



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

CAMBIO CLIMÁTICO: RIESGO QUE REPRESENTA A
LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ DE TEMPORAL EN
MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICA

P R E S E N T A :

MIRIAM RAQUEL RODRÍGUEZ CARRASCO

TUTOR

FRANCISCO ESTRADA PORRÚA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

«Everything I had worked for, all my years of study, had been to purchase for myself this one privilege: to see and experience more truths than those given to me by my father, and to use those truths to construct my own mind.»

Tara Westover

«It is, I promise, worse than you think.»

David Wallace-Wells

Agradecimientos

Quiero agradecer al doctor Francisco Estrada Porrúa por permitirme realizar esta tesis bajo su supervisión y por brindarme constantemente su guía y apoyo.

Agradezco a mis padres por su amor y su cariño, por permitirme soñar y forjarme mi propio camino, siempre asegurándome que tengo su apoyo incondicional.

Agradezco a mi hermana por ser mi mejor amiga y mi mayor pilar en cada uno de los retos a los que me enfrento. Eres el mejor ejemplo a seguir que tendré jamás y no puedo esperar para seguir recorriendo la vida contigo siempre a mi lado.

Agradezco también a todos los profesores que tuve el privilegio de tener en la universidad pues cada uno de ellos fue una inspiración para mí.

A todos los compañeros con los que pude trabajar en estos años y a los amigos que hice en el camino.

A mi familia: a mis primos, a mis tíos y a mis abuelos. En especial a mi abuelo José Carrasco por contagiarme el amor a la ciencia y por haberme alentado a emprender esta carrera.

Al profesor Zoilo Ramírez Maldonado cuya clase de física en el CCH Sur me cambió la vida, la pasión que tiene por su profesión hizo que yo quisiera seguirla. Su amistad todos estos años significa mucho para mí.

Finalmente, quiero agradecer a la Facultad de Ciencias de la UNAM por todas las oportunidades que me ha brindado y por el apoyo que sus trabajadores me han dado en cada etapa de mi vida escolar.

Índice general

1. Resumen	1
2. Panorama actual	5
2.1. Cambio climático	5
2.1.1. Efecto invernadero	6
2.1.2. Consecuencias del cambio climático	8
2.1.3. Trayectorias de Concentración Representativas	10
2.2. Agricultura y tipos de manejo	12
2.3. Maíz de temporal	12
2.4. Agricultura y cambio climático	14
3. Objetivos	17
4. Metodología y datos	18
4.1. Estadística multivariada	18
4.1.1. Análisis de componentes principales	18
4.1.2. Análisis de grupos	20
4.2. Base de datos y análisis de las entidades federativas	22
5. Resultados	28
5.1. Análisis de componentes para las 31 entidades	28
5.1.1. Comparación entre componentes: diagramas de dispersión	32
5.1.2. Agrupamiento de las entidades federativas	38
5.1.3. Rendimientos futuros de la producción de maíz	42
5.1.4. Índice de riesgo para el rendimiento en la producción de maíz	44
6. Discusión	47
6.1. Análisis de los grupos obtenidos	47
6.2. Proyecciones a futuro	50
6.3. Análisis del índice de riesgo	55
7. Conclusiones	59
Apéndice A. Cambios en rendimiento y producción	62
Apéndice B. Índice de riesgo	67

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IV
Apéndice C. Diagramas de dispersión	71
Bibliografía	74

1 Resumen

En el presente trabajo se realizó una evaluación del riesgo que representa el cambio climático para la producción de maíz de temporal en las entidades federativas de la República Mexicana. Este riesgo hace referencia a aquel que corren los estados con poblaciones altamente dependientes de la producción de maíz de temporal y con condiciones socioeconómicas precarias que puedan propiciar impactos importantes por cambio climático. Se utilizaron indicadores para representar las características sociales y económicas de cada entidad, así como indicadores para estimar el nivel de vulnerabilidad de las mismas. De igual modo, para obtener un panorama general de las características climáticas de cada entidad, se consideraron indicadores de temperatura y precipitación. Se utilizaron también como indicadores de productividad agrícola presente y futura, los rendimientos en la producción de maíz de temporal por entidad federativa para el periodo 2003-2012, así como los rendimientos proyectados para los periodos 2005-2035, 2035-2065 y 2069-2099 bajo el escenario RCP8.5 obtenidos de [1].

Con estos indicadores socioeconómicos, de temperatura y precipitación y de rendimiento en la producción de maíz en el periodo 2003-2012, se realizó un análisis de componentes principales para las 31 entidades federativas que producen este cultivo. Este análisis se hizo con el propósito de reducir la dimensionalidad del conjunto de variables sin tener una gran pérdida de información, así como para facilitar la interpretación de los datos y encontrar índices que ayuden a caracterizar la vulnerabilidad y riesgo en la producción de maíz de temporal en México. Se obtuvieron 4 componentes principales a los que posteriormente se les aplicó una rotación *varimax normalizada* para obtener una mejor interpretación. Estas componentes se muestran a modo de resumen en la siguiente tabla.

Componente	Descripción
1	Índice de marginación y pobreza
2	Índice de temperatura
3	Índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita
4	Índice de rendimiento en la producción de maíz

Los componentes principales obtenidos representan un total de 80.17 % de la varianza del conjunto de datos original y ayudan a identificar algunas características salientes sobre la producción de maíz de temporal, clima y condiciones socioeconómicas

de cada una de las entidades federativas. A partir de ellas, se realizó un agrupamiento jerárquico aglomerativo de las entidades usando el método de Ward. Las entidades fueron agrupadas en 7 conjuntos y se observó que estos tienen una estrecha relación con la ubicación geográfica de las ciudades y por consiguiente con su tipo de clima.

De igual modo, a partir de estos agrupamientos se analizaron las propiedades en común entre los estados de cada uno de los grupos para hacer una caracterización de cada grupo. Se observó que los grupos con mayor valor para el índice de temperatura coinciden con aquellos que tienen un mayor índice de rendimiento en la producción de maíz. Usando los rendimientos futuros de la producción de maíz se hizo un cálculo de los cambios porcentuales entre estos y los rendimientos en los años 2003-2012 originalmente considerados, para cada uno de los 7 grupos obtenidos.

Se considera que el grupo está en riesgo si está conformado por estados que tienen una proporción importante de población asociada a la actividad agrícola y que, a su vez, poseen condiciones socioeconómicas deficientes en cuanto al bienestar de su población, ya que estas características amplificarían los impactos adversos del cambio climático.

En el grupo 1 (Hidalgo, Puebla, Tlaxcala) se ubicaron estados en el centro del país y con climas templados. Las entidades en este grupo tienen un valor de índice de rendimiento en la producción de maíz bajo, así como uno en el índice de marginación y pobreza y de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita, medio. Debido a que no se muestra que el maíz de temporal sea un gran motor económico para las entidades de este grupo y a que los niveles de vulnerabilidad no son muy elevados, se identificó al grupo 1 como en menor riesgo de sufrir impactos socioeconómicos como consecuencia directa del cambio climático sobre la producción de maíz de temporal.

En el grupo 2 (Campeche, Quintana Roo, Tabasco, Yucatán) se encontraron estados al sur del país en la península de Yucatán. Estos tienen los climas más cálidos y altos valores en el índice de marginación y pobreza. Cuentan con los menores valores en el índice de rendimiento en la producción de maíz. Más aún, los estados en este grupo van a padecer los mayores cambios en futuros rendimientos con una pérdida de 10.79 % para el final de esta década y 73.98 % para el final del siglo. Por consiguiente, pese a no ser productores importantes de maíz de temporal, sus altos niveles de pobreza y de potenciales pérdidas hacen destacar al grupo como uno vulnerable a tener consecuencias socioeconómicas importantes por cambio climático si bien no a corto, si a largo plazo.

Los estados principalmente en el norte del país que cuentan con altos niveles de industrialización conforman el grupo 3 (Colima, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Sonora, Tamaulipas). Estos estados tienen climas cálidos y secos; así como también valores medianamente altos en el índice de rendimiento en la producción de maíz y bajos en marginación y pobreza. La economía de estas entidades no depende de la producción de maíz de temporal pues se ve enfocada en los sectores secundarios y terciarios. Así pues, se identificó a este grupo como en menor riesgo a sufrir impactos derivados de las consecuencias del cambio climático en la producción de maíz.

En el grupo 4 (Chiapas, Guerrero, Oaxaca) están los estados localizados al sur del país en la costa del Pacífico y que cuentan con un clima predominantemente cálido húmedo. Estos son los estados con los mayores valores en el índice de marginación y

pobreza, de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita. Asimismo, este grupo tendrá las mayores disminuciones en producción de maíz, alcanzando una pérdida de 544,109 toneladas de maíz a finales de siglo. Pese a que tienen valores en el índice de rendimiento en la producción de maíz medios, estos cuentan con una gran tasa de ocupación agropecuaria lo que, junto con su alta vulnerabilidad socioeconómica, indica que estos estados se encuentran en riesgo de sufrir pérdidas mayores.

El grupo 5 (Ciudad de México, Estado de México) está conformado por los estados en el centro del país con el mayor número de habitantes. Estos estados cuentan con valores medio-altos en el índice de marginación y pobreza y altos en el índice de rendimiento en la producción de maíz. A pesar de esto, estos estados cuentan con un bajo porcentaje de contribución al PIB estatal en actividades primarias y una tasa muy baja de ocupación agropecuaria. Adicionalmente, es el grupo que se enfrenta al menor cambio porcentual en el rendimiento en la producción de maíz a corto, mediano y largo plazo. Estos factores en conjunto indican que el riesgo que corren estos estados de verse afectados por las consecuencias del cambio climático directamente en la producción de maíz es bajo.

Al grupo 6 (Aguascalientes, Baja California, Chihuahua, Coahuila de Zaragoza, Durango, Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí, Zacatecas) pertenecen los estados principalmente en el norte del país y que no cuentan con costas. Estos estados tienen climas en su mayoría secos y semisecos y los valores en el índice de marginación y pobreza más bajos de entre los demás grupos. De igual modo, cuentan con valores bajos en el índice de rendimiento en la producción de maíz. Debido a que se trata de estados que cuya producción de maíz no es una actividad económica importante y cuyas tasas de ocupación agropecuaria son bajas, no se identificó a este grupo como vulnerable a experimentar impactos socioeconómicos importantes través de reducciones en los rendimientos de maíz de temporal.

En el grupo 7 (Jalisco, Michoacán de Ocampo, Sinaloa, Veracruz de Ignacio de la Llave) están estados ubicados principalmente en el centro del país y que cuentan con la mayor producción de maíz. Estos estados tienen valores medios en los índices de marginación y pobreza y de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita. Cuentan además con una alta tasa de ocupación agropecuaria y tienen una contribución importante al PIB estatal en actividades primarias. A su vez, este grupo cuenta con las segundas mayores pérdidas en producción de maíz, con pérdidas proyectadas para el final del siglo de 397,010 toneladas. Por lo tanto, la producción de maíz de temporal es una actividad económica y generadora de empleos en estas entidades y esto tiene como consecuencia que cambios en la producción de maíz de temporal puedan resultar en grandes pérdidas socioeconómicas.

A modo de complemento, se hizo un índice de riesgo tomando en cuenta los componentes principales obtenidos a través del análisis jerárquico para el periodo histórico de base y periodos a corto, mediano y largo plazo. Con este índice se caracterizó a grandes rasgos el riesgo que los impactos del cambio climático en el rendimiento en la producción de maíz representan para las condiciones socioeconómicas de cada entidad. Este índice tuvo una falta de sensibilidad temporal debido a la falta de indicadores, en especial de aquellos estimados para los periodos de tiempo futuros.

El presente trabajo sirve para dar un primer diagnóstico de los entidades federa-

tivas más vulnerables a padecer mayores afectaciones socioeconómicas como consecuencia del cambio climático en la agricultura de maíz de temporal. Sin embargo, es importante notar que pese a que no se identificaron a varios grupos como estar en alto riesgo de sufrir pérdidas como consecuencia del cambio climático sobre el rendimiento de maíz de temporal, el maíz de temporal es un gran cultivo de autoconsumo en México y es cultivado por pequeños agricultores en cada entidad federativa, con grados de variación en la cantidad. Por esta razón, cambios futuros en los rendimientos podrían significar grandes riesgos para el sustento de estos pequeños agricultores, en su mayoría partes de la población vulnerable económicamente. A su vez, estos cambios se podrían traducir en un incremento en la inseguridad alimentaria y en pérdida de ingresos al hogar, por lo que cualquier cambio al rendimiento de maíz de temporal, por más pequeño que sea, tiene potencial de afectar a las comunidades más desprotegidas y debe ser ampliamente considerado. Se requiere una investigación más profunda para tener una idea más clara respecto al riesgo que estas entidades podrían correr.

2 Panorama actual

2.1. Cambio climático

Entendemos como clima a las condiciones meteorológicas de una zona o región en específico durante un periodo de al menos 30 años [2,3]. El clima suele definirse como la descripción estadística en términos de media y variabilidad de las magnitudes meteorológicas a lo largo de un periodo de tiempo que puede ir de meses a miles o millones de años [4]. El periodo clásico para caracterizar estas variables es de 30 años, de acuerdo con la definición de la Organización Meteorológica Mundial [2].

Se define al cambio climático como a cualquier cambio sistemático en el estado del clima que puede identificarse por los cambios en la media y en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un periodo prolongado [4]. El clima global ha cambiado en el transcurso de la historia de la Tierra, desde eventos de glaciación a un periodo cálido de 243 millones de años desde el inicio del Mesozoico hasta el presente [5]. Estos cambios se han atribuido a procesos naturales como la configuración cambiante de los continentes, variaciones naturales de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), cambios en la irradiancia solar y variaciones en la órbita de la Tierra identificadas como el ciclo de Milankovitch [6,7].

El cambio climático ha sucedido en la mayor parte de la historia de la Tierra en escalas de décadas, cientos, miles y millones de años [4,7]. Durante el último millón de años, la temperatura media de la superficie de la Tierra ha aumentado y disminuido 5 °C en ciclos de aproximadamente cada 100,000 años [8]. Los cambios en el clima en el pasado han tenido causas naturales identificables; el cambio climático más reciente comenzó hace aproximadamente 260 años siendo resultado de las actividades humanas [4].

Hasta décadas recientes, los últimos 8,000 años, que incluyen la mayor parte de la historia humana registrada, habían sido relativamente estables [5]. Sin embargo, la temperatura media global ha aumentado desde el periodo de 1850-1900 a 2010-2019 en 1.07°C, debido a las intervenciones humanas [9]. La escala de los cambios recientes en el sistema climático no tiene precedente a lo largo de varios miles de años; cada una de las cuatro décadas más recientes ha sido más caliente que cualquier década precedente desde 1850 [9]. La temperatura media es ahora más alta que en cualquier otro momento en casi 1,400 años [10].

La tasa de cambio a la cual están sucediendo estos aumentos recientes en temperatura, ha sido al menos cuatro veces más rápida que en los eventos anteriores de calentamiento [11]. Desde finales del siglo XX se ha observado una aceleración de

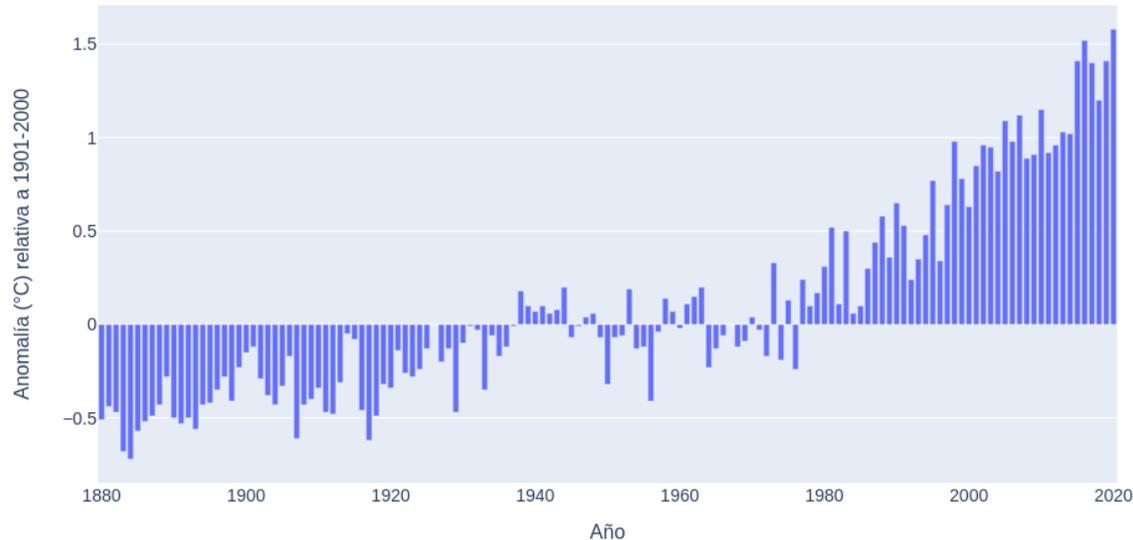


Figura 2.1: Anomalías en la temperatura media anual global en superficie con respecto al promedio 1901-2000. Gráfica hecha basada en los datos del NCDC NOAA [12].

calentamiento a partir de la década de 1970 mucho más rápida de lo que se había registrado en cualquier otro periodo en los últimos 2,000 años [9]. Esto se puede ver claramente en la Figura 2.1, donde se muestran las diferencias entre la temperatura media anual global en el periodo 1901-2000 y la temperatura media de cada año. Notamos que esta diferencia se ha hecho más grande de manera consistente desde finales de la década de 1980.

Este calentamiento global actual se debe principalmente a la quema de combustibles fósiles que generan emisiones de GEI [13]. Por lo tanto, los incrementos observados en las concentraciones de GEI desde 1750 son inequívocamente causados por actividades humanas [9]. Estas concentraciones han aumentado continuamente en la atmósfera, alcanzando un promedio anual en el 2019 de 410 ppm (partes por millón) para el dióxido de carbono (CO_2), 1866 ppb (partes por billón) para el metano (CH_4) y 332 ppb para el óxido nitroso (N_2O) [9].

2.1.1. Efecto invernadero

Para comprender el efecto invernadero es importante primero considerar el balance energético de la Tierra. El balance energético es el equilibrio entre la radiación solar que incide en la Tierra y la que ésta pierde hacia el espacio exterior [3]. La radiación solar y la terrestre ocupan diferentes rangos del espectro electromagnético; mientras que el Sol emite radiación visible y ultravioleta a la superficie de la Tierra, la Tierra emite en el infrarrojo de vuelta [14]. El vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases cuyas moléculas tienen momentos dipolares eléctricos absorben radiación más

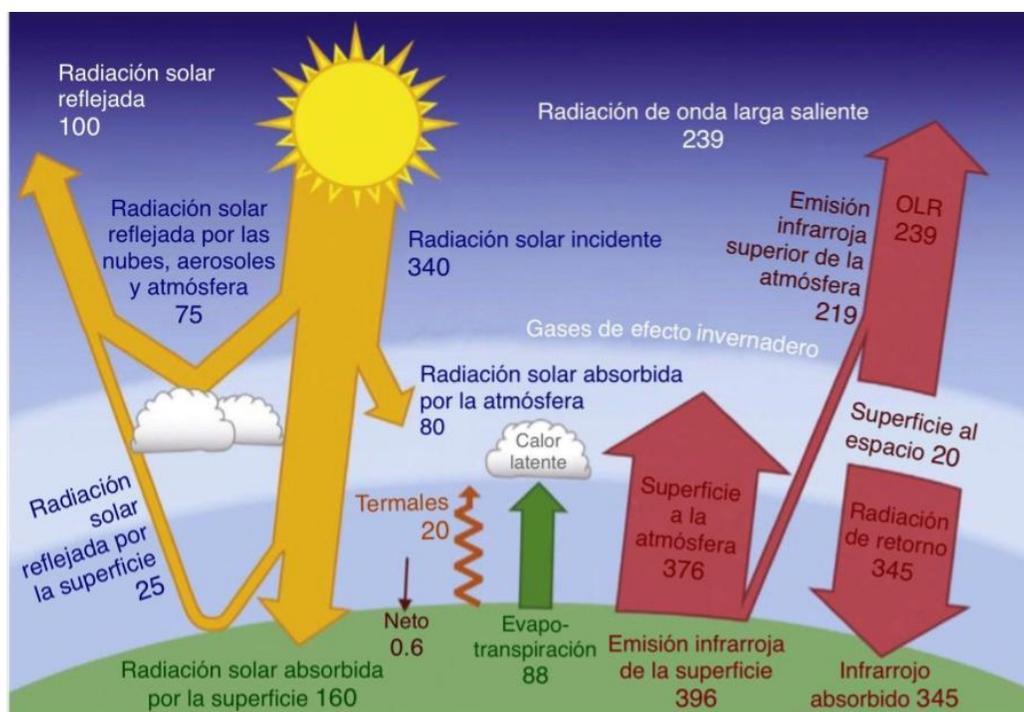


Figura 2.2: Diagrama de flujo de la energía radiativa y la no radiativa global y anual promedio para la Tierra y su atmósfera en unidades de Wm^{-2} . Imagen obtenida de Hartmann (2016) [16], traducida al español.

fuertemente en el rango de onda larga [15]. Esto tiene como consecuencia que la radiación solar incidente pase por la atmósfera de forma casi libre, mientras que la radiación terrestre emitida de la superficie de la Tierra es absorbida y re-emitida en su paso de regreso a través de la atmósfera [15].

En el balance de energía, la radiación solar tiene que ser igual a la radiación infrarroja saliente [14]. En la Figura 2.2 se muestran los intercambios de energía fundamentales en el sistema climático desde la parte superior de la atmósfera hasta llegar a la superficie. Vemos que, de la radiación solar incidente, una parte es reflejada por las nubes en la parte superior de la atmósfera, otra parte es absorbida por la misma atmósfera y otra es absorbida por la superficie terrestre. Para mantener el balance de energía, la superficie emite radiación en el rango del infrarrojo y de ésta, un porcentaje es emitido desde la parte superior de la atmósfera y otro es absorbido de regreso a la superficie. Un método que se usa para calcular la fuerza del efecto invernadero es comparar la diferencia entre esta emisión desde la parte superior de la atmósfera y aquella desde la superficie [16]. En el caso mostrado en la Figura 2.2 tenemos que la radiación infrarroja emitida desde la superficie es de 396 Wm^{-2} mientras que la emitida desde la parte superior de la atmósfera es de 239 Wm^{-2} . Esto da una diferencia de 157 Wm^{-2} , que expresa cuánto la atmósfera disminuye la energía que es emitida al espacio bajo el clima actual.

Por lo tanto, el efecto invernadero hace referencia al calentamiento de la Tierra que

se produce cuando los GEI que están en la atmósfera atrapan la radiación infrarroja emitida por la superficie que, de otro modo, escaparía al espacio [6]. La cantidad de radiación atrapada depende de la composición gaseosa de la atmósfera y de las propiedades espectrales de los gases [17]. Estos gases modifican el balance energético ya mencionado pues es mayor la cantidad de radiación visible y ultravioleta que incide en esta que la cantidad de radiación infrarroja que la Tierra emite desde la parte superior de la atmósfera [4]. El efecto invernadero es fundamental para el desarrollo de la biósfera pues sin este la temperatura promedio superficial terrestre sería de -21 °C [18], impidiendo la formación de agua en estado líquido, en lugar del promedio registrado en el 2021 de 14.74 °C [19].

