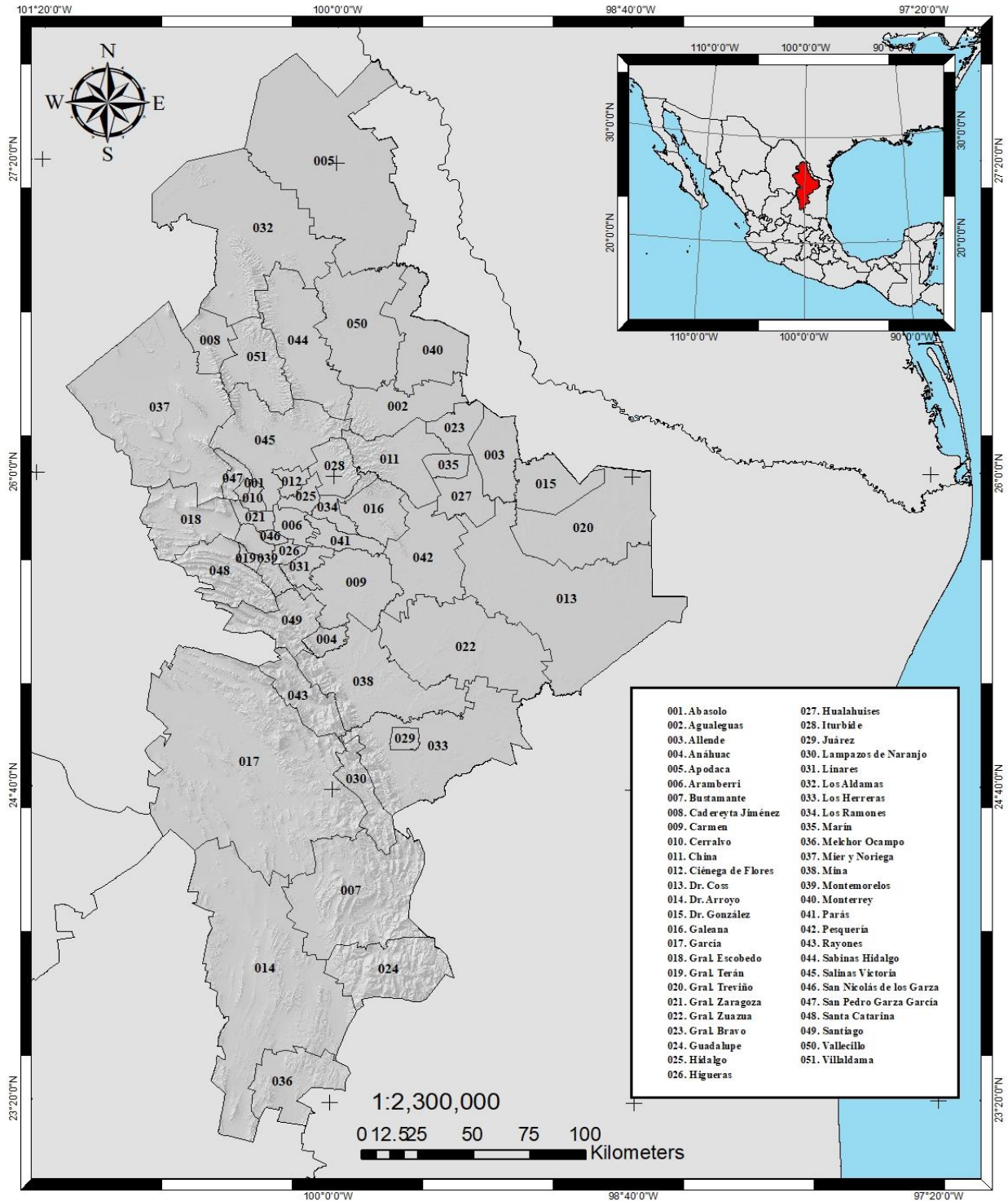
Velasco, I., & Pimentel, E. (2010). Zonificación agroclimática de Papadakis aplicada al estado de Sinaloa, México. *Investigaciones Geograficas, Boletin Del Instituto de Geografía, UNAM*, 73, 86–102.