Los principales GEI en el sistema natural son el agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y algunos químicos industriales llamados hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs), y hexafluoruro (SF_6) [4]. Los seres humanos hemos impactado las concentraciones de GEI, particularmente de CO_2 , CH_4 , N_2O y los HFCs, en los últimos 270 años [9].

Es importante hacer notar también que no todo el carbono liberado por la quema de combustibles fósiles ha permanecido en la atmósfera [20]. Estimaciones basadas en inventarios históricos sugieren que sólo la mitad del carbono liberado hasta la fecha permanece en la atmósfera como dióxido de carbono; la mayoría del carbono restante se disuelve en el océano de manera proporcional a su concentración en la atmósfera y otra parte la toman los ecosistemas terrestres [21, 22]. Esto se ve reflejado en los datos reportados en el *Presupuesto Mundial de Carbono 2021* donde se estima que las emisiones fósiles globales de CO_2 alcanzaron 36.4 Gt CO_2 (gigatoneladas de dióxido de carbono) en el año 2021, las emisiones provenientes de cambios en el uso de suelo, principalmente deforestación, fueron de 14.1 Gt CO_2 en la última década y el sumidero de CO_2 del océano fue de 10.3 Gt CO_2 por año durante la última década; de este modo los sumideros de CO_2 del suelo y océano combinados absorbieron alrededor del 53 % del CO_2 emitido a la atmósfera [23].

2.1.2. Consecuencias del cambio climático

El cambio climático representa un reto único para la economía pues en este ámbito se le considera como la mayor falla de mercado en la historia de la humanidad, debido a que las emisiones de GEI que lo causan son generadas como subproducto de las actividades económicas humanas [24]. El estudio del cambio climático desde el punto de vista económico tiene como objetivo la investigación de las causas y consecuencias de esta falla del mercado. Debido a que el clima y el ambiente tienen un impacto muy grande en diversos sectores de la economía como la agricultura, la salud y el agua, un aspecto importante es el cálculo de los impactos económicos que este fenómeno tendría en distintas escalas temporales y espaciales, en especial, los costos asociados a los efectos del cambio climático [25].

Cuando se habla de las consecuencias del cambio climático se suelen tener en mente los riesgos a futuro que este representa; sin embargo, éste ya está teniendo efectos observables [26]. El cambio climático ya ha generado alteraciones detectables en los sistemas naturales y humanos del planeta, entre estos cambios se encuentran

los aumentos en la frecuencia e intensidad de sequías e inundaciones [27, 28]. La actividad humana ha sido, desde la segunda mitad del siglo XX, la principal causante del incremento observado en la temperatura media global en la superficie [9, 29]. El calentamiento provocado por las emisiones antropogénicas de GEI desde el periodo pre-industrial hasta el presente va a persistir los próximos cientos de años y va a continuar causando cambios a largo plazo en el sistema climático del planeta [30]. Las proyecciones globales de incremento en la temperatura durante el siglo actual sugieren que el riesgo climático que enfrentan los agentes económicos probablemente aumentará de manera considerable tanto por eventos catastróficos como por no catastróficos [25].

Además del aumento en la temperatura, la precipitación global promedio sobre tierra también se ha visto en una tendencia de crecimiento desde 1950, y va a continuar en aumento debido al cambio climático. Estos cambios en la precipitación promedio exhiben una gran variación espacial. Mientras que algunas regiones van a experimentar aumentos, otras verán disminuciones importantes [31].

De igual modo, la actividad humana es el principal motor del declive global en glaciares desde la década de 1990 y de la disminución de la superficie de hielo en el Ártico, en el periodo 2011-2020 la superficie media anual de hielo marino en el Ártico alcanzó su nivel más bajo desde al menos 1850 [9]. El océano superior global se ha calentado desde la década de 1970 y es muy probable que la influencia humana sea el principal motor, así como también de la acidificación global de la superficie del océano abierto [9]. El nivel medio global del mar ha aumentado 0.20 m entre 1901 y 2018, más rápido desde 1900 que en cualquier otro siglo anterior en al menos los últimos 3,000 años [9]. Es probable que la proporción global de ocurrencia de ciclones tropicales importantes haya aumentado en las últimas cuatro décadas [9, 32].

Los efectos del cambio climático en regiones específicas van a variar conforme pasa el tiempo y con la habilidad de los sistemas sociales y ambientales de adaptarse o mitigar los efectos del mismo [30]. De acuerdo con el IPCC, la mayoría de las personas que se están viendo afectadas por estos fenómenos son habitantes de países de ingresos bajos y medios. Además del incremento en sequías e inundaciones, estas personas han experimentado también una disminución en seguridad alimentaria, que a su vez está relacionada con un aumento de migración y de pobreza [33].

En las primeras décadas del siglo XXI se espera ver impactos relativamente menores del cambio climático debido a que durante este tiempo los cambios en el clima serán menos pronunciados. Sin embargo, estos van a afectar particularmente a aquellos que son dependientes de la actividad agrícola y que cuentan con menores ingresos para hacer frente a estos impactos [34]. En contraste, durante la segunda mitad del siglo se esperan impactos biofísicos severos pero una mayor habilidad para enfrentarlos, por lo que la intensidad que estos efectos tendrán en la población y en los sistemas naturales dependerá crucialmente del futuro entorno político [34].

De acuerdo con el Banco Interamericano del Desarrollo, la región de Mesoamérica¹ es una de las regiones más vulnerables al cambio climático pese a que los países que comprenden esta región sólo contribuyen con aproximadamente un 3% a las

¹La región de Mesoamérica comprende a los países de Belice, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá y República Dominicana.

emisiones globales de GEI [35]. Se identifica a esta región como altamente vulnerable a los efectos del cambio climático debido a varias causas, entre estas se encuentra el incremento en frecuencia e intensidad de huracanes en la región, la dependencia de las economías a actividades sensibles al clima, los altos niveles de pobreza, entre otros [35].

Particularmente, en el caso de México los expertos afirman que es altamente vulnerable a los impactos físicos del cambio climático [35,36]. Se estima que las pérdidas acumuladas al 2100 alcanzarían un valor presente de \$550,000 millones de dólares y \$2.3 billones de dólares, en un escenario de inacción mundial [25]. Debido a su ubicación entre dos océanos y a su compleja topografía, México es un país propenso a eventos hidrometeorológicos como ciclones tropicales, olas de calor e inundaciones. Esta vulnerabilidad geográfica se ve aún más intensificada por la brecha de riqueza que existe [37], y debido a la vulnerabilidad del recurso hídrico debido a la poca disponibilidad actual de agua dulce y a las consecuencias sugeridas por las proyecciones realizadas [35].

En México ya se han registrado cambios en el sistema climático. Se ha observado que la precipitación en época de lluvias ha tenido un aumento constante, con una tendencia de aumento en humedad, mientras que la época de sequía permanece sin cambios pero con una estación mucho más seca [38]. Asimismo, se prevé que durante las próximas décadas algunas regiones del país enfrentarán cambios en el clima que podrían comprometer significativamente sus ecosistemas y biodiversidad [35]. Lo que es aún más importante es que no todas las regiones del país corren el mismo riesgo a los múltiples efectos del cambio climático, por lo que es necesario hacer múltiples análisis sobre la vulnerabilidad de cada entidad federativa para tomar medidas de adaptación y reducción de riesgo adecuadas para cada caso [25].

Bajo un escenario de inacción, es decir en el cual las emisiones de GEI siguen aumentando sin control, se estiman incrementos de por lo menos 2 °C en la temperatura anual durante las décadas de 2030 para el norte del país y 2040 para la región sur; el umbral de 4 °C en la temperatura actual podría alcanzarse en el año 2070 en algunas regiones del norte de México [25]. Mientras que en el sureste, centro y costa del Pacífico podría experimentarse una disminución en precipitación de entre el 10 y el 20 % [25]. Debido a esto, el cambio climático plantea importantes retos para el país durante este siglo.

2.1.3. Trayectorias de Concentración Representativas

Las Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs, por sus siglas en inglés) fueron introducidas en el Quinto Informe de Evaluación realizado por el IPCC en el año 2014. Estas trayectorias describen cuatro vías diferentes para el desarrollo del planeta para el siglo XXI en cuanto a emisiones y concentraciones atmosféricas de GEI, emisiones de contaminantes atmosféricos y uso de suelo [39]. Los RCPs se han desarrollado utilizando diversos Modelos de Evaluación Integrada para producir una amplia gama de simulaciones de modelos climáticos que permiten explorar sus consecuencias en el sistema climático [40]. Estas proyecciones climáticas, a su vez, se utilizan para evaluar los potenciales impactos y medidas de adaptación.

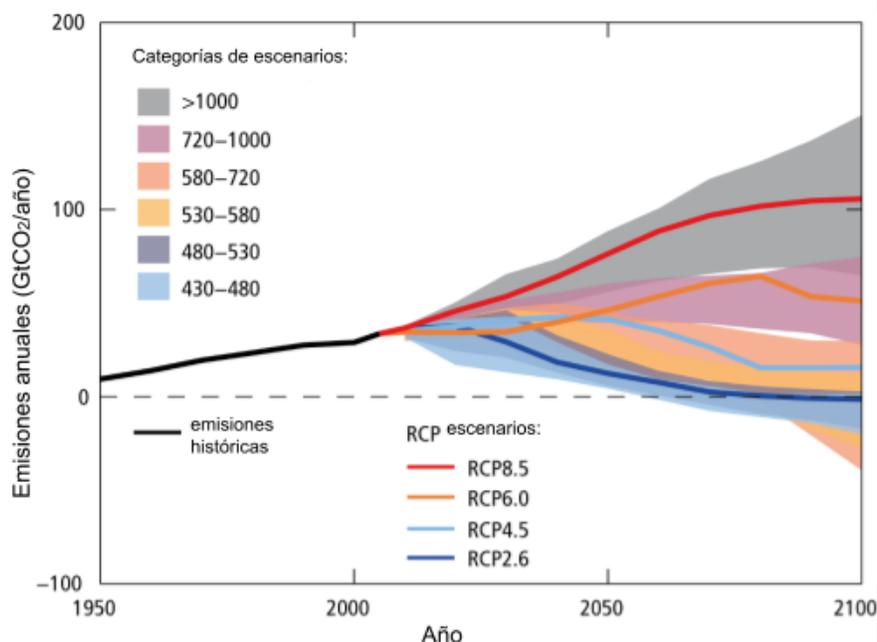


Figura 2.3: Emisiones de CO₂ bajo las trayectorias de concentración representativas y las categorías de escenarios utilizadas por el Grupo de Trabajo III del IPCC. Imagen obtenida de Pachauri y Meyer (2014) [26].

Los escenarios de emisiones también se utilizan para evaluar los costos asociados a las reducciones de emisiones coherentes con determinadas trayectorias de concentración. Los RCPs representan una selección de la enorme gama de emisiones de GEI que hay en la literatura. Estos incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2.6), dos escenarios de emisiones intermedios (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con emisiones de GEI muy altas (RCP8.5) [39]. En la Figura 2.3 se muestran las emisiones anuales de GEI que corresponden a cada uno de los escenarios RCP, en la zona sombreada se representa la gama de resultados de los modelos consultados para la realización del Quinto Reporte del IPCC identificados en categorías definidas en base a los niveles de concentración equivalentes de CO₂. El número asociado a cada trayectoria hace referencia al forzamiento radiativo al cual se llegaría en 2100 bajo esa vía. Por ejemplo, en la trayectoria RCP8.5 el forzamiento radiativo aumentaría durante todo el siglo hasta llegar a 8.5 W/m²; este escenario se caracteriza por un incremento de las emisiones de GEI a lo largo del tiempo que conduce a altas concentraciones de los mismos [41]. Los escenarios sin esfuerzos adicionales para limitar las emisiones conducen a trayectorias que oscilan entre el RCP6.0 y el RCP8.5, mientras que en los escenarios RCP4.5 y RCP6.0 se tratan de escenarios de estabilización donde se emplean un rango de tecnologías y estrategias para reducir la emisión de GEI [41]. El RCP2.6 es representativo de un escenario que pretende mantener el calentamiento global por debajo de los 2 °C respecto a las temperaturas preindustriales; para alcanzar esos niveles de forzamiento radiativo, las emisiones de GEI son reducidas de

manera sustancial a lo largo del tiempo [41].

2.2. Agricultura y tipos de manejo

A nivel global, la agricultura se puede caracterizar en función del manejo hídrico como de temporal y de riego. La agricultura de riego es aquella que no depende de las lluvias, sino que supone el suministro continuo de agua [42]. En este ámbito, uno de los sistemas más utilizados es el riego por surcos o el riego por aspersión [42, 43]. Por otro lado, la agricultura de temporal es aquella que depende de los temporales de lluvia para que las plantas cultivadas se desarrollen apropiadamente [44].

La agricultura de temporal es la principal fuente de producción mundial, ya que representa más del 80 % de las tierras cultivadas y el 60 % de la producción mundial de cultivos [45]; a su vez comprende el 90 % de tierra cultivada en Sub-Sahara África y el 60 % en Latinoamérica [44]. Debido a esto, es una parte importante de la nutrición a nivel mundial y está fuertemente relacionada con la seguridad alimentaria en países en desarrollo.

En México la mayoría de los cereales son cultivados en el régimen de agricultura de temporal [44]. En el año 2020, 71 % de la producción agrícola cosechada fue de temporal [46], así como el 59 % de la tierra de la agricultura de temporal fue dedicada al maíz. Cabe hacer notar que en este país el sector agropecuario, que comprende la agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza, representa el 3.8 % del PIB nominal para el año 2020 [47]. Este sector da empleo y sustento a cientos de miles de familias mexicanas pues se tiene que el 4.5 % de la población trabaja en la preparación y cosecha de la tierra [48]. Según un análisis realizado en el 2016, el 65 % de los adultos viviendo en pobreza trabajan en actividades agrícolas [49, 50].

2.3. Maíz de temporal

Aproximadamente el 40 % de la energía calórica en las dietas humanas se obtienen de tres grandes cultivos globales: maíz, trigo y arroz [51, 52]. El maíz es uno de los principales alimentos en el mundo y es un cultivo básico de alto rendimiento, con una superficie media cosechada de 201 millones de hectáreas y una producción de 1.16 gigatoneladas [53]. Más aún, es una fuente vital de seguridad alimentaria en muchos países en desarrollo de América Latina y de África [54, 55].

El maíz es el cultivo más importante de México, no sólo desde el punto de vista alimentario, sino también desde los puntos de vista social y cultural; con algunas teorías incluso sugiriendo que la domesticación del maíz se llevó a cabo en este país [55]. Se produce en los ciclos primavera-verano y otoño-invierno y bajo condiciones agroclimáticas diversas [48]. Este cuenta con un consumo anual promedio per cápita al año de 335 kg de maíz [48, 56]. Este consumo se ve reflejado principalmente en tortillas y representa el 20.9 % del gasto total en el rubro de Alimentos, Bebidas y Tabaco realizado por las familias mexicanas, dato reportado por la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en el

año 2017 [57].

México es uno de los principales productores a nivel mundial de este cultivo, en el año 2020 se produjeron en el territorio mexicano más de 27 millones de toneladas de maíz en una superficie sembrada de más de 7 millones de hectáreas, siendo el séptimo productor mundial del mismo [46, 53]. Al menos la mitad de esta área total se cultiva para uso propio y comprende la base nutricional de al menos 20 millones de personas, particularmente en zonas de bajos ingresos [58].

En México se producen principalmente dos variedades de maíz: blanco y amarillo [57]. De estos 27 millones de toneladas producidas en el 2020, 13.85 toneladas fueron maíz de grano de los cuales 12.66 fueron de maíz de grano blanco y 1.12 de amarillo [46, 59]. El maíz blanco se produce exclusivamente para el consumo humano y satisface la totalidad del consumo nacional; mientras que el maíz amarillo se destina principalmente a la industria o la fabricación de alimentos balanceados para la producción pecuaria, la producción de este último satisface sólo 24 % del requerimiento nacional [57].

El maíz sembrado y cosechado en México es, en su mayoría, de temporal [46, 57]. Por lo que la producción de estos cultivos depende del comportamiento de las lluvias y de la capacidad del suelo para captar el agua. Una ventaja de este tipo de producción es que, al no tener que invertir en un sistema de irrigación, los costos de producción se ven reducidos [60]. En consecuencia, este depende altamente de la precipitación estacional. Las particularidades económicas y climáticas de ésta producción crean un vínculo directo entre la cantidad de precipitación, la producción, la seguridad alimentaria y el bienestar humano, lo que conlleva a un alto riesgo social ante el cambio climático [58].

La producción de maíz de temporal en México está ligada al autoconsumo [48]. Esto se ve reflejado en que en el año 2016, el 18 % del maíz blanco cultivado fue destinado a este propósito [57]. Es importante notar que esta producción de autoconsumo no sólo se destina a la alimentación familiar, sino también a la alimentación de ganado, uso de semillas para el próximo ciclo y almacenaje [61].

El maíz de temporal es principalmente producido por 2.6 millones pequeños productores que lo cosechan en granjas con un tamaño promedio menor a 5 hectáreas, donde este representa uno de los principales pilares de seguridad alimentaria para estas familias rurales que se encuentran generalmente viviendo en condiciones de marginación y pobreza [62]. En su artículo del 2021, Bellón *et al.* estudiaron la distribución de los municipios donde el maíz de temporal es producido por pequeños productores y concluyeron que este territorio concentra el 65 % de la población total del país, 81 % de la población rural y 91 % de la población indígena [63]. Se ha estimado que el área cosechada por estos pequeños productores tiene el potencial de alimentar a 54.7 millones de personas en México [64]. Estos pequeños productores, al juntarse con los medianos productores, generan aproximadamente el 75 % del maíz nacional y, en lo que respecta a la superficie sembrada, comprenden el 91 % de la superficie sembrada total de maíz en México [65].

Es importante hacer énfasis que estos agroecosistemas de maíz de temporal son altamente sensibles a la variabilidad de la precipitación. En el pasado, muchas de las mayores caídas en la productividad de los cultivos se han atribuido a eventos de pre-

precipitaciones anómalas [66,67]. Una evidencia de esto surge al comparar la producción total de maíz en periodos de años con niveles de precipitación contrastantes. Baja precipitación en México durante 1997-1998, periodo que coincidió con el evento de El Niño más severo registrado, llevó a un decremento de 25 % en la producción total de maíz [68]. En contraste, se documentó una producción de maíz récord durante el periodo húmedo 1991-1993 [68]. Por lo tanto, es crucial tener en cuenta los cambios en las condiciones climáticas que este cultivo pueda enfrentar.

2.4. Agricultura y cambio climático

Las actividades agrícolas y forestales y los cambios en el uso de la tierra que se originan de éstas son responsables del 18.4 % de las emisiones de gases de efecto invernadero [69]. A su vez, el cambio climático tiene impactos tanto directos como indirectos en los sistemas de producción agrícola [70]. Entre los impactos directos se incluyen los efectos que son consecuencia de la modificación de características físicas tales como los niveles de temperatura y la distribución de precipitación [71]. Por otro lado, los efectos indirectos son aquellos que afectan la producción a través de cambios en polinizadores, plagas, enfermedades y especies invasivas [71]. Estos efectos indirectos son de alta importancia pues son más difíciles de evaluar y estimar a futuro debido al elevado número de parámetros que interactúan [70].

Respecto a los impactos directos sobre los sistemas de producción agrícola, se ha mencionado que una consecuencia del cambio climático es la alteración de los patrones hidrológicos globales con cambios de gran escala en la cantidad de eventos extremos de precipitación, descargas fluviales y sequías [72], así como cambios en la estacionalidad pluvial en los trópicos [73]. Estas alteraciones hidrológicas han hecho que la disponibilidad de agua sea menos predecible en términos de cantidad y de temporalidad, un patrón que es probable se refuerce en el futuro [31]. Asimismo, como resultado del aumento de GEI en la atmósfera se tiene un incremento de temperatura terrestre [9]. Dependiendo del régimen climático y de la disponibilidad de recursos del suelo, este incremento puede tener efectos tanto positivos como negativos sobre el potencial productivo del suelo [74]. Un aumento en la temperatura acelera el proceso de maduración de los cultivos, reduce la duración del área foliar y con ello el requerimiento hídrico total a la madurez del cultivo. Pero, al acelerarse el proceso de maduración de las plantas, se está acortando su ciclo biológico y por ende su etapa reproductiva, causando una disminución en el rendimiento económico de los cultivos [74]. Por lo tanto, debido a su gran tamaño y a su sensibilidad, se considera a la agricultura como el sector más vulnerable a los impactos económicos del cambio climático [75].

Todos estos son efectos que podrían impactar negativamente los patrones de producción agrícola [71], pues la agricultura, particularmente la de temporal, es fuertemente dependiente de los patrones previsibles. Para los productores agrícolas implica un desafío cubrir las necesidades de agua de los cultivos cuando no se tiene una previsibilidad confiable de la temporalidad y de la cantidad de precipitación. Esto a su vez conlleva a una disminución en las cosechas y un aumento en el precio de las mismas [70]. Los impactos proyectados del cambio climático en el rendimiento de

los principales cultivos se encuentran ya bien documentados y, a nivel mundial, los impactos negativos son más frecuentes que los positivos [70, 76]. Más aún, las observaciones de los efectos de las tendencias climáticas en la producción de cultivos indican que los rendimientos de trigo y de maíz ya se van visto negativamente afectados en muchas regiones, afectando la capacidad de los recursos naturales para sostener la demanda alimentaria de la población mundial en crecimiento [77]. Esto se traduce en una afectación significativa a la seguridad alimentaria a nivel global, regional y local [30, 78]; así como en sus cuatro dimensiones que comprende la seguridad alimentaria, es decir, la disponibilidad de comida, acceso a la comida, estabilidad de recursos alimenticios y utilización de comida [34]. La magnitud de los impactos del cambio climático en la seguridad alimentaria va a ser diferente entre regiones y entre escalas de tiempo y va a depender del estatus socioeconómico que tenga el lugar donde suceden estos efectos [34]. La seguridad alimentaria y el cambio climático son, por lo tanto, retos conectados que tienen que tratarse de manera simultánea [77]. Otro punto a considerar es que ha sido reconocido que los países en desarrollo en general sufrirán más pérdidas debido a los efectos del cambio climático en la agricultura que otros países [79] [80], por lo que se encuentra en riesgo no sólo la seguridad alimentaria, sino también el crecimiento económico impulsado por la agricultura y la reducción de la pobreza.

Las posibles consecuencias de estos cambios en la seguridad alimentaria no son algo lejano, una reducida producción de alimentos como consecuencia del cambio climático ya ha sido reportada [29]. Las tendencias del clima observadas durante el periodo 1980-2008 ya han producido decrementos de aproximadamente 5.5 % en producción de trigo a escala global, mientras que la producción global de arroz ha permanecido estable [81]. Globalmente los impactos del cambio climático se predice que serán negativos para la mayoría de los cultivos, con un decremento de cosechas globales de hasta -2 % por década [82]. En el caso del maíz, se ha proyectado para las regiones en el este y sur de África, que su rendimiento va a disminuir por 21 %, 33 % y 50 % bajo los escenarios de cambio climático de 1, 2 y 4 °C respectivamente, eso bajo climas más cálidos y secos [83]. Asimismo, en su artículo publicado en 2003, Jones y Thornton encontraron que la producción de maíz va a disminuir por lo menos un 10 % en América Latina y África bajo varios escenarios para el año 2055 [84].