Villareal Macés, S. G., & Díaz Viera, M. A. (2018). Geostatistical estimation of the spatial distribution of mean monthly and mean annual rainfall in Nuevo León, Mexico (1930-2014). *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(5), 106–127.
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-05>

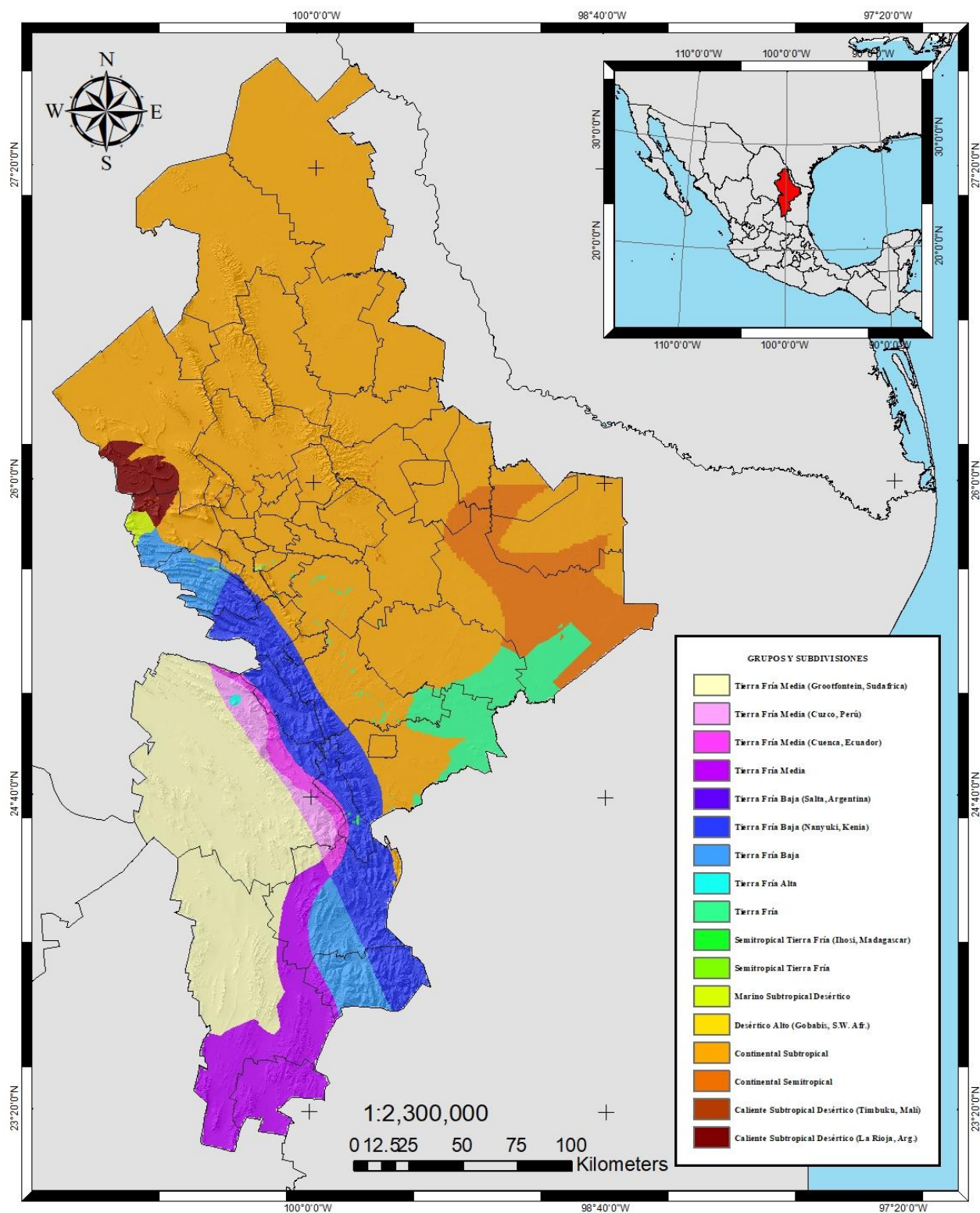
Zebec, V., & Plašć, I. (2020). *Delineation of Soil Texture Suitability Zones for Soybean Cultivation : A Case Study in Continental Croatia*. 823.