De la misma manera, se han estudiado los impactos del cambio climático y la vulnerabilidad de la agricultura en México; actualmente, uno de los impactos más documentados es el caso de las sequías, que se están teniendo cada vez con más frecuencia y que en el pasado ya han provocado pérdidas en agricultura y ganadería que han llegado a ser hasta del 50 % [25]. En el caso de México, se espera que el cambio climático tenga efectos altamente negativos en el rendimiento en de la tierra cultivada para el maíz de temporal [85, 86]; particularmente, se esperan cambios en el desarrollo y productividad de este cultivo debido a los cambios en los ciclos fenológicos debido al incremento en el periodo libre de heladas de las zonas agrícolas y la reducción en la superficie cultivable [35].

En su artículo de 2018, Murray *et al.* concluyeron que el cambio climático podría afectar al sector agrícola no sólo por los cambios en la disponibilidad de agua y el alargamiento de la temporada de sequías, sino también por cambios en el uso

del suelo en México [58]. Una disminución continua de precipitación en un área con clima húmedo puede conducir a los agricultores a cambiar su tipo de producción. Sin embargo, muchos de los pequeños productores que cultivan maíz de temporal no podrían cubrir los costos para poder cultivar maíz de irrigación [87].

Finalmente, se sabe que el cambio climático va a tener impactos adversos que se verán de manera desproporcionada en la población viviendo en pobreza particularmente en países en desarrollo [34], así como que va a aumentar e intensificar el riesgo a la seguridad alimentaria para estas poblaciones vulnerables. Debido a esto, se podría esperar un aumento en la migración procedente de México. En su artículo publicado en 2010, Feng, Krueger y Oppenheimer examinaron los vínculos entre las variaciones climáticas, la producción agrícola y las respuestas migratorias de la población. A partir de sus estudios estimaron que para el año 2080, el cambio climático inducirá que entre 1.4 y 6.7 millones de adultos mexicanos emigren como resultado de los declives en la productividad agrícola [88]. Esto ya se ha reflejado en las décadas comprendidas en 1970-2009 en las cuales los flujos migratorios máximos correspondieron a años con baja precipitación, habiendo en particular un triple aumento de migración durante épocas de sequía [89].

3 Objetivos

- Realizar un análisis del riesgo que podría enfrentar el cultivo del maíz de temporal en las entidades de la República Mexicana y los posibles impactos socioeconómicos que un cambio en su rendimiento podría significar tomando como referencia indicadores socioeconómicos, climáticos y de productividad agrícola, e incorporando los rendimientos proyectados bajo el escenario RCP8.5 a corto, mediano y largo plazo en el análisis del riesgo.
- Realizar un índice de riesgo con base en los componentes principales obtenidos para los periodos de tiempo presentes y futuros bajo el escenario RCP8.5 para catalogar la vulnerabilidad de las entidades federativas.

4 Metodología y datos

4.1. Estadística multivariada

4.1.1. Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica de análisis variado cuyo objetivo es reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos [90]. Este análisis, además de reducir la dimensionalidad de un conjunto de variables relacionadas, permite retener la mayoría de la varianza del conjunto de datos original [91]. Esta reducción se logra transformando el conjunto a uno nuevo, el de los componentes principales. Estos componentes no están correlacionados y se encuentran ordenados de modo que los primeros son los que retienen la mayor parte de la variación presente en el conjunto original [90]. Más aún, estas nuevas variables son combinaciones lineales de las variables originales [92].

Es decir, dadas múltiples observaciones de un $(K \times 1)$ vector de datos \mathbf{x} , este análisis encuentra $(M \times 1)$ vectores \mathbf{u} cuyos elementos son combinación lineal de los elementos de \mathbf{x} . El análisis de componentes principales es más efectivo cuando esta compresión de datos se logra de modo que $M \ll K$. Esto último sucede cuando hay correlaciones substanciales entre las variables en \mathbf{x} . A los elementos del nuevo vector \mathbf{u} los llamamos los componentes principales (CP) [92].

El primer paso para construir los componentes principales de un vector \mathbf{x} es buscar una función lineal u_1 de los elementos de \mathbf{x} tal que esta tenga una varianza máxima, es decir, dado:

$$u_1 = \mathbf{a}_1' \mathbf{x} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1p}x_p = \sum_{i=1}^p a_{1i}x_i$$

donde tenemos que \mathbf{a}_1 es un vector con p elementos constantes $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1p}$ y el símbolo $'$ denota a la transpuesta. De este modo tenemos que \mathbf{a}_1 es el vector que maximiza la varianza de \mathbf{x} , por lo tanto, este será el primer componente principal. Se pueden definir hasta p componentes principales, sin embargo, en general se espera que la mayor parte de la varianza de \mathbf{x} esté en los primeros m componentes, donde $m \ll p$. Nombremos ahora \mathbf{S} a la matriz de covarianza de \mathbf{x} . Es decir, es la matriz cuyo elemento (i, j) es la covarianza entre los elementos i y j de \mathbf{x} cuando $i \neq j$, y la varianza de j cuando $i = j$.

Ahora, tenemos que para $k=1, 2, \dots, p$, el componente principal número k está dado como $u_k = \mathbf{a}_k' \mathbf{x}$, donde \mathbf{a}_k es el eigenvector de \mathbf{S} que corresponde a su k eigenvalor más

grande, λ_k . Más aún, si elegimos \mathbf{a}_k de modo que éste esté normalizada ($\mathbf{a}'_k \mathbf{a}_k = 1$), entonces tendremos que $\text{var}(u_k) = \lambda_k$, donde $\text{var}(u_k)$ denota la varianza de u_k [90].

Para obtener la forma que toman los componentes primero debemos considerar $\mathbf{a}'_1 \mathbf{x}$. Donde \mathbf{a}_1 es el vector que maximiza $\text{var}(\mathbf{a}'_1 \mathbf{x}) = \mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_1$. Debido a que el máximo se va a alcanzar para un \mathbf{a}_1 finito, es necesario establecer la condición de normalización $\mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1 = 1$. Para maximizar $\mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_1$ se usa la técnica los multiplicadores de Lagrange. Es decir, se busca maximizar:

$$\mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_1 - \lambda(\mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1 - 1)$$

donde λ es el multiplicador de Lagrange. Derivando con respecto a \mathbf{a}_1 e igualando a cero para encontrar el máximo tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\mathbf{a}_1} (\mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_1 - \lambda(\mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1 - 1)) &= 0 \\ \Rightarrow \mathbf{S} \mathbf{a}_1 - \lambda \mathbf{a}_1 &= (\mathbf{S} - \lambda \mathbf{I}_p) \mathbf{a}_1 = 0 \end{aligned}$$

donde \mathbf{I}_p es la matriz identidad de $(p \times p)$. Por lo tanto, tenemos que λ es un eigenvalor de \mathbf{S} y más aún, \mathbf{a}_1 es su eigenvector correspondiente. Para decidir cuál de los p eigenvectores produce la máxima varianza de $\mathbf{a}'_1 \mathbf{x}$, notemos que la cantidad a ser maximizada es λ pues:

$$\mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_1 = \mathbf{a}'_1 \lambda \mathbf{a}_1 = \lambda \mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1 = \lambda$$

Tenemos entonces que \mathbf{a}_1 es el eigenvector correspondiente al eigenvalor más grande de \mathbf{S} , que es $\lambda_1 = \text{var}(\mathbf{a}'_1 \mathbf{x}) = \mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_1$.

De manera análoga, podemos encontrar el segundo componente principal $u_2 = \mathbf{a}'_2 \mathbf{x}$ que maximice $\mathbf{a}'_2 \mathbf{S} \mathbf{a}_2$. Este componente está sujeto a no estar relacionado con el primero. Es decir, debe cumplirse que $\text{cov}(\mathbf{a}'_1 \mathbf{x}, \mathbf{a}'_2 \mathbf{x}) = 0$, donde $\text{cov}(x, y)$ denota la covarianza entre las variables aleatorias x y y . Pero tenemos que:

$$\text{cov}(\mathbf{a}'_1 \mathbf{x}, \mathbf{a}'_2 \mathbf{x}) = \mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_2 = \mathbf{a}'_2 \mathbf{S} \mathbf{a}_1 = \mathbf{a}'_2 \lambda_1 \mathbf{a}_1 = \lambda_1 \mathbf{a}'_2 \mathbf{a}_1 = \lambda_1 \mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_2 = 0$$

Notemos ahora que cualquiera de las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_2 &= 0, & \mathbf{a}'_2 \mathbf{S} \mathbf{a}_1 &= 0 \\ \mathbf{a}'_2 \mathbf{a}_1 &= 0, & \mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_2 &= 0 \end{aligned}$$

podría ser usada para especificar que no hay correlación entre $\mathbf{a}'_1 \mathbf{x}$ y $\mathbf{a}'_2 \mathbf{x}$. Eligiendo arbitrariamente la primera y la cuarta expresión, y notando nuevamente que la normalización es necesaria, tenemos que la cantidad a maximizar es:

$$\mathbf{a}'_2 \mathbf{S} \mathbf{a}_2 - \lambda(\mathbf{a}'_2 \mathbf{a}_2 - 1) - \phi \mathbf{a}'_2 \mathbf{a}_1$$

donde λ y ϕ son multiplicadores de Lagrange. Derivando con respecto a \mathbf{a}_2 e igualando a 0 para obtener el máximo tenemos:

$$\mathbf{S} \mathbf{a}_2 - \lambda \mathbf{a}_2 - \phi \mathbf{a}_1 = 0$$

Multiplicando ambos lados de la expresión por \mathbf{a}'_1 tenemos:

$$\mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_2 - \lambda \mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_2 - \phi \mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1 = 0$$

Pero recordemos que $\mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_2 = 0$ y $\mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_2 = 0$. Más aún, como $\mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1 = 1$, tenemos que $\phi = 0$. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \mathbf{S} \mathbf{a}_2 - \lambda \mathbf{a}_2 - \phi \mathbf{a}_1 &= 0 \\ \Rightarrow \mathbf{S} \mathbf{a}_2 - \lambda \mathbf{a}_2 &= 0 \\ \Rightarrow (\mathbf{S} - \lambda \mathbf{I}_p) \mathbf{a}_2 &= 0 \end{aligned}$$

Por lo tanto, tenemos nuevamente que λ es eigenvalor de \mathbf{S} y \mathbf{a}_2 es su eigenvector correspondiente. Nuevamente, $\lambda = \mathbf{a}'_2 \mathbf{S} \mathbf{a}_2$, por lo que λ toma el valor mayor posible. Asumiendo que \mathbf{S} no tiene eigenvalores repetidos (degeneración), se tiene que λ es el segundo eigenvalor más grande de \mathbf{S} y \mathbf{a}_2 su eigenvector.

Este proceso se puede repetir para mostrar que, para los componentes principales siguientes, los vectores coeficientes $\mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4, \dots, \mathbf{a}_p$ son los eigenvectores de \mathbf{S} correspondientes a $\lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_p$ que van en orden descendente. Más aún, se tiene que:

$$\text{var}(\mathbf{a}'_k \mathbf{x}) = \lambda_k, \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, p.$$

4.1.2. Análisis de grupos

El análisis de grupos o análisis de *clusters* concierne al agrupamiento de los elementos de un conjunto de datos de modo que los elementos en cada grupo son más semejantes entre sí que entre el resto de los datos [93]. Este agrupamiento se ocupa de separar datos en grupos cuyas identidades no son conocidas de antemano y para hacer esto se basa en las similitudes entre entradas [92].

Para medir la similitud de entre las entradas del conjunto de datos se requiere una medida propia para esto. Una de los parámetros para determinar la similitud entre estas entradas son las medidas de distancia entre los objetos. Es decir, se va a considerar que dos objetos son similares si se encuentran a una distancia cercana [91]. La distancia más usada y la más conocida es la euclideana en el espacio de la dimensión de los vectores de datos de entrada.

Existen dos tipos de algoritmos de agrupamiento que se basan en la distancia: el agrupamiento jerárquico y el no jerárquico, este primero es el usado en este trabajo [92].

Agrupamiento jerárquico

El agrupamiento jerárquico procede por una serie de divisiones sucesivas. Particularmente, el método jerárquico divisivo comienza con un único grupo inicial donde se encuentran todos los objetos y este se va dividiendo de modo que los objetos de estos subgrupos estén alejados de los objetos en el otro [92]. Estos grupos se van dividiendo hasta que haya tantos grupos como objetos.

Por el otro lado, el agrupamiento jerárquico aglomerativo comienza considerando que los objetos individuales no poseen estructura. De modo que en un principio se tienen el mismo número de grupos que de objetos. Posteriormente, se van agrupando los objetos de acuerdo con sus similitudes y estos grupos iniciales terminan uniéndose entre sí [92]. Finalmente, a medida que los grupos se van formando y la similitud disminuye, todos los grupos terminan formando parte de uno solo. Comúnmente, los resultados de estos dos métodos se muestran en un diagrama bidimensional llamado dendograma [91].

El método usado en este trabajo será el método jerárquico aglomerativo, por lo que sus características serán explicadas más a fondo. Una vez escogida la métrica que va a ser usada para medir la distancia entre los elementos, es importante determinar como se va a definir la unión entre los grupos una vez que estos tengan más de un miembro. Por lo tanto, la elección de la métrica usada para medir la distancia y del criterio usado para determinar la distancia entre grupos va a establecer el agrupamiento realizado. Entre estos métodos o criterios para delimitar la distancia se encuentran:

- Enlace simple: En este caso la distancia entre los grupos A y B es la distancia más pequeña entre un miembro de A y un miembro de B [92]. Es decir, denotando como a_i y b_j a estos elementos, tenemos:

$$d_{AB} = \text{mín } d(a_i, b_j)$$

- Enlace completo: Se produce cuando los grupos se unen según la distancia entre sus miembros más lejanos [92]. Es decir, se toma en cuenta la distancia:

$$d_{AB} = \text{máx } d(a_i, b_j)$$

- Enlace medio: Los grupos se unen según la distancia media entre los pares de miembros de los respectivos grupos [92]. Es decir, considerando que el grupo A cuenta con n elementos y el B con m , tenemos:

$$d_{AB} = \frac{1}{n \ m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d(a_i, b_j)$$

- Agrupamiento del centroide: Se comparan las distancias entre los centroides o las medias de los vectores, de pares de grupos [92]. De acuerdo con este método, la distancia entre A y B está dada por:

$$d_{AB} = \|\bar{\mathbf{x}}_A - \bar{\mathbf{x}}_B\|$$

donde las medias de los vectores se toman sobre todos los miembros del grupo y $\|\cdot\|$ es la notación de la distancia en la métrica usada [92].

- Método de Ward: Este método es de varianza mínima y no opera en la distancia. Al ser un método jerárquico, se empieza con n grupos con miembros individuales y se combinan dos de ellos en cada paso hasta que, después de $n - 1$ pasos, todos

los datos se encuentren en un grupo. Para escoger que grupos se van a emparejar, se usa el criterio de seleccionar aquellos donde la suma de las distancias al cuadrado entre los puntos y los centroides de los respectivos grupos, sumados sobre los grupos resultantes, sea mínima. Es decir, de entre todas las maneras en que se pueden unir dos de $A + 1$ grupos para hacer A grupos, se escoge la que minimiza [92]:

$$W = \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^{n_a} \|\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}_a\|^2$$

Este método se basa en minimizar la pérdida de información al unir dos grupos y en la noción de que los grupos de observaciones multivariadas poseen aproximadamente una forma elíptica.

4.2. Base de datos y análisis de las entidades federativas

Para la realización de este trabajo se buscó contar con varios indicadores socioeconómicos y de producción agrícola. Se eligieron variables para representar las características sociales de la población. Las variables elegidas para esto fueron la población residente en la entidad y la edad promedio de los residentes. Se eligió este último indicador pues nos da un indicio de qué estados son aquellos con poblaciones más jóvenes. Estos dos indicadores de población se tomaron para el año 2020 pues son los datos del Censo de Población y Vivienda más reciente realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), de donde fue recopilada la información.

De igual modo, se seleccionaron indicadores para identificar el nivel de vulnerabilidad económica de cada entidad. El primero de los indicadores elegidos para cubrir este rubro fue el índice de rezago social, que es una medida ponderada que incorpora cuatro indicadores de carencia social en un sólo índice con la objetivo, en este caso, de ordenar a las entidades federativas según sus carencias sociales [94]. Este índice toma valores positivos para indicar una alta carencia social y negativos para el caso contrario. Los valores de este índice para cada entidad federativa fueron obtenidos de la base de datos del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), de las estimaciones hechas por este consejo para el año 2020.

Se seleccionó también al porcentaje de la población mayor de 15 años que es analfabeta. Este indicador se eligió debido a la relación que tiene el analfabetismo con la desigualdad y con el desarrollo social de la población [95]. Estos datos fueron obtenidos del CONEVAL, dentro de su base de datos para el cálculo del índice de rezago social para el año 2020.

Se seleccionaron también los indicadores del porcentaje de la población ocupada de 15 años o más que recibe un solo salario mínimo y el porcentaje de la población que se encuentra viviendo en pobreza extrema. Se eligieron estos dos indicadores pues proporcionan una medida clara del nivel de ingreso y pobreza en cada entidad y por lo tanto dan pie a la comparación de estos niveles de rezago económico entre grupos de entidades. Los datos de la población ocupada de 15 años o más que recibe un salario

mínimo fueron obtenidos de la base de datos de la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo del INEGI para el primer trimestre del año 2021. Es importante mencionar que de esta base de datos se obtuvo el número de personas ocupadas de 15 años o más que recibe un salario mínimo y posteriormente se obtuvieron los porcentajes de estos valores usando los datos recopilados previamente para la población total de cada entidad. Los datos del porcentaje de la población que se encuentra viviendo en extrema pobreza se obtuvieron del análisis Medición de la Pobreza 2020 del CONEVAL.

También se añadió el indicador del porcentaje de la población que se considera indígena pues estas comunidades originarias siguen siendo de las más vulnerables ante la desigualdad [96]; de acuerdo con el CONEVAL, en el 2018 el 69.5 % de la población indígena experimenta una situación de pobreza y el 27.9 % de pobreza extrema [97]. Estos datos fueron recabados del Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas (INPI) donde presentan una estimación de la población indígena y algunos principales indicadores sociodemográficos con base en la Encuesta Intercensal realizada por el INEGI en el año 2015.

Un indicador importante que se incluyó fue el de la tasa de ocupación agropecuaria. Esta tasa es una serie estadística sobre la magnitud de la ocupación de la población de 15 años o más en el sector agropecuario al compararse con la población ocupada total. Se escogió este indicador pues nos da una medida de que tan importante es la actividad agrícola en cada entidad, basándonos en el número de personas que se encuentran empleadas en este sector. Los datos para este indicador fueron tomados de la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo del INEGI, para el primer trimestre del 2021. Se eligieron los datos en este rango de tiempo pues se buscó contar con la información más reciente y, al momento de llevar a cabo el presente trabajo, esta era la última actualización.

Se incluyó también la razón de dependencia demográfica. Esta es una medida usada para medir la necesidad potencial de soporte social de la población en edades inactivas por parte de la población en edades activas. Se determina como el cociente entre la suma de los grupos de población de menos de 15 y más de 65 años y la población de entre 15 y 64 años de edad [98]. Se decidió agregar este indicador pues es una medida de cuantas personas inactivas laboralmente hay en comparación con la población. Los datos para este indicador se obtuvieron del Panorama Sociodemográfico de México realizado por el INEGI con base en su Censo de Población y Vivienda 2020.

Se incluyeron los indicadores económicos del PIB agregado total por cada entidad federativa en millones de pesos entre la población total, es decir, el PIB per cápita; así como el porcentaje de la contribución de cada entidad al PIB agregado total en actividades primarias (extracción y obtención de materias primas [99]). El primero es de gran relevancia pues nos proporciona una medida del nivel de ingreso promedio de cada entidad [100], mientras que el segundo nos da una medida de la importancia que tienen las actividades primarias en la economía de cada entidad. Estas dos series fueron obtenidas del Sistema de Cuentas Nacionales de México del INEGI para el rango de periodo más reciente que, al momento de realizar el presente trabajo, fue para el año 2019. Cabe mencionar que la información recopilada de esta fuente fue el PIB por entidad federativa y, posteriormente, se realizó el cálculo del PIB per cápita

teniendo en cuenta los datos del indicador anterior de la población de cada entidad.

Asimismo, para obtener un panorama general de las características climáticas de cada entidad, se consideraron los indicadores del promedio de las temperaturas media y máxima en el periodo 1970-2000 para cada entidad. Estos datos de temperatura tienen en cuenta la temperatura promedio anual registrada en cada entidad para cada año entre 1970 y 2000. Posteriormente, se realiza el promedio de estas temperaturas promedio anuales para obtener un estimado de la temperatura promedio en la entidad entre el periodo de años establecido, es decir, se calculó la climatología para el periodo 1970-2000. Estos dos indicadores nos dan una idea del comportamiento de la temperatura registrada en cada entidad durante el siglo pasado. Es de gran importancia pues no se están tomando los aumentos de temperatura actuales, sino que nos basamos en un periodo de años que nos sirven de base. Estos datos fueron obtenidos de la base de datos del Climatic Research Unit (CRU) TS3, procesados por el grupo de Clima y Sociedad del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM.

Un indicador de similar naturaleza a estos dos fue el de precipitación promedio para este mismo rango de años, 1970-2000. Se decidió añadir este indicador pues nos da una referencia del comportamiento pluvial de cada entidad federativa en el periodo base. Del mismo modo, los datos para este indicador fue obtenido de la base de datos del CRU TS3, procesados por el grupo de Clima y Sociedad del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM.

Se consideró también el rendimiento en la producción de maíz por entidad federativa para el periodo de años de 2003-2012. Estos datos fueron obtenidos del informe realizado por Estrada en el 2018. Estos datos integran la información de área cultivada, producción y rendimiento a nivel estatal para el periodo de años 2003-2012 para el maíz de temporal recopilada del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) [101].

Estas series se resumen en la Tabla 4.1, donde se muestran los años considerados para cada variable y una breve descripción de la misma.

Indicador	Año	Atributo
POP [102]	2020	Población residente en la entidad federativa.
EDAD [103]	2020	Edad promedio de los residentes de la entidad.
REZAGOSOC [104]	2020	Índice de rezago social que incorpora indicadores de carencias sociales (educación, salud, servicios básicos, calidad y espacios en la vivienda) en una sola medida.
ANALFA15PORCIENTO [104]	2020	Porcentaje de la población mayor de 15 años que es analfabeta.

Indicador	Año	Atributo
POPSALMINPORCIENTO [105]	2021 1T	Porcentaje de la población ocupada de 15 años o más que reciben un salario mínimo.
INDIGENAPORCIENTO [106]	2015	Porcentaje de la población que se considera indígena.
OCUPACIONAGRO [107]	2021 1T	Serie estadística sobre la magnitud de la ocupación en el ámbito agropecuario, en comparación con la población ocupada total (trimestral).
POBREZAEXTREMA [108]	2020	Porcentaje de la población que se encuentra viviendo en pobreza extrema.
DEPENDENCIADEMO [109]	2020	Razón de dependencia demográfica. Medida utilizada para medir la necesidad potencial de soporte social de la población en edades económicamente activas.
PIBPERCAPITA [110]	2019	PIB agregado total por cada entidad federativa en millones de pesos entre la población total.
PIBPRIMARIASPORCIENTO [111]	2019	Contribución de la entidad federativa al PIB agregado total del país en actividades primarias.
TMean1970-2000	1970-2000	Promedio de la temperatura media anual en la entidad federativa en el rango de años establecido.
TMax1970-2000	1970-2000	Promedio de la temperatura máxima anual en la entidad federativa en el rango de años establecido.
PCP1970-2000	1970-2000	Promedio de la precipitación media anual en la entidad federativa en el rango de años establecido.
MAIZ2003-2012 [1]	2003-2012	Rendimiento en la producción de maíz de temporal en el periodo de años establecido.
MAIZ2005-2035 [1]	2005-2035	Proyección a corto plazo del rendimiento en la producción de maíz de temporal bajo el escenario RCP8.5.