ANEXO

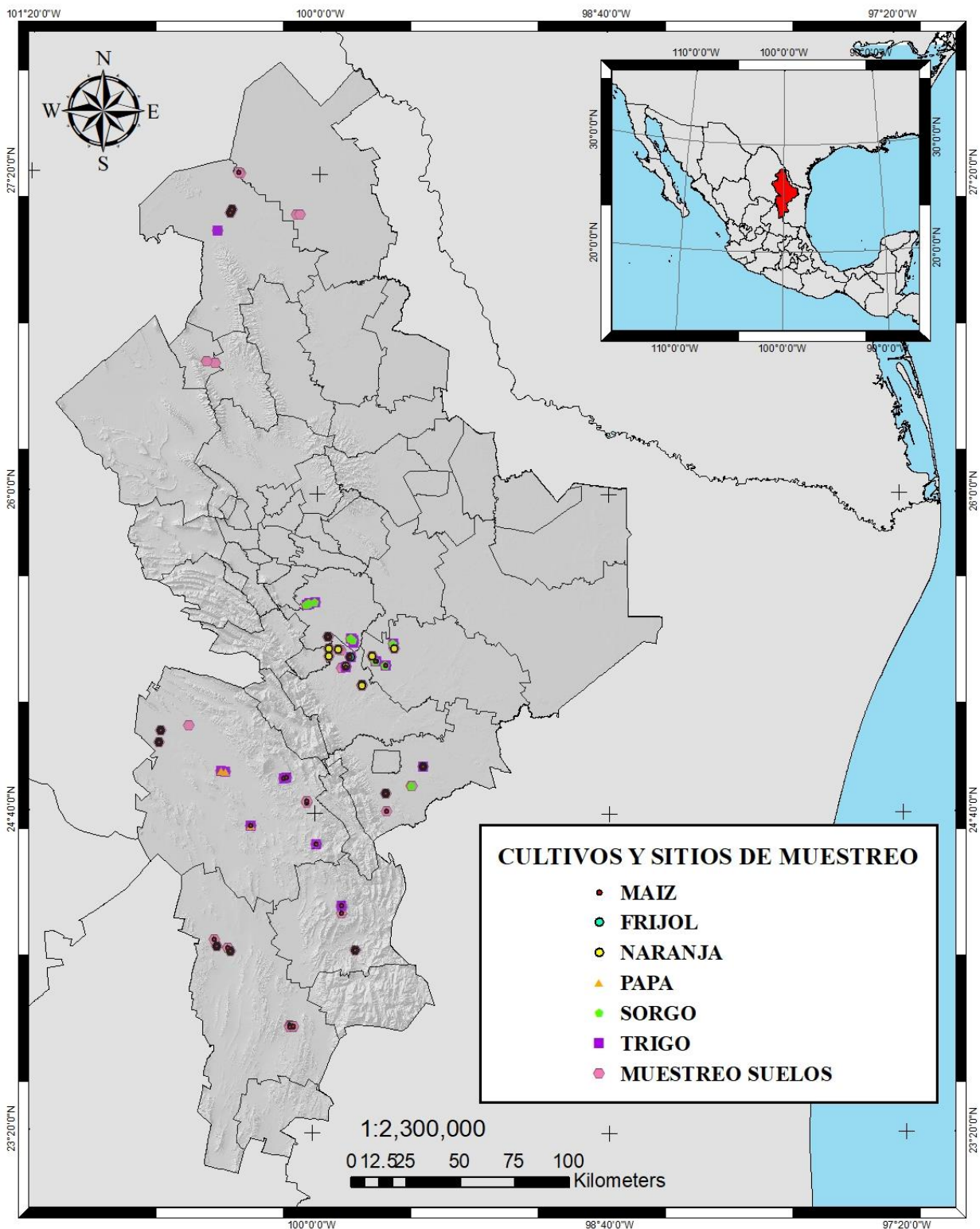
Municipios de Nuevo León



GRUPOS Y SUBDIVISIONES CLIMÁTICAS



MUESTREO EN CAMPO



División Climática