Indicador	Año	Atributo
MAIZ2035-2065 [1]	2035-2065	Proyección a mediano plazo del rendimiento en la producción de maíz de temporal bajo el escenario RCP8.5.
MAIZ2069-2099 [1]	2069-2099	Proyección a largo plazo del rendimiento en la producción de maíz de temporal bajo el escenario RCP8.5.

Tabla 4.1: Indicadores usados para el análisis de los componentes principales de las entidades federativas de México.

Se seleccionaron los indicadores socioeconómicos, de temperatura y precipitación y de rendimiento en la producción de maíz de temporal en el periodo 2003-2012 para realizar un análisis de componentes principales de las 32 entidades federativas. Sin embargo, no se incluyó en el análisis al estado de Baja California Sur pues en este no cuenta con producción de maíz de temporal reportada en la base de datos y por lo tanto, no hay datos de los rendimientos para él. Para elegir el número de componentes con los cuales se proseguiría para el análisis se usó el criterio de Kaiser. Este se basa en seleccionar aquellos con eigenvalores cuyo valor sea igual o mayor a 1 pues cualquier componente principal con varianza menor que 1 contiene menos información que una de las variables originales y, por lo tanto, no está acorde con el objetivo de reducir la dimensionalidad [90]. Una vez obtenidos los componentes principales se aplicó una rotación a los mismos. Esta rotación se hizo con el fin de obtener unos nuevos componentes principales más fáciles de interpretar pues, a pesar de que la varianza de las componentes antes y después de rotar se mantiene, el porcentaje de varianza que representa cada componente cambia. La rotación *varimax* es un tipo de rotación ortogonal donde se asumen que los factores son independientes o no están correlacionados entre si [112]. Esta rotación maximiza la varianza en cada componente minimizando la pérdida de información.

Posteriormente, se interpretó cada uno de los componentes obtenidos y seleccionados para el análisis y se observó como cada componente contribuye a la descripción de las entidades. Se realizaron diagramas de dispersión de los componentes obtenidos y se obtuvo también el puntaje de los componentes para cada entidad. Se realizó un agrupamiento jerárquico aglomerativo usando la distancia euclideana y el método de Ward para visualizar las semejanzas entre las entidades y formar grupos a partir de estas. Se estudió y obtuvo una interpretación de los grupos a partir de las características que las entidades en el grupo comparten y como se comparan estas con las del resto de la entidades. A partir de estos resultados se identificaron los grupos de entidades que se encuentran en riesgo de sufrir mayores impactos y otras dificultades como consecuencia de los efectos del cambio climático en los rendimientos de la producción de maíz de temporal.

Se utilizaron las proyecciones de rendimientos futuros que fueron obtenidas de los datos presentados en el informe ya mencionado realizado por Estrada en el 2018 [1],

para complementar el análisis. Se obtuvo la diferencia porcentual promedio para cada grupo de entidades de los rendimientos presentes comparados con los futuros para identificar cuales van a experimentar el mayor porcentaje de pérdidas. Estos datos integran la información de área cultivada, producción y rendimiento a nivel estatal para el periodo de años 2003-2012 para el maíz de temporal; así como los rendimientos futuros originados del programa *Agricultural Model Intercomparison and Improvement* (AgMIP) para el escenario RCP8.5, para los modelos agrícolas disponibles, modelos de circulación general (MCG) , sistemas de gestión y escenarios. En este caso, para el maíz, consideraron a los modelos EPIC y pDSSAT forzados con la salida de tres MCG (HADGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, y MIROC-ESM-CHEM) para ambos escenarios.

Finalmente, además del análisis de componentes principales haciendo uso de los indicadores socioeconómicos, de temperatura, precipitación y de rendimiento en la producción de maíz de temporal en el periodo 2003-2012, se repitió este mismo proceso para los periodos 2005-2035, 2035-2065 y 2065-2099. En base a la interpretación de los valores de los componentes principales para cada una de las entidades federativas, se hizo un índice de riesgo para el rendimiento en la producción de maíz que clasificó a las entidades dependiendo del puntaje obtenido en cada componente principal. Si el componente contribuía de manera negativa al riesgo de cada entidad de padecer consecuencias adversas en caso de sufrir una pérdida de rendimiento en la producción de maíz, se asignó un valor de 1, en el caso contrario se asignó el valor de 0. El índice de riesgo se obtuvo a través del promedio de estos puntajes para cada entidad.

5 Resultados

5.1. Análisis de componentes para las 31 entidades

Haciendo un análisis de componentes principales de los 31 estados de la república que cuentan con producción de maíz se obtuvo, en primer lugar, la gráfica de los eigenvalores obtenidos que se muestra en la Figura 5.1. En esta se observan a los 15 eigenvalores de mayor magnitud que, recordemos, representan la varianza del componente principal al que están asociados. Estos se presentan de manera descendente, de modo que en el lado izquierdo de la gráfica se tienen aquellos que representan la mayor varianza de los datos.

El número de componentes principales a considerar en el resto del análisis se determinó de acuerdo con el criterio de Kaiser mencionado anteriormente. Los cuatro componentes principales retenidos utilizando este criterio fueron rotados usando la rotación *varimax normalized* para maximizar la varianza en cada uno de los factores. Estos representan un total de 80.17% de la varianza del conjunto y se muestran la Tabla 5.1. En esta tabla se muestran las entradas de los eigenvectores cuyos valores representan el peso que las variables originales aportan a cada componente principal. Se marcaron en rojo aquellos pesos con un valor igual o mayor a 0.6.

En la Tabla 5.2 se muestran los componentes principales junto con el nombre que se les adjudicó dependiendo de las variables que tuvieron más peso y una breve descripción del mismo.

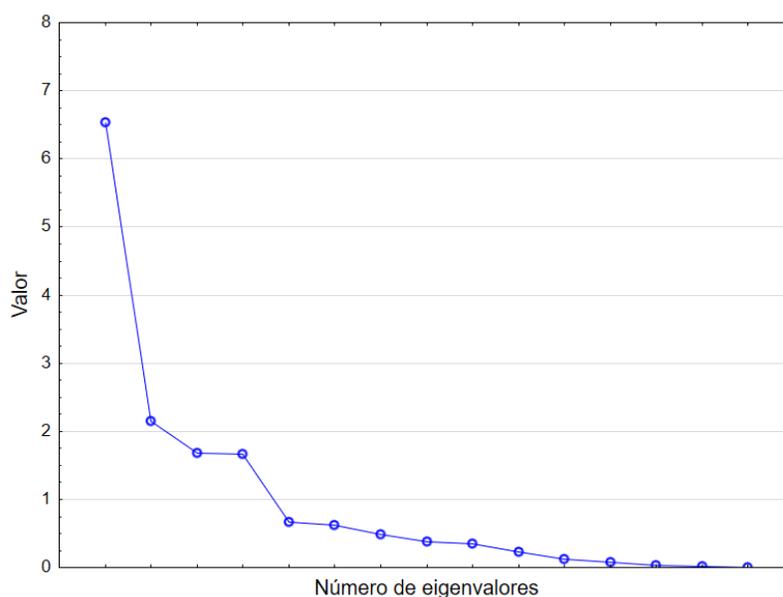


Figura 5.1: Gráfica de los eigenvalores para cada uno de los componentes principales.

Tabla 5.1: Eigenvectores asociados a cada uno de los cuatro componentes principales.

Indicador	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
POP	0.173143	-0.572901	-0.20551	0.642137
EDAD	-0.102751	-0.211332	-0.786843	0.136167
REZAGOSOC	0.789537	0.073983	0.565924	0.090958
ANALFA15PORCIENTO	0.775881	0.149569	0.54801	0.118576
POPSALMINPORCIENTO	0.855289	-0.056843	0.058712	-0.197765
INDIGENAPORCIENTO	0.767182	0.263571	0.069139	-0.174562
OCUPACIONAGRO	0.615203	0.25558	0.598727	0.153425
POBREZAEXTREMA	0.805508	0.156694	0.448672	0.132824
DEPENDENCIADEMO	0.328856	0.101558	0.86272	0.048987
PIBPERCAPITA	-0.018487	0.220189	-0.704442	-0.155602
PIBPRIMARIASPORCIENTO	-0.242226	0.059542	0.28646	0.75452
TMean1970-2000	0.382798	0.88296	0.034432	0.097427
TMax1970-2000	0.183559	0.952561	0.052156	0.096857
PCP1970-2000	0.818488	0.265711	-0.071273	0.21197
MAIZ2003-2012	0.116328	0.140718	-0.012449	0.756791

Tabla 5.2: Componentes principales junto con los indicadores que más contribuyen al mismo.

Componente	Indicadores	Descripción
CP 1: Índice de marginación y pobreza	POPSALMINPORCIENTO, PCP1970-2000, POBREZAEXTREMA, REZAGOSOC, ANALFA15PORCIENTO, INDIGENAPORCIENTO, OCUPACIONAGRO	Indicador de marginación y pobreza. Valores altos describen entidades con altos porcentajes de rezago social, pobreza, analfabetismo, ocupación agropecuaria y altos niveles de precipitación.
CP 2: Índice de temperatura	TMax1970-2000, TMean1970-2000	Indicador de temperatura. Valores altos representan altas temperaturas medias y máximas.
CP 3: Índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita	DEPENDECIADAMO, EDAD, PIBPERCAPITA	Indicador de dependencia demográfica. Valores altos describen entidades con alta dependencia demográfica y PIB per capita bajo.
CP 4: Índice de rendimiento en la producción de maíz	MAIZ2003-2012, PIBPRIMARIASPORCIENTO, POP	Indicador de rendimiento en la producción de maíz. Valores altos representan entidades con población elevada y que contribuyen un porcentaje alto al PIB federal de actividades primarias. De igual modo, estas entidades tienen altos rendimientos en su producción de maíz de temporal.

CP 1: Índice de marginación y pobreza

En el primer componente principal hay una asociación importante entre indicadores de marginación y de pobreza. En este componente los indicadores más dominantes, en orden de peso fueron los siguientes: POPSALMINPORCIENTO (porcentaje de la población ocupada que recibe un salario mínimo), PCP1970-2000 (precipitación promedio en el periodo de años base 1970-2000), POBREZAEXTREMA (porcentaje de la población que se encuentra viviendo en pobreza extrema), REZAGOSOC (índice de rezago social), ANALFA15PORCIENTO (porcentaje de la población analfabeta

de 15 años o más que), INDIGENAPORCIENTO (porcentaje de la población que se autodenomina indígena) y OCUPACIOAGRO (tasa de ocupación agropecuaria). Los pesos de todas estas variables fueron positivos lo que nos indica que las entidades cuyo puntaje en este componente es alto, tienen valores mayores de estos indicadores: una parte considerable de su población ocupada recibe sólo un salario mínimo, hay altos niveles de precipitación en la entidad, gran porcentaje de la población vive en pobreza extrema y hay un alto índice de rezago social, un porcentaje considerable de la población mayor a 15 años analfabeta y que se considera indígena, y una parte considerable de la población se encuentra ocupada en el sector agropecuario.

Algunas entidades cuyo factor para este componente principal es muy alto son Oaxaca, Chiapas, Veracruz, Campeche y Guerrero. Estos son estados que comparten la característica de encontrarse en el sur del país, que tienen un tipo de clima cálido húmedo y subhúmedo y que, debido a sus altos valores en este índice, podemos inferir tiene un alto grado de pobreza y marginación. Por el otro lado, las entidades cuyo factor para este componente fueron los más bajos son Aguascalientes, Coahuila, Jalisco, Sinaloa y Nuevo León. Estas son entidades que comparten la característica de estar en el centro y norte del país cuyos climas son predominantemente secos y cálidos subhúmedos, y que tienen bajos índices de marginación y pobreza.

Este componente representa el 30.96 % de la varianza del conjunto original de datos.

CP 2: Índice de temperatura

El segundo componente principal asocia el indicador de temperatura máxima en el periodo de años base 1970-2000 y el de temperatura promedio para este mismo periodo. En este componente el indicador más dominante es el de temperatura máxima pues, como se ve en la Tabla 5.1, tiene un peso mayor, seguida por la temperatura media. Por lo tanto, las entidades federativas que tengan un alto valor para este índice son las que se encuentran en climas más cálidos. Algunas entidades cuyo peso en este componente principal es muy alto son Campeche, Colima, Tabasco, Quintana Roo y Sinaloa. Todas estas entidades tienen en común que cuentan con climas predominantemente cálidos subhúmedos y cálido-húmedos. Las entidades con el menor índice de temperatura son Estado de México, Ciudad de México, Tlaxcala, Hidalgo y Puebla. Estos tienen climas templado subhúmedo y seco.

Este componente representa el 16.02 % de la varianza del conjunto original de datos.

CP 3: Índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita

El tercer componente relaciona la edad promedio, la dependencia demográfica y el PIB per cápita. El indicador más dominante es la razón de dependencia demográfica, que tiene un peso positivo. A este indicador le siguen la edad promedio y el PIB per cápita, ambos con signo negativo. Esto indica que los estados cuyo índice sea alto serán aquellos que tienen una dependencia demográfica alta, una edad promedio menor y un PIB per cápita bajo. Serán entonces aquellos, a grandes rasgos, cuenten con una

población joven que tiene dependientes económicos y cuyos ingresos son bajos.

Algunas entidades cuyo factor para este componente principal es muy alto son Chiapas, Guerrero, Zacatecas, Oaxaca y Michoacán. Estas son entonces entidades con una alta dependencia demográfica, una edad promedio para su población baja y un ingreso per cápita bajo. Por el contrario, los estados con las características opuestas, de acuerdo con el valor de su índice son Ciudad de México, Campeche, México, Quintana Roo y Nuevo León.

Este componente representa el 21.21 % de la varianza del conjunto original de datos.

CP 4: Índice de rendimiento en la producción de maíz

El cuarto componente cuenta con mayores pesos para las variables de rendimiento en la producción de maíz, porcentaje de contribución al PIB en actividades primarias y población de la entidad, en ese orden de contribución. Por lo tanto, las entidades con valores altos en este índice son aquellos que tienen altos rendimientos en la producción de maíz y cuya aportación al PIB nacional en actividades primarias es importante, además de una alta población.

Algunas entidades cuyo factor para este componente principal es muy alto son Jalisco, Estado de México, Veracruz, Michoacán y Sinaloa. Estos estados comparten la similitud de contar con climas cálido subhúmedo y templado subhúmedo y tener un alto índice de rendimiento en la producción de maíz. Por el otro lado, los estados con el menor índice son Quintana Roo, Aguascalientes, Tlaxcala, Yucatán y Zacatecas. Estos tienen los menores índices de rendimiento en la producción de maíz y se encuentran en las regiones con clima cálido subhúmedo, templado subhúmedo y seco.

Este componente representa el 11.98 % de la varianza del conjunto original de datos.

5.1.1. Comparación entre componentes: diagramas de dispersión

Se realizaron los diagramas de dispersión de los componentes principales. En cada diagrama se comparan dos de los cuatro componentes principales.

Índice de temperatura (CP2) contra índice de marginación y pobreza (CP1)

En el primer diagrama se tiene la comparación entre el índice de temperatura (CP2) y el índice de marginación y pobreza (CP1). En el primer cuadrante se encuentran los estados con valores para el índice de marginación y pobreza mayores, al igual que para el índice de temperatura. Notamos que la mayoría de los estados que se encuentran en este cuadrante se encuentran en el sureste con la excepción de Guerrero y tienen un clima cálido húmedo. En el cuadrante II tenemos a los estados con menor marginación y mayor temperatura; la mayoría de las entidades en este cuadrante se encuentran en el norte y tienen un clima cálido seco. En el cuadrante III se encuentran también estados

en el norte y estos comparten la característica de que tienen menor marginación y menor temperatura. Finalmente, en el cuadrante IV están los estados con valores positivos para el índice de marginación y pobreza y valores menores para el índice de temperatura, estos se comparten la característica de encontrarse en su mayoría en las parte sur y centro del país. En este cuadrante podemos destacar estados con altos valores para el índice de marginación y pobreza como lo son Oaxaca y Veracruz, y otros estados que se encuentran más cercanos al punto medio de la gráfica como el Estado de México y la Ciudad de México.

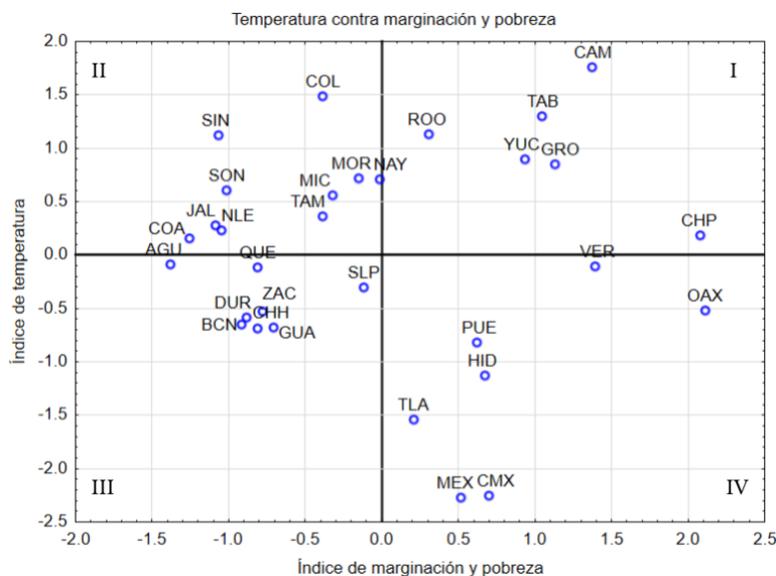


Figura 5.2: Diagrama de dispersión de los valores del índice de temperatura contra el índice de marginación y pobreza de cada una de las 31 entidades federativas.

Índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita (CP3) contra índice de marginación y pobreza (CP1)

En el segundo diagrama se muestra el índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita (CP3) contra el índice de marginación y pobreza (CP1). En el cuadrante I se encuentran los estados con mayor marginación y mayor dependencia, menor edad y menores ingresos. Entre estos podemos destacar a los estados de Guerrero, Chiapas y Oaxaca, que son los estados con el el índice de marginación más alto. En este cuadrante están también aquellos estados donde las actividades primarias tienen más importancia y la mayoría de estos se encuentran en el sur y centro del país. En el cuadrante II tenemos a los estados con menor marginación y pobreza y con mayor dependencia demográfica, menor edad y menores ingresos. En este cuadrante se tienen entonces entidades con una población joven que reciben menores ingresos y cuentan con varios dependientes y que, sin embargo, no están en situación de alta marginación y pobreza. De igual modo, vemos que estas entidades se encuentran en su mayoría en la parte norte del país. En el cuadrante III se tiene a los estados con

menor marginación y pobreza y menor dependencia demográfica, mayor edad promedio y mayores ingresos. Estos estados cuentan con una población más vieja al caso anterior y con mayores ingresos, de igual modo, sus índices de marginación y pobreza son menores y en su mayoría se encuentran en el norte. Entre estos podemos destacar al estado de Nuevo León que tiene un desarrollo económico e industrialización muy altos. En el cuadrante IV tenemos a los estados con un alto índice de marginación y pobreza y menor índice de dependencia demográfica, mayor edad y mayores ingresos. Estos estados tienen una población vieja y con ingresos per cápita altos. La mayoría de los estados en este cuadrante se encuentran en el sur del país, con la excepción del Estado de México y la Ciudad de México. Podríamos inferir que estos dos estados, pese a tener un gran volumen de población y un desarrollo socioeconómico alto, padecen grandes desigualdades entre sus habitantes, lo que hace que tengan un índice de marginación y pobreza altos. Particularmente podríamos concluir esto de la Ciudad de México, que es la entidad más alejada en cuanto al índice de dependencia demográfica que siguen las otras entidades en el cuadrante. Esta cuenta con marginación y pobreza considerables y cuenta con una población mayor, sin muchos dependientes y con ingresos mayores al resto del país.

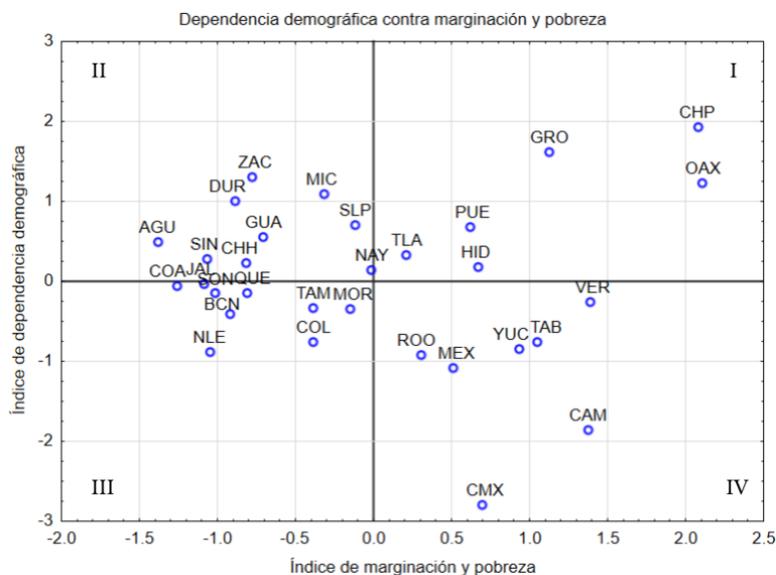


Figura 5.3: Diagrama de dispersión de los valores del índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita contra el índice de marginación y pobreza de cada una de las 31 entidades federativas.

Índice de rendimiento en la producción de maíz (CP4) contra índice de marginación y pobreza (CP1)

En el tercer diagrama de dispersión se muestra el índice de rendimiento en la producción de maíz (CP4) contra el índice de marginación y pobreza (CP1). En el cuadrante I tenemos a los estados con mayor pobreza y marginación y que son importantes pro-

ductores de maíz. De manera similar, en el cuadrante II están las entidades que son importantes productoras de maíz pero que tienen un índice de marginación y pobreza menor. Entre estos dos cuadrantes podemos destacar a los estados de Jalisco y Chiapas. Jalisco es el principal productor de maíz de temporal del país y cuenta con niveles de marginación y pobreza menor a muchas otras entidades debido a su desarrollo económico. Por el otro lado, Chiapas es también un productor de maíz importante pero es una de las entidades con mayor marginación y pobreza, junto con los estados de Guerrero y Oaxaca. En el cuadrante III están las entidades con menor producción de maíz y menor marginación y pobreza. Estos son estados principalmente en el norte del país cuyo clima en su mayoría seco y por lo tanto, no son importantes productores de maíz de temporal. Finalmente, en el cuadrante IV tenemos a los estados con baja producción de maíz y alta pobreza y marginación. En este cuadrante tenemos estados en su mayoría al sur del país y que tienen climas cálidos subhúmedos.

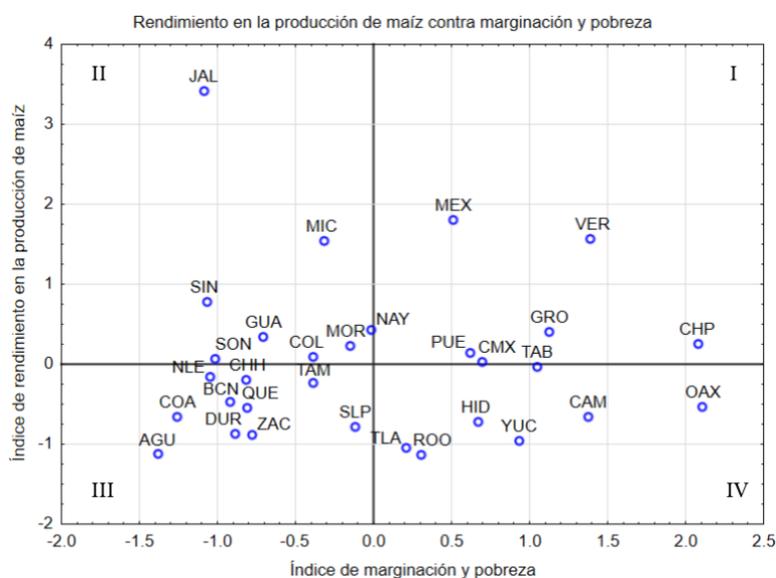


Figura 5.4: Diagrama de dispersión de los valores del índice de rendimiento en la producción de maíz contra el índice de marginación y pobreza de cada una de las 31 entidades federativas.

Índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita (CP3) contra índice de temperatura (CP2)

En el cuarto diagrama se tiene al índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita (CP3) contra el índice de temperatura (CP2). En el cuadrante I se encuentran los estados con mayores temperaturas y mayor dependencia demográfica, menor edad y menores ingresos. En el cuadrante II tenemos un mayor número de entidades que el primer caso. En este están las entidades con menores temperaturas y con alta dependencia, menor edad y menores ingresos. Tenemos entonces en el cuadrante I y II aquellos estados con una población más joven y menores ingresos. Esta combinación de factores puede resultar en una reducción de la resiliencia y capacidad de adapta-

ción frente a estresores sociales o ambientales, como es el caso del cambio climático. En los cuadrantes III y IV tenemos a las entidades con menor dependencia, mayor edad y mayores ingresos. Vemos que la mayoría de las entidades que se encuentran en estos dos cuadrantes cuentan con valores altos o medios en el índice de temperatura, con la excepción del Estado de México y la Ciudad de México cuyos climas tienden a ser templados.

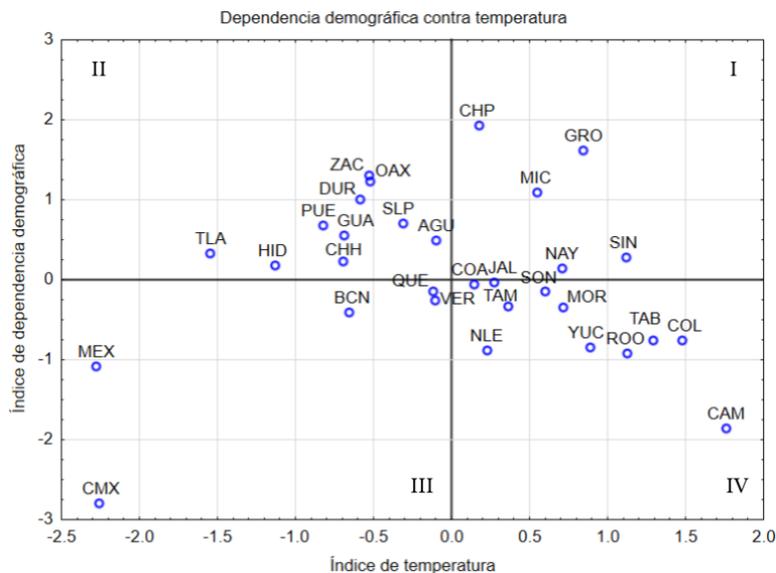


Figura 5.5: Diagrama de dispersión de los valores del índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita contra el índice de temperatura de cada una de las 31 entidades federativas

Índice de rendimiento en la producción de maíz (CP4) contra índice de temperatura (CP2)

En este diagrama se encuentran el índice de rendimiento en la producción de maíz (CP4) contra el índice de temperatura (CP2). Se aprecia que los rendimientos altos en maíz están asociados con temperaturas elevadas y que, con la excepción del Estado de México, los rendimientos más bajos tienden a encontrarse en entidades con climas más fríos. En el cuadrante I están los estados con mayor temperatura y mayor producción de maíz. En este cuadrante tenemos a entidades que tienen en su mayoría climas cálidos lo que nos sugiere que ese clima es más propicio para la producción de maíz de temporal que su contraparte. En el cuadrante II tenemos algunos estados que también tienen una importante producción de maíz pero que cuentan con climas más templados, como es el caso del Estado de México. Es notable que el número de estados en dicho cuadrante es mucho menor que en los demás cuadrantes, sugiriendo que es poco probable que en estados con climas más fríos el cultivo de maíz alcance altos rendimientos. En el cuadrante III tenemos a estados con menores temperaturas y con menores rendimientos. En el cuadrante IV tenemos estados con altas temperaturas y

menores rendimientos. Particularmente, en este cuadrante destaca Tlaxcala al ser el estado con un valor menor en el índice de temperatura y con el tercer valor más bajo del país en el índice de rendimiento. Este cuadrante nos sugiere que la temperatura no es el único factor climático importante a tomar en cuenta para la producción de maíz, sino que también es importante analizar la distribución de la precipitación y de factores socioeconómicos para determinar la capacidad productiva de las entidades.

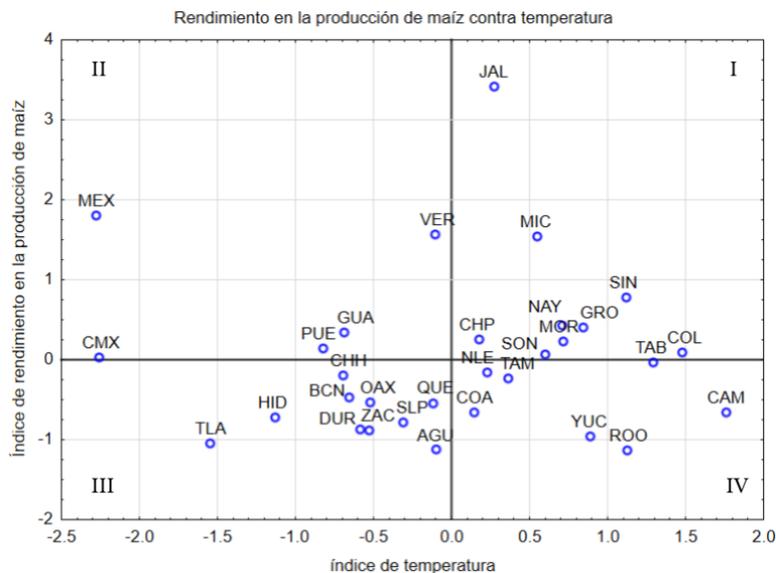


Figura 5.6: Diagrama de dispersión de los valores del índice de rendimiento en la producción de maíz contra el índice de temperatura de cada una de las 31 entidades federativas.

Índice de rendimiento en la producción de maíz (CP4) contra índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita (CP3)

En el último diagrama de dispersión se muestra el índice de rendimiento en la producción de maíz (CP4) contra el índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita (CP3). En el cuadrante I tenemos a las entidades con altos rendimientos y alta dependencia demográfica, menor edad y menores ingresos. Es notable que, con la excepción de Guanajuato y Puebla, todos los estados en este cuadrante se encuentran en la costa del Pacífico. De igual modo, en el cuadrante II tenemos a estados que tienen también un rendimiento de maíz importante pero cuya dependencia es menor y cuentan con poblaciones más viejas y con mayores ingresos. En el cuadrante III tenemos a los estados con menor dependencia, población más vieja y mayores ingresos pero que no cuentan con un rendimiento de maíz importante. Entre estos podemos destacar a Baja California y Nuevo León que son de los estados con los menores rendimientos de maíz de temporal del país. Finalmente, en el cuadrante IV tenemos a los estados con mayor dependencia, con población joven y de ingresos bajos y que no cuentan con un gran rendimiento de maíz.

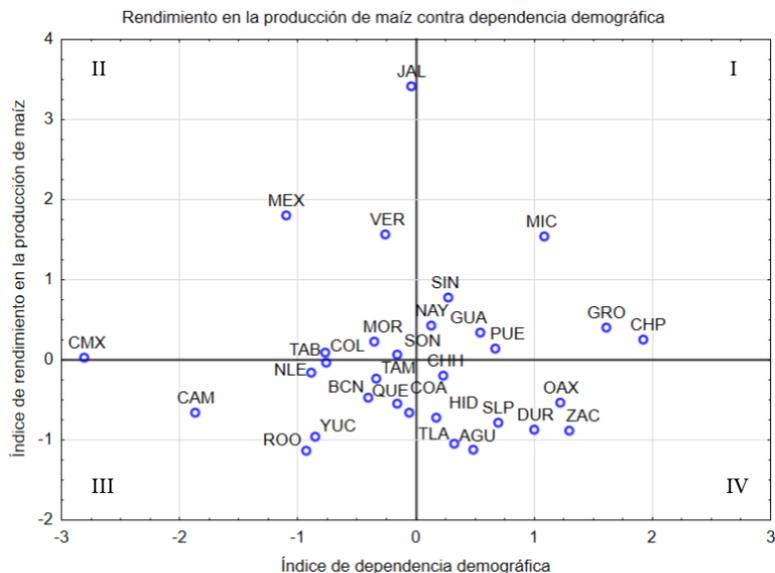


Figura 5.7: Diagrama de dispersión de los valores del índice de rendimiento en la producción de maíz contra el índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita de cada una de las 31 entidades federativas.

5.1.2. Agrupamiento de las entidades federativas

Usando los valores de los componentes principales para cada entidad federativa, se hizo un agrupamiento jerárquico aglomerativo. Para este agrupamiento se usó como

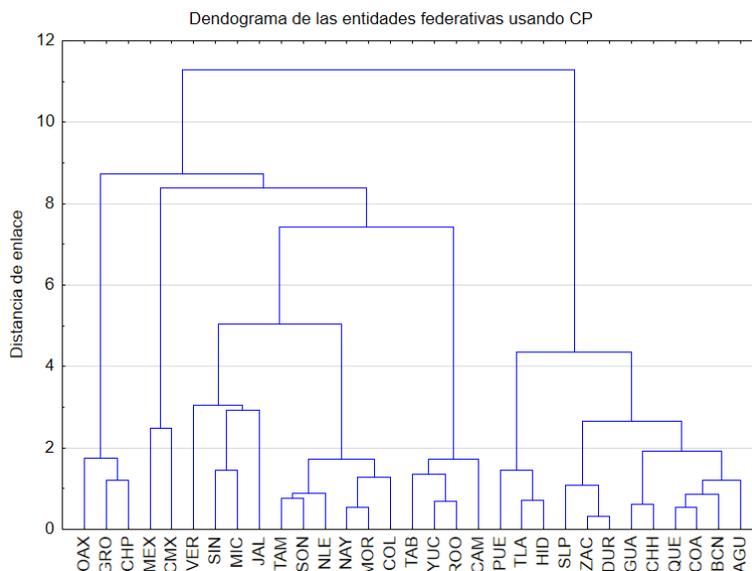


Figura 5.8: Dendrograma obtenido del análisis aglomerativo de las entidades federativas para los cuatro componentes.

método de enlace al método de Ward y como medida de distancia a la métrica euclídeana. El dendograma obtenido para ese agrupamiento se muestra en la Figura 5.8.

Se tomó una distancia de enlace de 3.5 para hacer los agrupamientos. Los 7 grupos obtenidos fueron los siguientes:

- **Grupo 1:** Esta formado por los estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Los estados en este grupo se caracterizan por tener un índice de marginación y pobreza medio, un índice de temperatura bajo, un índice de dependencia demográfica, edad e ingresos per cápita medio y un índice de rendimiento en la producción de maíz medio.
- **Grupo 2:** A este grupo lo conforman los estados de Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán. Los estados en este grupo tienen un índice de marginación y pobreza alto, el de temperatura más alto, un índice de dependencia, edad e ingresos per cápita bajo y un índice de rendimiento bajo.
- **Grupo 3:** En este grupo se encuentran los estados de Colima, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Sonora y Tamaulipas. En este grupo se tiene un índice de marginación bajo, uno de temperatura alto, uno de dependencia, edad e ingresos per cápita medio y uno de rendimiento medio.
- **Grupo 4:** Este grupo incluye a los estados de Chiapas, Guerrero y Oaxaca. Estos estados se caracterizan por tener su índice de marginación y pobreza muy alto, el índice de temperatura medio, el índice de dependencia, edad e ingresos per cápita muy alto y el de rendimiento medio.
- **Grupo 5:** En este grupo se encuentran únicamente el Estado de México y la Ciudad de México. Estos dos estados se caracterizan por tener un índice de marginación medio, uno de temperatura muy bajo, uno de dependencia, edad e ingresos per cápita muy bajo y uno de rendimiento alto.
- **Grupo 6:** En este grupo es el más numeroso entre los demás e incluye a los estados de Aguascalientes, Baja California, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas. Estos estados tienen un índice de marginación y pobreza muy bajo, uno de temperatura medio, uno de dependencia, edad e ingresos per cápita alto y un índice de rendimiento bajo.
- **Grupo 7:** Este grupo incluye a los estados Jalisco, Michoacán, Sinaloa y Veracruz. Estos se caracterizan por tener un índice de marginación y pobreza medio bajo, un índice de temperatura medio, uno de dependencia, edad e ingresos per cápita medio y el índice de rendimiento en la producción de maíz más alto entre los demás estados.

Para identificar las características descritas anteriormente para cada uno de los grupos, se tomaron los valores de los cuatro índices (componentes principales) para cada uno de los estados y se calcularon los promedios de estos índices para cada

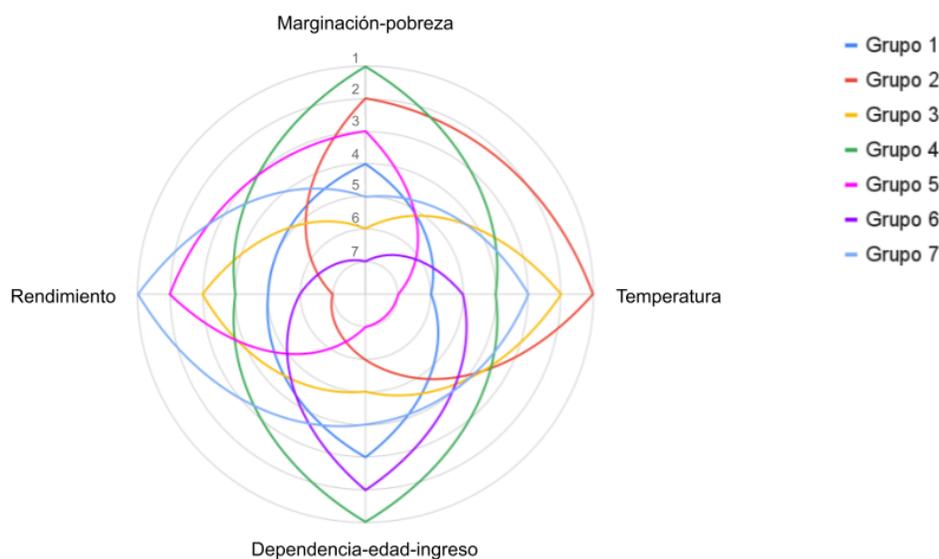


Figura 5.9: Gráfica radial de los rankings de los grupos de entidades para cada uno de los índices.

agrupamiento. De igual modo, para hacer una comparación entre las características de cada agrupamiento, se hizo un ranking de cada uno de estos índices. Para entender mejor visualmente estos resultados, se muestra en la Figura 5.9 una gráfica radial de las posiciones de estos rankings para cada uno de los agrupamientos. En esta gráfica los estados que se encuentran más alejados del origen son aquellos que ocupan las primeras posiciones en el ranking de cada índice.

También, en la Tabla 5.3 se muestran las características de los grupos para cada índice a modo de resumen. Los grupos se muestran en colores degradados del rojo al verde. Por un lado, el color verde denota que el promedio del índice de los estados en el grupo fue menor, mientras que el color rojo denota lo contrario. Esta representación

Tabla 5.3: Valores promedio de los índices para cada uno de los grupos. En rojo se muestran aquellos grupos con un valor alto y en verde aquellos con un valor menor.

Grupo	Marginación	Temperatura	Dependencia	Rendimiento
1	Alto (Naranja)	Bajo (Verde)	Alto (Naranja)	Bajo (Verde)
2	Alto (Rojo)	Alto (Rojo)	Bajo (Verde)	Bajo (Verde)
3	Bajo (Verde)	Alto (Naranja)	Bajo (Verde)	Alto (Naranja)
4	Alto (Rojo)	Bajo (Verde)	Alto (Rojo)	Bajo (Verde)
5	Alto (Naranja)	Bajo (Verde)	Bajo (Verde)	Alto (Naranja)
6	Bajo (Verde)	Bajo (Verde)	Alto (Rojo)	Bajo (Verde)
7	Bajo (Verde)	Alto (Naranja)	Bajo (Verde)	Alto (Rojo)

ayuda no solo a ver la importancia de cada índice en los grupos sino también a comparar los índices entre los diferentes estados. Más aún, en la Figura 5.10 se muestra la distribución geográfica de los agrupamientos.



Figura 5.10: Ubicación geográfica de los grupos de entidades federativas sobre un mapa de la república mexicana.

Tabla 5.4: Ranking de los promedios de los indicadores para cada grupo.

Indicador	G 1	G 2	G 3	G 4	G 5	G 6	G 7
POP	4	7	6	3	1	5	2
EDAD	5	4	2	7	1	6	3
REZAGOSOC	2	4	6	1	7	5	3
ANALFA15PORCIENTO	2	3	4	1	4	3	1
POPSALMINPORCIENTO	3	2	5	1	4	7	6
INDIGENAPORCIENTO	3	2	5	1	6	7	4
OCUPACIONAGRO	3	4	5	1	7	6	2
POBREZAEXTREMA	4	2	5	1	6	7	3
DEPENDENCIADEMO	2	6	5	1	7	4	3
PIBPERCAPITA	6	1	3	7	2	4	5
PIBPRIMARIASPORCIENTO	5	7	4	3	6	2	1
TMean1970-2000	6	1	3	2	7	5	4
TMax1970-2000	6	1	2	3	7	5	4
PCP1970-2000	5	1	6	2	4	7	3
MAIZ2003-2012	5	6	2	4	3	7	1

Para hacer un mejor análisis de las características de cada grupo, se analizaron también los promedios en cada grupo de las variables en el conjunto original de datos. Estos promedios se rankearon y se muestran en la Tabla 5.4. En este tenemos que la posición 1 denota a los estados con el mayor promedio para ese indicador, mientras que la posición 7 denota a aquel grupo con el menor promedio.

5.1.3. Rendimientos futuros de la producción de maíz

Se analizaron también los rendimientos futuros proyectados en la producción de maíz de temporal para distinto rangos de años (2005-2035, 2035-2065 y 2069-2099). El conjunto de datos obtenidos para este análisis fue tomado del reporte hecho por Estrada [1]. Estos datos son proyecciones para los rendimientos futuros originados del programa AgMIP para el escenario RCP8.5, es decir, un escenario de muy altas emisiones de GEI y de inacción en política climática internacional.

De acuerdo con estos rendimientos futuros, se hizo un cálculo de las diferencias porcentuales entre estos y los rendimientos para los años de 2003-2012 originalmente considerados. Esto último se hizo con el propósito de identificar que entidades federativas se proyecta tengan más pérdidas en su rendimiento en la producción de maíz, así como para analizar en que rango de años esto podría suceder. Los resultados de este cálculo se muestran en la Tabla 5.5. En la Tabla 5.6 se muestran los cambios análogos en producción en toneladas del maíz para los mismos periodos de tiempo. De igual modo, en el figuras A.1, A.2 y A.3 que se encuentran en el Apéndice A se muestran mapas de la república representando este cambio porcentual para los periodos de años a corto, mediano y largo plazo, esto con la finalidad de visualizar más fácilmente la distribución geográfica de estos cambios porcentuales.

Tabla 5.5: Cambios porcentuales de los rendimientos en la producción de maíz para periodos de tiempo futuros bajo el escenario RCP8.5 con respecto a los rendimientos en los años 2003-2012.

Años	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7
2005-2035	-2.71	-10.79	-8.37	-6.61	-0.44	-7.43	-5.98
2035-2065	-12.78	-34.56	-19.97	-20.27	-5.35	-20.02	-15.68
2069-2099	-31.87	-73.98	-40.59	-47.90	-13.38	-38.46	-33.35

Tabla 5.6: Cambios en la producción (toneladas) del maíz para periodos de tiempo futuros bajo el escenario RCP8.5 con respecto a los rendimientos en los años 2003-2012.

Años	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7
2005-2035	14,379	15,732	5,648	73,616	7,296	9,224	73,082
2035-2065	53,491	48,986	13,184	226,629	44,282	19,630	189,432
2069-2099	132,932	103,748	25,271	544,109	102,172	37,393	397,010

En la gráfica en la Figura 5.11 se muestra la representación radial de estos cambios porcentuales para cada uno de los grupos. Finalmente, se realizó también un análisis de agrupamiento jerárquico tomando los rendimientos para las diferentes proyecciones.

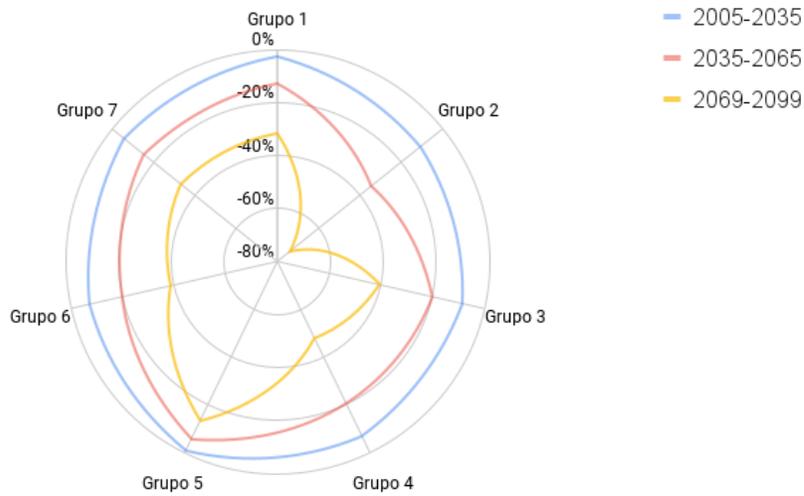


Figura 5.11: Gráfica radial de los cambios porcentuales de los rendimientos para cada grupo.

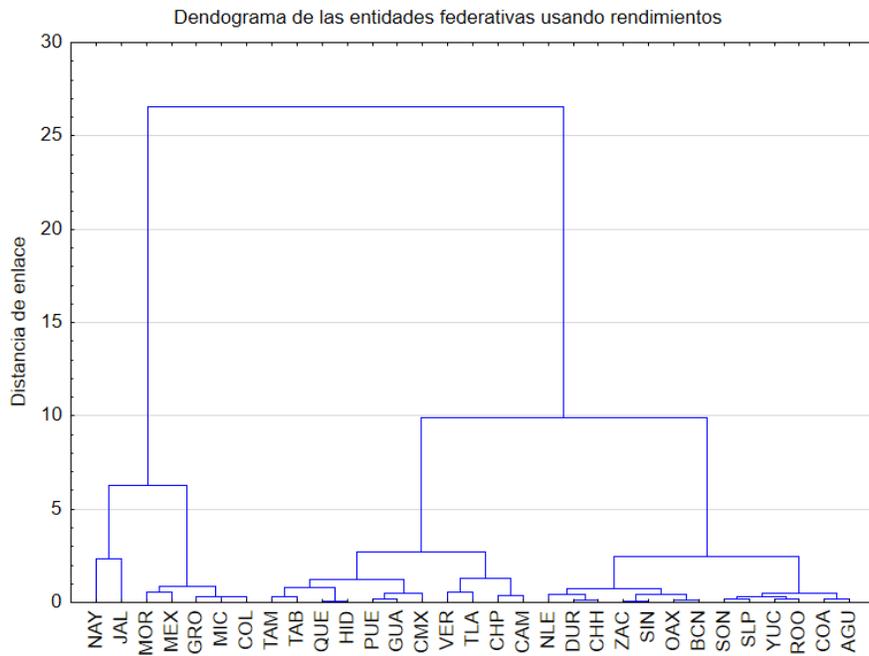


Figura 5.12: Dendograma obtenido del análisis aglomerativo de las entidades federativas para los valores de los rendimientos proyectados para los años 2005-2035, 2035-2065 y 2069-2099.

Al igual que en el dendograma mostrado en la Figura 5.8, se identificaron 7 grupos específicos. Esto con la finalidad de notar si había coincidencias con el dendograma hecho a partir de las variables iniciales.

5.1.4. Índice de riesgo para el rendimiento en la producción de maíz

Además del análisis de componentes principales realizado para los 31 estados de la república que cuentan con producción de maíz en el periodo base 2003-2012, se hizo un análisis similar para los periodos a corto, mediano y largo plazo, es decir, 2005-2035, 2035-2065 y 2069-2099. Al igual que en el primer análisis de componentes realizado, se eligió el número de componentes de acuerdo con el criterio de Kaiser y, en cada uno de estos tres análisis subsecuentes, se obtuvieron componentes cuyas entradas de los eigenvectores con los mayores pesos coinciden con los del análisis original. Debido a esto se identificó a estos componentes con los mismos nombres: índice de marginación y pobreza, índice de temperatura, índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita e índice de rendimiento en la producción de maíz.

A partir de estos resultados se hizo el cálculo de un índice de riesgo para el rendimiento en la producción de maíz. Para el cálculo de este se asignaron valores de 1 para aquellos valores de su respectivo índice que contribuyeran de manera negativa a las condiciones que podrían poner a la entidad en una posición vulnerable contra pérdidas en el rendimiento, como es el caso de tener un alto índice de marginación y pobreza y un alto índice de rendimiento. Por el otro lado, se asignó el valor de 0 para aquellos valores de índice que no contribuyeran a esta potencial vulnerabilidad.

Para la obtención del índice se realizó un promedio de estos valores para cada entidad federativa en cada uno de los tres periodos de años. En la tabla 5.7 se muestran los valores para el índice de riesgo en el rendimiento en la producción de maíz. En las tablas B.1 y B.2 ubicadas en el Apéndice B se muestran los valores del índice de riesgo obtenidos a partir del análisis de componentes realizados con los rendimientos en la producción de maíz proyectados para el periodo de años 2005-2035 y 2035-2065. Estas no fueron añadidas en esta sección debido a que no se encontró una gran variación entre los valores de los índices mostrados en la tabla 5.7 y estas últimas dos.

Análogamente, en la tabla 5.8 se muestran los valores del índice de riesgo para el periodo a largo plazo 2069-2099. A diferencia de los dos anteriores este se incluyó en este apartado pues hay más movilidad de estados y permite hacer una comparación en los valores iniciales y finales.

Tabla 5.7: Índice de riesgo para el rendimiento en la producción de maíz para el rango de años histórico.

Entidad	Grupo	Índice de riesgo
BCN	6	0
QUE	6	0
AGU	6	0.25
CHH	6	0.25
COA	6	0.25
DUR	6	0.25
NLE	3	0.25
SLP	6	0.25
TAM	3	0.25
ZAC	6	0.25
CAM	2	0.5
CMX	5	0.5
COL	3	0.5
GUA	6	0.5
HID	1	0.5
JAL	7	0.5
MEX	5	0.5
MOR	3	0.5
OAX	4	0.5
ROO	2	0.5
SON	3	0.5
TAB	2	0.5
TLA	1	0.5
VER	7	0.5
YUC	2	0.5
MIC	7	0.75
NAY	3	0.75
PUE	1	0.75
SIN	7	0.75
CHP	4	1
GRO	4	1

Tabla 5.8: Índice de riesgo para el rendimiento en la producción de maíz para el rango de años 2069-2099 bajo el RCP8.5.

Entidad	Grupo	Índice de riesgo
BCN	6	0
QUE	6	0
AGU	6	0.25
CHH	6	0.25
COL	3	0.25
DUR	6	0.25
NLE	3	0.25
SLP	6	0.25
SON	3	0.25
TAM	3	0.25
ZAC	6	0.25
CAM	2	0.5
CMX	5	0.5
COA	6	0.5
GUA	6	0.5
HID	1	0.5
MEX	5	0.5
MOR	3	0.5
OAX	4	0.5
ROO	2	0.5
TAB	2	0.5
TLA	1	0.5
YUC	2	0.5
CHP	4	0.75
JAL	7	0.75
MIC	7	0.75
PUE	1	0.75
SIN	7	0.75
VER	7	0.75
GRO	4	1
NAY	3	1

6 Discusión

6.1. Análisis de los grupos obtenidos

Grupo 1

De acuerdo a los resultados presentados en la gráfica en la Figura 5.9 podemos ver que el grupo 1 incluye a los estados con valores bajos para el índice de temperatura y unos valores en los índices de marginación y pobreza, rendimiento y dependencia, en el rango medio. De igual modo, esto mismo se ve reflejado en los resultados mostrados en las tablas 5.3 y 5.4, en estas tenemos que los estados en este primer grupo cuentan con una marginación media. Esto se refleja en la posición que ocupa en la Tabla 5.4 para el porcentaje de la población viviendo en pobreza extrema y con un salario mínimo. Pese a esto tenemos que tiene un índice de rezago social alto, lo que nos sugiere que la población de estos estados padece de carencias sociales como acceso a la educación, salud y servicios básicos. Tenemos también que este grupo ocupa la posición 6 en PIB per cápita y 5 en contribución al PIB en actividades primarias, por lo que se trata de estados cuyo sector primario no es muy importante, al estar los estados de este grupo enfocados en las actividades terciarias [113]. En la Tabla 5.4 vemos también que la producción de maíz en estos estados es baja pues ocupa la quinta posición. Podemos inferir que no tienen una gran producción de maíz de temporal comercial, sin embargo, sí cuentan con pequeños productores sembrando para el autoconsumo, particularmente en el estado de Tlaxcala [63]. Adicionalmente, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 5.10, es importante notar que dichos agrupamientos son coherentes geográficamente. Vemos que los estados pertenecientes a este grupo se encuentran en la parte central del país.

Grupo 2

Conforme a los resultados en la Figura 5.9 y la Tabla 5.3 podemos notar que el grupo 2 tiene un alto valor para el índice de marginación y pobreza y uno bajo para el rendimiento en la producción de maíz por lo que podríamos decir que en general los estados en este grupo tienen una población vulnerable y no tiene una fuerte presencia de producción de maíz de temporal. De igual modo, los estados en este grupo tienen las mayores temperaturas promedio de entre el resto de los grupos.

A partir de la Tabla 5.4 podemos notar que los estados en el grupo 2 son aquellos que cuentan en promedio con el PIB per cápita más alto. Recordando lo mostrado en

la Figura 5.9 y en la Tabla 5.3 de que los estados en este grupo tienen en promedio índices de marginación y pobreza altos, esto se puede atribuir a que cuentan con menores poblaciones y a que el estado de Campeche tiene una producción de petróleo y de gas natural muy importante, siendo el productor número uno de México en ambos ámbitos, lo que eleva el PIB promedio entre los estados [113]. De igual modo, el que estos estados tengan un PIB per cápita alto y a la vez un índice de marginación y pobreza alto sugiere una importante brecha de ingresos entre la población. Los estados en este grupo cuentan con la menor cantidad de población de entre el resto de los grupos y también con un gran porcentaje de población indígena, en promedio el 45 % de la población total del grupo. Esta cifra es comparable únicamente con aquella del grupo 4, donde tenemos que en promedio el 45.3 % de la población es indígena. En la Tabla 5.4 se observa que este grupo tiene la menor participación al PIB nacional en actividades primarias y cuenta con un lugar medio bajo en el ranking de ocupación agropecuaria, esto nos sugiere que la actividad agrícola no es la más importante en estas entidades. Esto se ve reforzado pues los estados del grupo 2 tienen un enfoque mayormente orientado a las actividades terciarias (Quintana Roo y Yucatán) y a las actividades secundarias (Campeche y Tabasco) [113], como se mencionó anteriormente con el ejemplo de la actividad petrolera. Pese a esto es importante notar que la tasa de ocupación agropecuaria se encuentra en medio del ranking por lo que, pese a que las actividades primarias no son el enfoque de la economía de estas entidades, sí cuentan con producción agrícola. Por ejemplo, el estado de Yucatán, que pertenece a este grupo, es el primer productor nacional de berenjena, mientras que Quintana Roo es el primer productor de trigo [113]. Más aún, estos estados sí tienen presencia de pequeños agricultores de maíz de temporal, particularmente en el estado de Yucatán [63]. De igual modo, una característica que comparten los estados en este grupo es que todos cuentan con un grado de intensidad migratoria muy bajo [114]. Finalmente, en la Figura 5.10 podemos ver que los estados que conforman este grupo son los que se encuentran en la península de Yucatán.

Grupo 3

En el grupo 3 tenemos estados ubicados en regiones del país muy distintas y con climas cálidos subhúmedos y secos, como se puede ver en 5.10. Esto es importante a destacar pues el resto de los grupos sí comparten una ubicación geográfica y un tipo de clima similar. A partir de la Tabla 5.4 podemos ver que estos estados tienen una baja marginación al encontrarse en la posición 6 de rezago social y 5 en pobreza extrema. Los estados cuentan también con una población vieja, al ocupar la segunda posición en edad promedio. Recordando lo visto en la Figura 5.9, este grupo tiene el segundo índice de rendimiento en la producción de maíz y, como podemos ver en la Tabla 5.4, ocupa la posición 4 en la contribución al PIB nacional en actividades primarias y la 5 en ocupación agropecuaria. Podemos entonces inferir que, pese a que estos estados se enfocan principalmente a los sectores secundarios y terciarios, sí tienen una producción agrícola importante. De igual modo, estos estados cuentan con presencia de pequeños productores de maíz de temporal, aunque esta es pequeña [63]. Por último, notamos que de acuerdo con la Figura 5.10, los estados que conforman

este grupo se encuentran predominantemente al norte del país.

Grupo 4

De la Tabla 5.4 podemos ver que los estados en el grupo 4 son aquellos que cuentan con los mayores valores para el índice de rezago, la mayor población viviendo en pobreza extrema y que se considera indígena. La población en estos estados cuenta entonces con grandes carencias sociales. Esto se ve reflejado en los resultados mostrados en la Figura 5.9, donde vemos que este grupo es el primero en índice de marginación y pobreza. Estos estados ocupan también la última posición en PIB per cápita, la tercera en la contribución al PIB nacional en actividades primarias y la cuarta en rendimiento de maíz. Además, estos estados cuentan con aproximadamente la mitad de su población viviendo en áreas rurales. Otro aspecto a tomar en cuenta es que estos estados cuentan con altos porcentajes de emigración. Oaxaca y Guerrero tienen un alto grado de intensidad migratoria a Estados Unidos [114], mientras que Chiapas cuenta con un porcentaje alto de emigración interna, con el mayor movimiento dirigido a Quintana Roo y Baja California [113]. De igual modo, son el grupo que ocupa el primer lugar en ocupación agropecuaria. De acuerdo con Bellón *et al.*, los estados de este grupo cuentan con un gran número de pequeños productores de maíz de temporal [63]. Por lo tanto, tenemos que estos estados tienen una gran vulnerabilidad socioeconómica y su producción agrícola es importante, incluyendo el maíz de temporal, particularmente para los pequeños productores. Asimismo, se puede ver también que, de acuerdo con la Figura 5.10, los estados pertenecientes al grupo 4 son aquellos más al sur del país.

Grupo 5

En el grupo 5 tenemos a los estados con el segundo mayor índice de rendimiento, según lo mostrado antes en la Tabla 5.3. También en este grupo tenemos a los estados con la población más grande y de mayor edad promedio. Estos son también los estados con el menor rezago social y el segundo mayor PIB per cápita. A pesar de esto tienen un índice de marginación media y los mayores coeficientes de GINI [115], es decir, es una población sumamente desigual, particularmente en la Ciudad de México. Otra característica que los estados de este grupo comparten es que ocupan la primera y segunda posición en emigración interna [113], mientras que en migración a Estados Unidos ocupan las últimas posiciones [114]. Pese a que estos estados tienen la menor tasa de ocupación agropecuaria, ocupan la sexta posición en contribución al PIB nacional en actividades primarias y la tercera en rendimiento de maíz. Podemos inferir que las actividades primarias no son una parte importante de la economía de estas entidades, puesto que las actividades secundarias y terciarias tienen una presencia mayor [113]. Por su baja tasa de ocupación agropecuaria y por la dependencia que tienen en otras actividades económicas, podemos concluir que las actividades primarias no son indispensables para estas entidades. A pesar de esto, sí hay una producción de maíz de temporal importante y presencia de pequeños productores, particularmente en el Estado de México [63, 116].

Grupo 6

En el grupo 6 tenemos estados que tienen, según la Tabla 5.4, el menor porcentaje de la población con pobreza extrema y ocupada con un sólo salario mínimo. De igual modo, ocupan el penúltimo lugar en ocupación agropecuaria y en producción de maíz. A pesar de esto su contribución al PIB nacional en actividades primarias es el segundo más alto, por lo que podemos concluir que pese su contribución en actividades primarias es alta, estas no están relacionadas con la actividad agrícola. Sin embargo, sí hay un número importante de pequeños productores de maíz en algunos de los estados en el grupo como Guanajuato, Zacatecas, Querétaro y San Luis Potosí [63]. Los miembros de este grupo abarcan desde la parte central hasta la norte del país.

Grupo 7

En el grupo 7 tenemos a las entidades con el mayor promedio de índice de rendimiento en la producción de maíz y un valor alto para el índice de temperatura. En este grupo los índices de marginación y pobreza y de dependencia demográfica, edad e ingresos, tienen valores medios, como se puede ver en los resultados mostrados en 5.9. Más aún, de acuerdo con la Tabla 5.4, en este grupo se encuentran los estados que ocupan el número uno en producción de maíz y el número uno en contribución al PIB nacional en actividades primarias. Un estado que resalta en este grupo es Jalisco, que es el primer productor de maíz de temporal. Los estados en este grupo en promedio ocupan el segundo lugar en la tasa de ocupación agropecuaria, lo que junto con su contribución al PIB nacional en actividades primarias nos sugiere que la actividad agrícola es una fuente de empleos importante en estos estados. Estos estados cuentan con la segunda población más grande y ocupan la tercera posición en los indicadores de rezago social y pobreza extrema, además de la primera en porcentaje de población mayor de 15 años que es analfabeta. Asimismo, de acuerdo con el mapa mostrado en la Figura 5.10 vemos que los estados en este grupo se encuentran en las costas del país en la parte central y norte.

6.2. Proyecciones a futuro

Como se mencionó anteriormente, se obtuvieron los cambios porcentuales y de producción entre los rendimientos de maíz de temporal presentes y su proyección a las tres escalas de tiempo. En estos resultados observamos que, pese a que en la Tabla 5.5 se muestra que el grupo 2 es va a experimentar las mayores pérdidas en rendimiento, es el grupo 4 el que va a tener las pérdidas más grandes en su producción, de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 5.6. Esto se debe a que el rendimiento en la producción de maíz es una medida de la cantidad de maíz cosechado entre el área cultivada. Particularmente, en la Tabla A.2 el cambio de producción a nivel nacional. Tenemos que para el periodo 2005-2035 habrá una pérdida de 750,736.17 toneladas, para 2035-2065 se tiene 2,138,367.78 y para 2069-2099 un total de 4,726,663.08. A nivel nacional para el periodo histórico se tiene una producción de maíz de temporal

de 12,207,492.73 toneladas. Esto quiere decir que para el periodo de años 2005-2035 se predice habrá una reducción del 6.15 %, para el periodo 2035-2035 de 17.52 % y para los años 2069-2099 de 38.72 %.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, los resultados mostrados en la Tabla 5.5 y lo mostrado en la Tabla 5.4, podemos resumir lo observado para cada grupo:

- **Grupo 1:** Pese a que los estados en este grupo no muestran una dependencia económica fuerte en las actividades agrícolas, como se puede ver en su posición en la Tabla 5.4 para el porcentaje de contribución al PIB agregado en actividades primarias, sí tienen un alto índice de rezago social y un bajo PIB per cápita. De igual modo, como se muestra en la Tabla 5.5, enfrentan pérdidas proyectadas en su rendimiento de -2.71 % en la próxima década y de -31.87 % para el final del siglo. Esto nos indica que los estados en el grupo se encuentran en riesgo de sufrir pérdidas sustantivas en su capacidad de producción de maíz de temporal. Más aún, estos estados cuentan con una presencia grande de pequeños productores de maíz de temporal, en especial el estado de Tlaxcala [63].
- **Grupo 2:** En este grupo se tienen estados cuyas actividades primarias, particularmente la producción de maíz de temporal no es una actividad económica importante. Sin embargo, estos son estados que tienen un índice de pobreza y marginación considerable. Adicionalmente, como se vio en la Tabla 5.5, son los estados que van a sufrir las mayores pérdidas según los rendimientos proyectados. Van a experimentar una pérdida del -10.79 % para esta década y de -73.98 % para el final del siglo. Por lo tanto, pese a no ser un productor importante de maíz sí va a sufrir pérdidas que, por su escala y por la vulnerabilidad socioeconómica de la población, pueden tener importantes consecuencias socioeconómicas. Más aún, el maíz de temporal es un importante cultivo de autoconsumo y por lo tanto, genera una vulnerabilidad alimentaria a las personas que lo siembran; de acuerdo con Bellón *et al.* (2021), estos pequeños productores de maíz tienen presencia en estos estados, particularmente en el estado de Tabasco.
- **Grupo 3:** En este grupo se tienen estados cuya economía está más enfocada a los sectores secundarios y terciarios, pero que de igual modo cuentan con un alto rendimiento de maíz, ocupando la posición 2 de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 5.4. Estos estados cuentan con un bajo índice de marginación y pobreza y un alto PIB per cápita. Por consiguiente, debido a que se trata de una población con baja vulnerabilidad socioeconómica y a que su economía está principalmente enfocada en otros sectores, podemos inferir que se encuentra en un riesgo bajo a tener impactos socioeconómicos debido a los efectos cambio climática en la producción de maíz de temporal. Sin embargo, pese a esto es importante notar que se proyecta sufran pérdidas grandes en el rendimiento de la producción, con -8.37 % esta década y -40.59 % para el final del siglo y que, de acuerdo con Bellón *et al.*, cuentan con una presencia de pequeños agricultores de este cultivo, pese a que esta es poca.

- **Grupo 4:** Los estados en este grupo son los estados con la mayor vulnerabilidad socioeconómica, como puede verse en la gráfica 5.9 donde este grupo ocupa el primer lugar en el índice de marginación y pobreza. La población en estos estados es en su mayoría indígena y se encuentran mayormente ocupados en actividades agrícolas. Del mismo modo, tienen un gran volumen de pequeños productores de maíz de temporal. Por lo tanto, pese a que su índice de rendimiento en la producción de maíz de temporal no es el más alto, su alta marginación y su cantidad de pequeños productores nos indica que son estados vulnerables a sufrir fuertes pérdidas en la producción de maíz de temporal. Este hecho se exagera aún más por el hecho de que se proyecta que experimenten cambios porcentuales en los rendimientos de la producción importantes, con -6.61 % esta década y -47.90 % para el final del siglo. Al igual que en el grupo 2, es importante considerar también el porcentaje de maíz de temporal que se destina al autoconsumo y los efectos directos que estos cambios en rendimiento pueden tener en los modos de vida de la población de estos estados.
- **Grupo 5:** Tenemos que los dos estados que forman parte de este grupo tienen un índice de marginación y pobreza medio, así como bajo rezago social y una baja contribución al PIB estatal en actividades primarias. De igual modo, son aquellos con el segundo mayor PIB per cápita. Por lo tanto, tenemos estados que tienen un nivel de pobreza menor y que no tienen una fuerte dependencia económica de las actividades agrícolas, pese a que su índice de rendimiento en la producción de maíz de temporal es alto. Sin embargo, sí tienen una presencia importante de pequeños productores por lo que una disminución en rendimiento podría producirles inseguridad alimentaria y exacerbar la emigración que de por sí ya es muy grande en estos estados. Estos estados son los que se proyecta van a sufrir menos cambios porcentuales en el rendimiento de la producción, con -0.44 % para esta década y -13.38 % para el final del siglo. Podemos entonces inferir que estos estados no se encuentran en riesgo de sufrir grandes pérdidas en la producción de maíz de temporal debido al cambio climático a corto plazo; pero a mediano y largo plazo esta disminución puede significar retos socioeconómicos para la población de bajos ingresos cuya seguridad alimentaria depende de este cultivo.
- **Grupo 6:** Los estados en este grupo no tienen altos índices de pobreza y marginación y tienen una baja tasa de ocupación agropecuaria. Sin embargo, tenemos que su contribución al PIB estatal en actividades primarias es alto por lo que podemos inferir que estas actividades primarias no tienen que ver que la producción agrícola del maíz de temporal. Esta conclusión también se apoya en el hecho de que los estados en este grupo tienen en promedio un índice de rendimiento en la producción bajo. A pesar de esto, de acuerdo con Bellón sí hay presencia de pequeños productores en algunos estados en el grupo y los resultados mostrados en la Tabla 5.5 nos muestran que van a tener pérdidas importantes. A corto plazo perderán el 7.43 %, a mediano 20.02 % y a largo 38.46 %. Por lo que podemos concluir que el porcentaje de la población afectada va a ser pequeño, sin em-

bargo, al tratarse de personas principalmente de bajos ingresos, es importante tenerlo en cuenta. Debido a esto, los estados en este grupo no se encuentran en riesgo de sufrir pérdidas económicas importantes como consecuencia del cambio climático en la producción de maíz de temporal.

- **Grupo 7:** Pese a que en este grupo no se encuentran los estados con el mayor índice de marginación y pobreza ni con el mayor rezago social, son estados que sí cuentan con una contribución al PIB estatal en actividades primarias y una tasa de ocupación agropecuaria alta. Más aún, estos cuentan con el mayor índice de rendimiento en la producción de maíz de temporal por lo que podemos inferir que se trata de estados cuya producción de este maíz es una actividad económica importante para su desarrollo. Un estado que destaca es Jalisco que es el mayor productor de maíz de temporal del país y que según Bellón *et al.* tiene poco autoconsumo lo que nos dice que la mayoría se destina al comercio. Así que estos estados más allá de poner en riesgo a los pequeños productores, pone en riesgo la seguridad de empleos y de alimentación a todo el país. De acuerdo con lo mostrado en la tabla 5.5, vemos que se proyecta que experimentan una reducción en su rendimiento de -5.98 % en esta década y -33.35 % para el final del siglo. Estas pérdidas a corto y largo plazo podrían implicar una necesidad de importar maíz. Debido a esto, podemos concluir que estos estados se encuentran en un gran riesgo de sufrir pérdidas económicas en la producción de maíz de temporal, así como pérdida de empleos.

De los resultados anteriores podemos destacar a los grupos 2 y 4 como aquellos más vulnerables a sufrir pérdidas económicas y a padecer consecuencias socioeconómicas importantes. Particularmente el grupo 2 pues es el que va a experimentar los mayores cambios en rendimiento en la producción de maíz de temporal a corto, mediano y largo plazo. El grupo 4 también va a experimentar cambios en el rendimiento que se ven exacerbados por la gran vulnerabilidad socioeconómica que tiene la población en el presente.

Al incluir a los productores más importantes de maíz de temporal, el grupo 7 también es de los más vulnerables a padecer pérdidas. En este caso, al tratarse de estados cuyo índice de marginación y pobreza son muy altos y cuya presencia del cultivo de maíz destinado al autoconsumo no es muy importante, podemos inferir que los riesgos que corren se encuentran en el ámbito de seguridad laboral. Al tener una alta tasa de ocupación agropecuaria y ser los principales contribuyentes al PIB estatal en actividades primarias, concluimos que gran parte de la población ocupada en estos estados se dedica directamente a la producción agrícola, por lo que cambios en el rendimiento traerían consecuencias adversas para estos trabajadores.

Los grupos que no fueron identificados como en alto riesgo de sufrir pérdidas muy severas fueron los grupos 1, 3, 5 y 6. El grupo 1 debido a que no es un gran contribuyente a la producción de maíz y las actividades primarias no son de gran importancia para su economía. Pese a tener un alto índice de rendimiento en la producción de maíz, no se identificó al grupo 3 como en alto riesgo de sufrir pérdidas debido a que se trata de estados con bajos niveles de pobreza y cuyas actividades

económicas no están enfocadas a las actividades primarias. Un caso similar es el del grupo 5, que pese a contar con un alto índice de rendimiento en la producción de maíz, cuentan con un bajo rezago social, su economía se apoya fuertemente en otros sectores y son los que cuentan los menores cambios en los rendimientos a corto, mediano y largo plazo. Finalmente se identificó así al grupo 6 pues son estados que tienen una baja tasa de ocupación agropecuaria y no tienen un índice de marginación y pobreza alto.

Sin embargo, a pesar de que se no se identificó que los grupos 1, 3, 5 y 6 se encontraran en riesgo de sufrir pérdidas económicas importantes en la producción de maíz de temporal como consecuencia del cambio climático, es importante notar que de acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 5.5, también se proyecta que estos grupos sufran pérdidas en su capacidad física de producción de maíz de temporal. Además, los estados en estos grupos sí cuentan con presencia de pequeños productores. En el caso del Estado de México (Grupo 5) se tiene que el maíz destinado al autoconsumo es de 20.5 % [116], por lo que una disminución en su rendimiento tendría consecuencias adversas a la calidad de vida de las personas que dependen directamente de este cultivo. Este recurso, además de ser una fuente de alimento importante, es también una fuente de empleo para los pequeños productores. Evidencia de esto ve en el artículo de 2018 de Boué *et al.* que documentaron que en comunidades campesinas del Estado de México, 55 % del maíz nativo producido en estas localidades fue vendido localmente, 20 % fue vendido fuera de la comunidad, 18 % fue usado como alimento ganadero y 7 % como alimento propio [117].

Un cambio en la producción, por más pequeño que sea podría provocar que esta población tenga que buscar alternativas alimentarias y explorar otras fuentes de ingresos. Por lo que, pese a que la mayor parte de la población no vaya sufrir por estos cambios, sí van a afectar a la parte más vulnerable por lo que es importante pensar en estrategias de mitigación y adaptación. Cabe destacar que esta conclusión puede probar ser no muy certera y requiere de más investigación para tener una idea más clara respecto al riesgo que podrían correr. Para observar características más específicas de cada estado y poder llegar a conclusiones precisas del riesgo que cada uno de ellos corre de padecer pérdidas socioeconómicas como consecuencia de un cambio en el rendimiento de maíz, se sugiere realizar el análisis aquí presentado con variables que reflejen de manera comprensiva la situación de autoconsumo en cada entidad. Más aún, en México se tienen documentadas 64 razas de maíz, de las cuales 35 se encuentran en Oaxaca [118], por lo que se sugiere añadir variables que describan la producción de otros tipos de variedades de maíz a la aquí estudiada.

Lo mencionado en los puntos anteriores sobre la agricultura de autoconsumo es muy importante pues recordemos que un quinto del maíz de temporal producido en México se destina a este fin [57]. Más aún, los estados de Guerrero (Grupo 4), Oaxaca (Grupo 4) y el Estado de México (Grupo 5) cuentan con la mayor producción de maíz que no se lleva al mercado, es decir, que se destina para el autoconsumo y, como muestra Bellón *et al.* en su artículo del 2021, la mayoría de los estados de la república cuentan con presencia de pequeños agricultores de maíz de temporal. La producción de autoconsumo es una alternativa muy importante en el país pues permite a varias familias alcanzar la seguridad alimentaria [61], además de proveerles un recurso para

llevar a cabo comercio y asegurar sus ingresos.

Por ende, las pérdidas que se van a afrontar como consecuencia del cambio climático en la producción de maíz de temporal no van a ser exclusivamente económicas. Este va a afectar la capacidad de millones de familias mexicanas de producir y acceder a alimento. Más aún, el cultivo de temporal por parte de los pequeños productores es de suma importancia cultural y de biodiversidad pues estos preservan las variedades de maíz endémicas de México [64].

Un cambio en la producción agrícola para los pequeños productores se podría traducir en un incremento en la emigración debido a la inseguridad alimentaria y a la falta de recursos. Igualmente, al ser un alimento de autoconsumo importante, varias entidades se verían en la necesidad de importar este alimento.

Las pérdidas que se enfrentan no son cosa del futuro. Estas ya se están observando en varias partes del país con consecuencias negativas. Por ejemplo, desde el 2015, en la comunidad de Tehuacán en el estado de Puebla (Grupo 1), según cifras oficiales recopiladas, el cultivo de maíz se redujo casi una quinta parte. Los agricultores de la región atribuyeron este declive a la falta de lluvias en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre [119].

Análogamente, en el estado de Campeche, que pertenece al grupo que va a sufrir el mayor cambio porcentual en la producción de maíz, pequeños productores se enfrentan ya a las primeras pérdidas de cultivos de maíz. Los productores al norte de la región enfrentaron pérdidas en el mes de Octubre del 2021 cuando no registraron precipitaciones pluviales en más de mes y medio [120]. Algo similar fue observado en el mismo año en municipios del estado de Quintana Roo (Grupo 2) [121]. Estas dos observaciones refuerzan aún más que los estados dentro de los grupos 1 y 2 podrían experimentar consecuencias adversas en su producción de maíz como consecuencia del cambio climático.

Finalmente, es importante hacer notar que, al comparar el dendograma en la Figura 5.8 mostrado en la Figura 5.12 con el anterior, esperaríamos obtener algunas coincidencias en los grupos. Particularmente, se esperaría que se formaran grupos con entidades similares. Esto pues en este nuevo dendograma estamos agrupando a las entidades bajo la característica de cuales van a ser sus pérdidas. De igual modo, al incluir el rendimiento presente esperaríamos ver en los agrupamiento hechos a entidades que cuenten con niveles de rendimiento similares y cuyas pérdidas a corto, mediano y largo plazo vayan a ser similares también. Esto no se observó pues, como podemos notar, no hay coincidencias entre los agrupamientos resultantes. Una posible razón por la que estos no coinciden es que este segundo análisis no tiene en cuenta las característica socioeconómicas de las entidades y, por tanto, no puede ofrecernos un análisis más complejo.

6.3. Análisis del índice de riesgo

En la Tabla 5.7 vemos que los estados pertenecientes al grupo 6 cuentan en su mayoría con valores de 0 y 0.25 para el índice de riesgo. En la Tabla B.3 ubicada en el Apéndice B se muestra el promedio por grupo de este índice y se observa que el

promedio para este grupo es de 0.22. El bajo valor del índice de riesgo está acorde con lo estudiado anteriormente pues este grupo fue identificado como el menos en riesgo de padecer pérdidas socioeconómicas como consecuencia del cambio de rendimiento en la producción de maíz.

Por el otro lado, los valores para el índice de riesgo de los estados del grupo 4 se encuentran en el extremo opuesto, con valores para el índice de 1 y de 0.5, con un promedio de 0.83. Nuevamente, esto concuerda con la caracterización de este grupo como en riesgo de tener fuertes pérdidas en la producción de maíz de temporal y como consecuencia sufrir impactos socioeconómicos como consecuencia de estas.

Anteriormente habíamos establecido que los estados del grupo 7 son aquellos que se encuentran más en riesgo de sufrir pérdidas económicas en la producción de maíz. Esto se ve reforzado por los resultados mostrados en la Tabla 5.7 y en la Tabla B.3 pues tenemos que el valor del índice de riesgo para estas entidades se encuentra entre 0.75 y 0.5, con un promedio de 0.63. Algo importante que notamos en estos datos es que el estado de Jalisco, aquel con el mayor rendimiento en la producción de maíz, tiene un valor que se encuentra únicamente en el rango medio para el índice de riesgo. Este resultado podemos atribuirlo a que pese a su alta producción, es una entidad con baja vulnerabilidad socioeconómica.

En el caso de las entidades federativas en los grupos 2 y 5 tenemos que se encuentran en su mayoría en el rango medio de los valores del índice de riesgo. Este resultado no nos permite llegar a una conclusión específica de si estos valores para el índice se traducen en potenciales pérdidas en el rendimiento en la producción de maíz. De acuerdo con lo discutido anteriormente, el grupo 2 se encuentra en riesgo de sufrir pérdidas debido a la vulnerabilidad socioeconómica de la población en estos estados, mientras que el grupo 5 se identificó como no encontrarse en riesgo de sufrir grandes pérdidas en la producción de maíz de temporal debido al cambio climático.

Un caso similar se repite para las entidades en los grupos 1 y 3. Estos resultados no nos muestran características en común entre los estados de los grupos pues poseen valores para el índice de riesgo muy variados y, por lo tanto, no nos permiten sacar conclusiones específicas de cada grupo. En el análisis anterior, el grupo 1 fue identificado con anterioridad como estar en riesgo de sufrir pérdidas sustantivas en su capacidad de producción de maíz y el grupo 3 como a estar en riesgo bajo.

Como se mencionó previamente, para los periodos 2005-2035 y 2035-2065 no se obtuvo una gran variación entre los valores obtenidos para los índices, como se observa en las tablas B.1 y B.2. Esto nos podría sugerir que el riesgo que presenta el cambio climático al rendimiento en la producción de maíz en cada entidad no se va a exacerbar con el paso del tiempo. Sin embargo, esta podría marcarse como una conclusión errónea pues en este análisis sólo se está considerando como indicador a futuro las proyecciones de rendimiento y el cambio de temperatura y precipitación, para un análisis más completo se sugiere la introducción de proyecciones de nuevas variables bajo este escenario particular, el RCP8.5.

No obstante, sí se observó movilidad en el estado de Veracruz, esto de un valor de 0.5 en el periodo histórico base a un valor de 0.75 en el periodo 2005-2035. El estado de Jalisco también presentó un cambio, de 0.5 en 2005-2035 a 0.75 en 2035-2065. Es de interés notar que ambas entidades muestran la tendencia a aumentar e valor

de su índice y ambas forman parte del grupo 7 que fue identificado anteriormente como el grupo más en riesgo. También es interesante la presencia de esta tendencia en el estado de Jalisco pues pese a no ser un estado muy vulnerable, sí es un gran productor de maíz de temporal lo que nos hace inferir que un futuro donde se enfrenta a grandes pérdidas de maíz, incluso con su nivel socioeconómico, provocará grandes pérdidas económicas en la producción de maíz de temporal. Esto último afectará de una manera particularmente fuerte a la población del estado cuyos empleos y seguridad alimentaria dependen directamente de este cultivo.

A partir de la Tabla 5.8, vemos que entre estos los rangos presente y 2069-2099 tenemos un cambio en 7 de las 31 entidades. De estas 7 entidades, 4 aumentan su valor y 3 lo disminuyen. Entre las entidades que aumentaron de valor para el índice de riesgo se encuentra Nayarit (Grupo 3) que comenzó con 0.75 y terminó con 1. Por el otro lado, entre las entidades que disminuyeron en este valor se encuentra Chiapas (Grupo 4) que pasó de 1 a 0.75. Otros estados importantes de notar son aquellos que no muestran cambios como es el caso de Querétaro (Grupo 6) y Aguascalientes (Grupo 6) que presentan un valor constante de 0 para este índice, esto acorde con la conclusión anterior de que las entidades del grupo 6 se encuentran en el menor riesgo a sufrir pérdidas en el rendimiento en la producción de maíz.

Esta similitud en los valores puede ser a su vez observada en la Tabla B.3. En esta vemos que existe una variación entre los promedios por grupo de los valores del índice de riesgo para el periodo histórico y el 2069-2099. En los casos de los grupos 1, 2 y 5 no hay variación, mientras que en los grupos restantes se tienen cambios de aproximadamente el 10 %.

En general notamos que no existe una gran variación entre los valores de los índices a través de los periodos de tiempo como sería de esperar. Esto se puede atribuir a que no se tiene la suficiente cantidad de variables para asegurar la sensibilidad del índice a los indicadores. Un análisis más detallado que el realizado podría hacerse tomando en cuenta más variables socioeconómicas e indicadores cambiantes para los otros escenarios RCP.

Es de interés notar que para ambos índices, periodo de años histórico y periodo 2069-2099, los valores al ser evaluados por grupo no tuvieron una buena coincidencia con los resultados presentados en la sección anterior. Tal es el caso del grupo 2 que, pese a haber sido identificado previamente como encontrarse en riesgo de tener pérdidas en la producción de maíz y por lo tanto, sufrir importantes consecuencias socioeconómicas, tiene un valor promedio para el índice de 0.50 en ambos periodos de años. De igual modo, para las entidades federativas en los grupos 1 y 3 no vemos una clara tendencia en los valores de los índices y en consecuencia no podemos hacer conjeturas sobre el comportamiento de las entidades como grupo.

Esta falta de coincidencia en las características presentadas anteriormente para los grupos y el índice de riesgo de las entidades podría ser atribuida al número de variables consideradas en el análisis de componentes principales. Pese a que en este análisis se tomaron en cuenta indicadores socioeconómicos, climáticos y de rendimiento en la producción de maíz, así como de los rendimientos futuros proyectados bajo el escenario RCP8.5, estos no caracterizan de manera completa la situación agrícola y climática de cada entidad. Para un análisis más completo se necesitaría ampliar el número de

variables para dar una descripción comprensiva de la situación de cada estado tanto presente como a futuro bajo diversos escenarios RCP. Al llevar a cabo el análisis de componentes principales con estas nuevas variables se tendría potencialmente un mayor número de componentes a considerar para la composición del índice de riesgo. Asimismo, el índice consideraría dimensiones adicionales a las cuatro propuestas en este trabajo y tendría una mayor sensibilidad a cambios en las características de cada entidad que reflejarían de manera fiable el riesgo de cada una.

7 Conclusiones

Se realizó el análisis estadístico de las 31 entidades federativas de México que producen maíz de temporal. Para esto se utilizaron 18 indicadores de distintas bases de datos para cubrir las siguientes dimensiones: socioeconómica, rendimiento en la producción de maíz y temporalidad.

Utilizando el análisis de componentes principales se obtuvieron cuatro componentes que lograron explicar el 80.17 % de la varianza del conjunto de datos original y que fueron interpretados como índices de marginación y pobreza, temperatura, dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita, y rendimiento en la producción de maíz. Usando estos cuatro nuevos componentes se realizó la agrupación de las entidades federativas en 7 grupos con el método del agrupamiento jerárquico aglomerativo.

Se observó que los estados en mayor riesgo de sufrir pérdidas en el rendimiento en la producción de maíz de temporal y que, en consecuencia, se enfrentan a impactos socioeconómicos fuertes son aquellos pertenecientes al grupo 4. Es decir, los estados ubicados al sur del país: Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Estos son los estados que cuentan con el mayor valor para el índice de marginación y pobreza y mayor cambio porcentual en los rendimientos en la producción de maíz. Pese a que estos no son los estados con el mayor rendimiento en la producción de maíz actual, su posición socioeconómica los señala como en riesgo.

Análogamente, se identificó al grupo 2, los estados de: Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo; como en riesgo de padecer impactos socioeconómicos fuertes como consecuencia del cambio en el rendimiento en la producción de maíz pues, pese a tener un valor para el índice de marginación y pobreza medio y uno bajo para el índice de rendimiento, los estados que conforman este grupo van a experimentar las más grandes pérdidas porcentuales en su producción de maíz, con pérdidas del 73.98 % para el final del siglo. Por lo tanto, pese a no ser productores importantes de maíz de temporal, la gran escala de las pérdidas estimadas ponen a estos estados en una posición de riesgo a sufrir impactos socioeconómicos si bien no a corto plazo, si a mediano y largo plazo.

Estos estados cuentan con una fuerte presencia de comunidades rurales cuya actividad agrícola del maíz de temporal es una fuente directa no sólo de alimento, sino también de empleo. Por lo que una reducción en los rendimientos de este cultivo significa una gran pérdida para esta población que es una mayoría de bajos ingresos; pérdida que puede llegar a generar inseguridad alimentaria. De igual modo, debido a que son los pequeños productores los que mantienen viva la biodiversidad del maíz en el país, un cambio en el rendimiento puede afectar la continuación de varias especies

de maíz, al llevar a estos productores a cambiar de cultivos.

De la misma forma, los estados del grupo 7: Jalisco, Michoacán, Sinaloa y Veracruz; se encuentran en una posición de vulnerabilidad a sufrir pérdidas pues se trata de los estados con el mayor valor para el índice de rendimiento en la producción de maíz. Estos son estados cuyas actividades primarias son importantes para la economía estatal, por lo que se puede inferir que este cultivo representa una fuente generadora de empleos. Más aún, estos no cuentan con una amplia presencia de pequeños productores de maíz de temporal. Debido a esto podemos concluir que cambios en el rendimiento del cultivo van a poner en riesgo, si bien no la seguridad alimentaria de la población rural como fue el caso anterior, sí van a afectar la seguridad de empleos. Particularmente, al ser los principales productores de maíz de temporal de México, una pérdida en el rendimiento en estos estados significaría una escasez del producto a nivel nacional. Esto traerá como consecuencia una fuerte disminución en la producción de maíz de temporal en el país y este se enfrentará a la necesidad e importación, así como la población se enfrentará a una alza en precios en este producto, que es considerado un importante fuente alimentaria por toda la población.

Por el lado contrario, no se identificaron en riesgo de padecer impactos socioeconómicos debido a la disminución en el rendimiento en la producción de maíz a las entidades en los grupos 1, 3, 5 y 6. Las entidades del grupo 1 no cuentan con un gran rendimiento en la producción de maíz y van a enfrentar cambios bajos a corto plazo. Los estados del grupo 3 son entidades con bajos índices de marginación y pobreza y cuya actividad económica no depende de las actividades primarias. Asimismo, los estados del grupo 5 que son la Ciudad de México y el Estado de México, van a enfrentar los menos cambios a corto, mediano y largo plazo y su economía no depende de la actividad agrícola. Los estados del grupo 6 tienen bajos índices de marginación y pobreza bajos al igual que índices de rendimiento en la producción de maíz bajos también.

Pese a que no identificó que estos estados se encuentren en gran riesgo de sufrir pérdidas, todos son estados que cuentan, aunque sea en menor medida, con pequeños productores de maíz de temporal por lo que las disminuciones en rendimiento que ocurran son relevantes para la población rural. De igual modo, pese a que no enfrenten grandes cambios a corto plazo, sí enfrentan cambios muy importantes a largo plazo. Debido a esto, un análisis más extensivo que incorpore variables adicionales que describan la dependencia de cada estado en la agricultura de autoconsumo es necesario para brindar conclusiones puntuales del riesgo al que se enfrenta cada entidad.

Para complementar las observaciones hechas para cada uno de los grupos se ideó un índice de riesgo para el periodo de años base y los periodos a corto, mediano y largo plazo bajo el escenario RCP8.5. Se caracterizó a grandes rasgos el riesgo que el cambio climático representa para el rendimiento en la producción de maíz para cada una de las entidades y se corroboraron las conclusiones anteriores derivadas del análisis jerárquico aglomerativo. Es importante hacer notar que este índice tuvo una falta de sensibilidad temporal que se ve reflejada en la poca variabilidad de los valores entre periodos. Esto se puede atribuir a una falta de indicadores, particularmente de aquellos estimados para los periodos de tiempo futuros.

Bajo un escenario de inacción el país se enfrenta a la pérdida del 40 % de rendi-

miento en la producción de maíz a largo plazo. Esto traerá consecuencias adversas para toda la población pero particularmente a la población vulnerable socioeconómicamente y para aquellos estados cuya producción de este producto es importante para su desarrollo económico. Algunas de las consecuencias que la población de estos estados va a experimentar son inseguridad alimentaria y pérdida de empleos. Sin mencionar el daño que esto va a traer en la biodiversidad del maíz, un alimento tradicional del país que cuenta con 64 razas de maíz documentadas. Por estas razones, es importante continuar los estudios en esta área con el fin de evaluar el riesgo que enfrentan las poblaciones dependientes de estos cultivos y así desarrollar medidas apropiadas de mitigación y adaptación.

A Cambios en rendimiento y producción

Tabla A.1: Cambio porcentual en el rendimiento en la producción de maíz de temporal en cada entidad federativa a corto, mediano y largo plazo bajo el escenario RCP8.5.

Entidad	Grupo	Cambio (%) rendimiento 2005-2035	Cambio (%) rendimiento 2035-2065	Cambio (%) rendimiento 2069-2099
HID	1	3.44	13.56	25.41
PUE	1	4.93	15.82	40.67
TLA	1	0.63	10.05	29.05
CAM	2	14.15	38.73	80.13
ROO	2	6.75	28.13	67.41
TAB	2	10.19	33.17	71.06
YUC	2	6.54	31.81	69.23
COL	3	7.42	18.76	39.27
MOR	3	3.98	14.16	38.00
NAY	3	3.97	11.71	27.38
NLE	3	26.15	47.63	65.02
SON	3	8.62	18.72	54.16
TAM	3	15.53	32.82	54.04
CHP	4	7.97	25.05	63.35
GRO	4	5.30	16.38	35.14
OAX	4	7.23	20.86	50.19
CMX	5	1.16	0.99	5.44
MEX	5	1.25	7.53	17.36
AGU	6	10.55	19.83	39.29
BCN	6	10.74	14.07	47.22
CHH	6	8.91	24.53	47.54
COA	6	22.61	38.54	45.19
DUR	6	7.02	16.68	33.66
GUA	6	7.27	15.44	32.53
QUE	6	7.95	18.26	32.60
SLP	6	11.53	22.99	36.66
ZAC	6	10.64	20.02	37.90
JAL	7	6.60	14.97	30.51
MIC	7	4.34	13.21	26.63
SIN	7	6.96	17.82	43.71
VER	7	6.07	19.63	44.03

Tabla A.2: Cambio en la producción (toneladas) de maíz de temporal en cada entidad federativa a corto, mediano y largo plazo bajo el escenario RCP8.5, junto con el cambio total a nivel nacional.

Entidad	Grupo	Cambio (Tn) producción 2005-2035	Cambio (Tn) producción 2035-2065	Cambio (Tn) producción 2069-2099
HID	1	7,457.96	29,392.36	55,074.93
PUE	1	34,362.31	110,132.04	283,178.28
TLA	1	1,317.66	20,948.41	60,543.33
CAM	2	41,235.88	112,835.90	233,426.02
ROO	2	2,314.58	9,648.91	23,118.15
TAB	2	12,920.70	42,076.31	90,135.30
YUC	2	6,455.14	31,384.60	68,313.81
COL	3	1,974.38	4,991.76	10,451.06
MOR	3	3,072.31	10,941.50	29,364.57
NAY	3	6,103.10	18,015.53	42,130.71
NLE	3	9,927.13	18,080.15	24,680.65
SON	3	153.76	333.99	966.41
TAM	3	12,655.68	26,739.99	44,030.75
CHP	4	117,513.84	369,436.60	934,172.65
GRO	4	60,680.62	187,411.19	402,172.12
OAX	4	42,654.27	123,037.89	295,983.53
CMX	5	-89.83	76.48	421.92
MEX	5	14,681.56	88,488.27	203,921.95
AGU	6	1,450.57	2,724.88	5,400.42
BCN	6	-29.89	39.16	131.44
CHH	6	8,276.32	22,786.51	44,157.33
COA	6	2,752.31	4,691.05	5,500.60
DUR	6	7,597.38	18,063.45	36,456.08
GUA	6	23,692.15	50,316.21	106,008.26
QUE	6	6,695.66	15,386.58	27,466.53
SLP	6	12,122.36	24,169.27	38,537.98
ZAC	6	20,460.81	38,490.89	72,879.76
JAL	7	183,964.86	417,144.31	849,973.53
MIC	7	40,289.29	122,746.13	247,427.61
SIN	7	3,603.25	9,219.49	22,615.92
VER	7	64,470.07	208,617.98	468,021.46
Nacional:		750,736.17	2,138,367.78	4,726,663.08

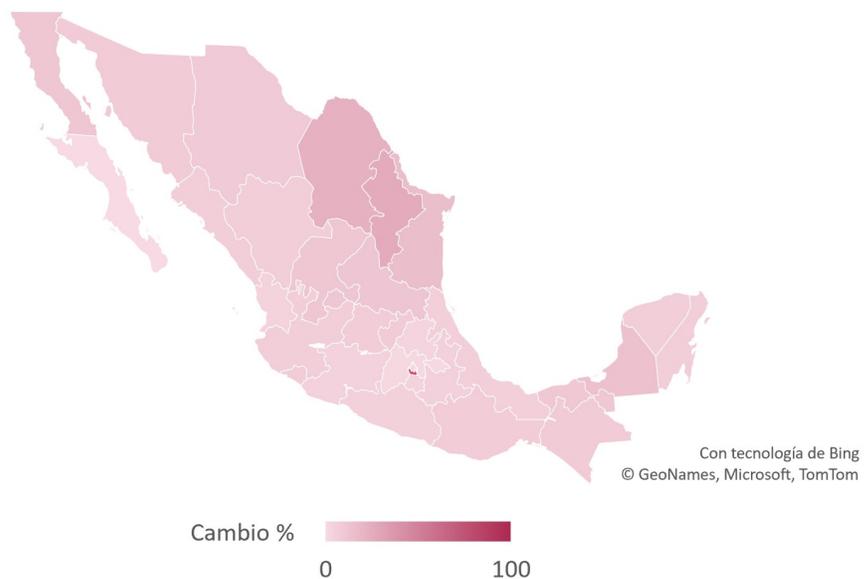


Figura A.1: Mapa de la república mexicana representando el cambio porcentual en el rendimiento en la producción de maíz bajo el escenario RCP8.5 para el periodo de años 2005-2035.

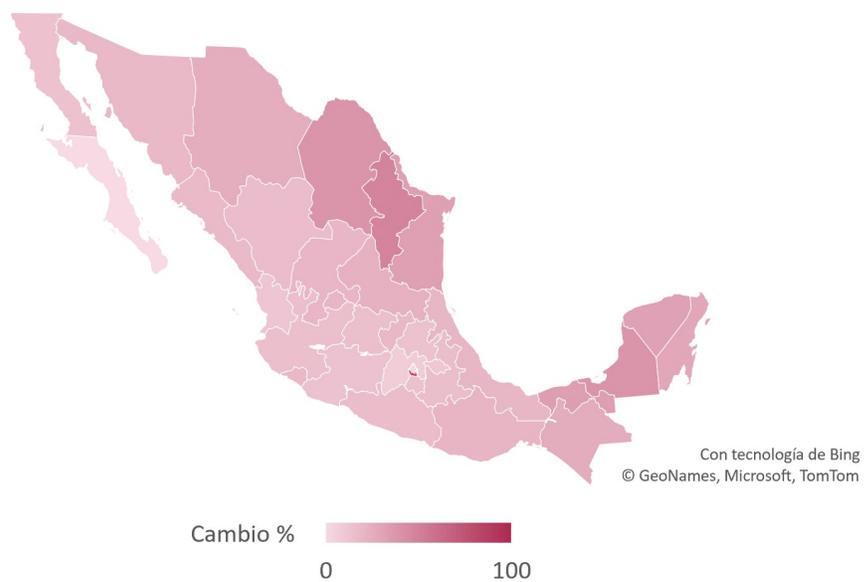


Figura A.2: Mapa de la república mexicana representando el cambio porcentual en el rendimiento en la producción de maíz bajo el escenario RCP8.5 para el periodo de años 2035-2065.

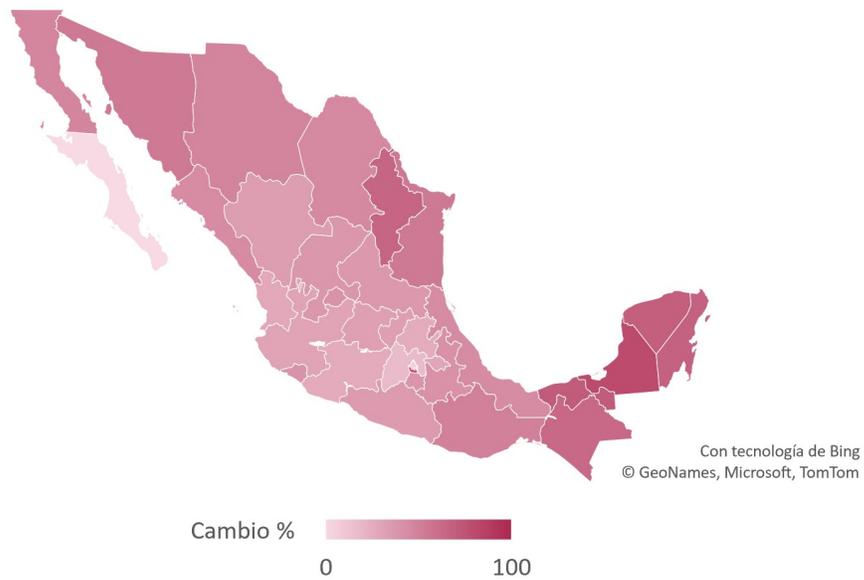


Figura A.3: Mapa de la república mexicana representando el cambio porcentual en el rendimiento en la producción de maíz bajo el escenario RCP8.5 para el periodo de años 2069-2099.

B Índice de riesgo

Tabla B.1: Índice de riesgo para el rendimiento en la producción de maíz para el rango de años 2005-2035 bajo el RCP8.5.

Entidad	Grupo	Índice de riesgo
BCN	6	0
QUE	6	0
AGU	6	0.25
CHH	6	0.25
COA	6	0.25
DUR	6	0.25
NLE	3	0.25
SLP	6	0.25
TAM	3	0.25
ZAC	6	0.25
CAM	2	0.5
CMX	5	0.5
COL	3	0.5
GUA	6	0.5
HID	1	0.5
JAL	7	0.5
MEX	5	0.5
MOR	3	0.5
OAX	4	0.5
ROO	2	0.5
SON	3	0.5
TAB	2	0.5
TLA	1	0.5
YUC	2	0.5
MIC	7	0.75
NAY	3	0.75
PUE	1	0.75
SIN	7	0.75
VER	7	0.75
CHP	4	1
GRO	4	1

Tabla B.2: Índice de riesgo para el rendimiento en la producción de maíz para el rango de años 2035-2065 bajo el RCP8.5.

Entidad	Grupo	Índice de riesgo
BCN	6	0
QUE	6	0
AGU	6	0.25
CHH	6	0.25
COA	6	0.25
COL	3	0.25
DUR	6	0.25
NLE	3	0.25
SLP	6	0.25
TAM	3	0.25
ZAC	6	0.25
CAM	2	0.5
CMX	5	0.5
GUA	6	0.5
HID	1	0.5
MEX	5	0.5
MOR	3	0.5
OAX	4	0.5
ROO	2	0.5
SON	3	0.5
TAB	2	0.5
TLA	1	0.5
YUC	2	0.5
JAL	7	0.75
MIC	7	0.75
NAY	3	0.75
PUE	1	0.75
SIN	7	0.75
VER	7	0.75
CHP	4	1
GRO	4	1

Tabla B.3: Promedio por grupo del índice de riesgo para el rendimiento en a producción de maíz para el rango de años histórico y el rango 2069-2099 bajo el RCP8.5.

Grupo	Promedio Histórico	Promedio 2069-2099
1	0.58	0.58
2	0.50	0.50
3	0.46	0.42
4	0.83	0.75
5	0.50	0.50
6	0.22	0.25
7	0.63	0.75

C Diagramas de dispersión

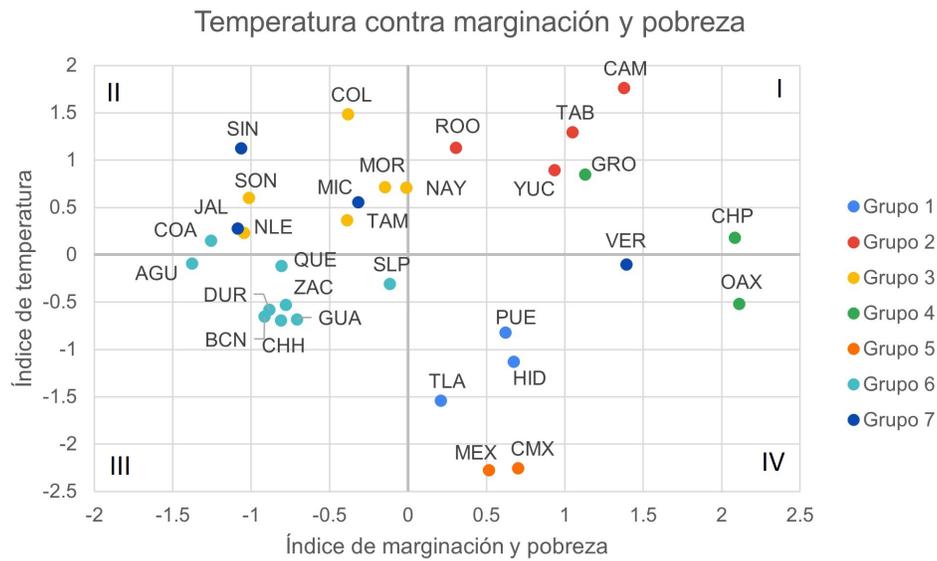


Figura C.1: Diagrama de dispersión de los valores del índice de temperatura contra el índice de marginación y pobreza de cada una de las 31 entidades federativas con los cada uno de los grupos obtenidos del análisis jerárquico marcados.

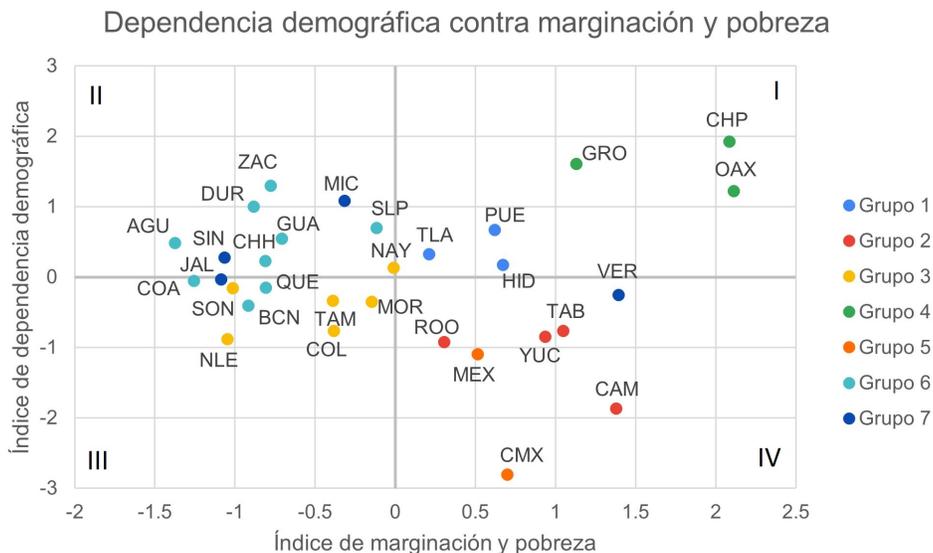


Figura C.2: Diagrama de dispersión de los valores del índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita contra el índice de marginación y pobreza de cada una de las 31 entidades federativas con los cada uno de los grupos obtenidos del análisis jerárquico marcados.

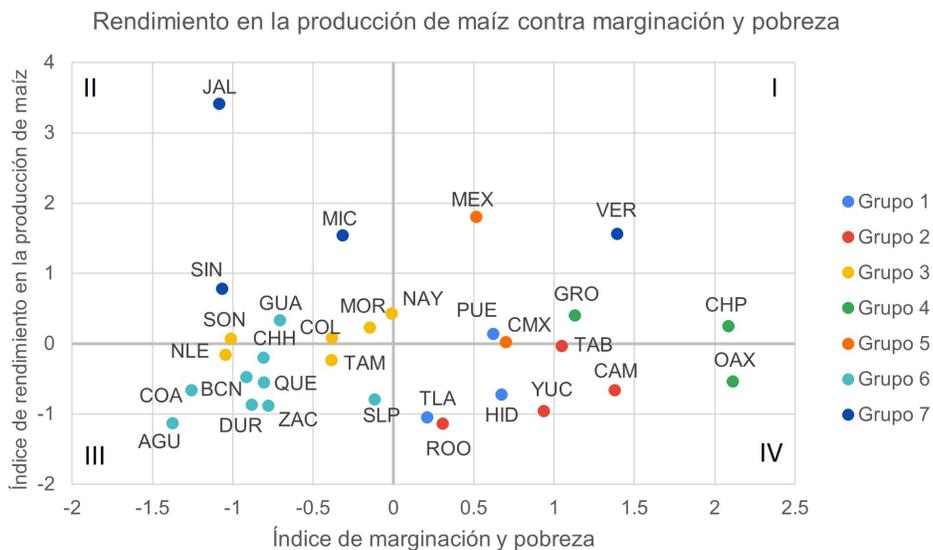


Figura C.3: Diagrama de dispersión de los valores del índice de rendimiento en la producción de maíz contra el índice de marginación y pobreza de cada una de las 31 entidades federativas con los cada uno de los grupos obtenidos del análisis jerárquico marcados.

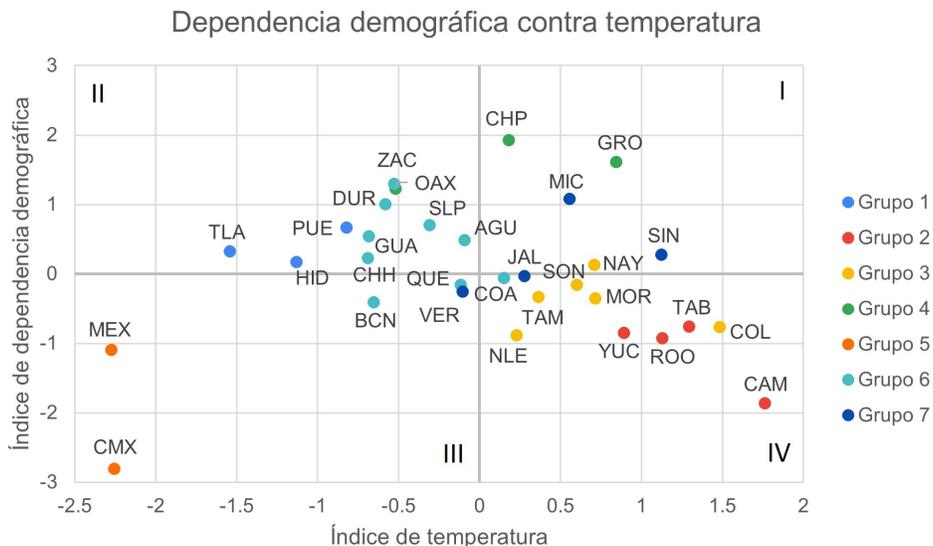


Figura C.4: Diagrama de dispersión de los valores del índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita contra el índice de temperatura de cada una de las 31 entidades federativas con los cada uno de los grupos obtenidos del análisis jerárquico marcados.

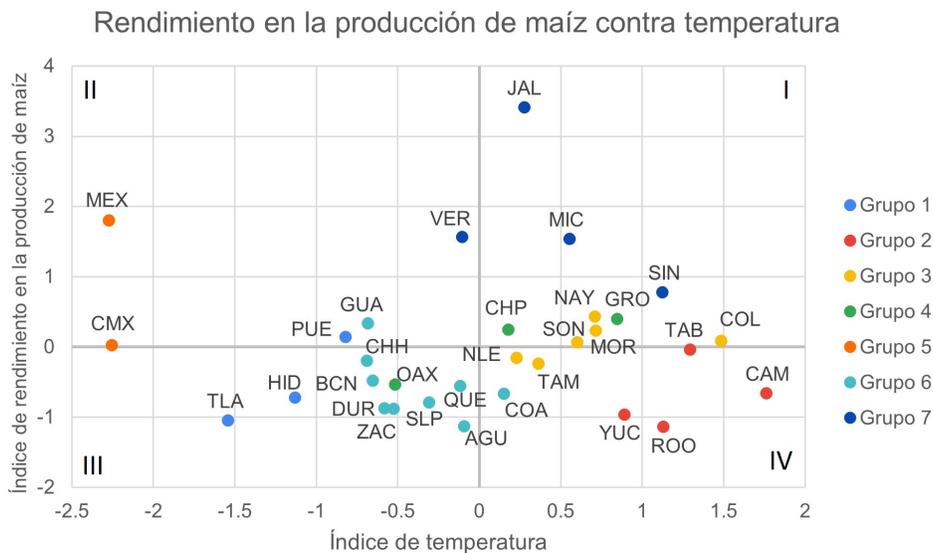


Figura C.5: Diagrama de dispersión de los valores del índice de rendimiento en la producción de maíz contra el índice de temperatura de cada una de las 31 entidades federativas con los cada uno de los grupos obtenidos del análisis jerárquico marcados.

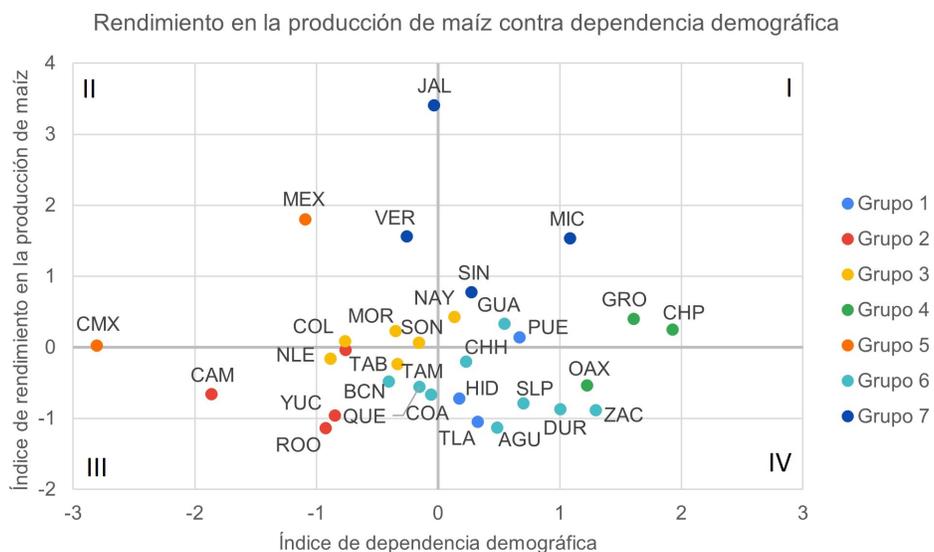


Figura C.6: Diagrama de dispersión de los valores del índice de rendimiento en la producción de maíz contra el índice de dependencia demográfica, edad e ingreso per cápita de cada una de las 31 entidades federativas con los cada uno de los grupos obtenidos del análisis jerárquico marcados.

Bibliografía

- [1] Estada, F., “Estimación de los costos económicos de cambio climático para México a nivel estatal y país bajo distintos escenarios de cambio climático”, *UNDP-México/INECC*, 2018. <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/301>.
- [2] IPCC, “Annex i: Glossary, en: Global warming of 1.5°C. an ipcc special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty”, 2018. [Equipo de redacción, J.B.R. Matthews]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- [3] Schmittner, A., *Introduction to Climate Science*. Oregon State University, 2018.
- [4] Farmer, G. T. y Cook, J., *Climate Change Science: A Modern Synthesis, vol. 1, The Physical Climate*, ch. Earth’s Surface Temperature. Nueva York: Springer, 2013.
- [5] Thompson, G. y Turk, J., *Earth Science and the Environment*, ch. 20,21. Thompson Brooks Cole, 2007.
- [6] Boeker, E. y van Grondelle, R., *Environmental Physics: Sustainable Energy and Climate Change*, ch. Climate and Climate Change. John Wiley & Sons, 2011.
- [7] Peixoto, J. P. y Oort, A. H., *Physics of Climate*, ch. Nature of the problem. American Inst. of Physics, 1992.
- [8] Ro, G., “In defense of milankovitch”, *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no. 24, 2006.
- [9] IPCC, “Summary for policymakers, en: Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change”, 2021. [Equipo de redacción, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, y B. Zhou]. IPCC, Ginebra, Suiza.

- [10] PAGES 2k Consortium, “Continental-scale temperature variability during the past two millennia”, *Nature Geoscience*, vol. 6, pp. 339–346, 2013.
- [11] Murray Tortarolo, G. N., “A breviary of earth’s climate changes using stephan-boltzmann law”, *Atmósfera*, 2021.
- [12] “Global surface temperature anomalies”, Recuperado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/anomalies.php#anomalies>.
- [13] IPCC, “Climate change 2007: Synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change”, 2007. [Equipo de redacción, R. K. Pachauri y A. Reisinger]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- [14] Hartmann, D. L., *Global Physical Climatology*, ch. Radiative Transfer. Elsevier, 2016.
- [15] Wallace, J. M. y Hobbs, P. V., *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, ch. Radiative Transfer. Elsevier, 2006.
- [16] Hartmann, D. L., *Global Physical Climatology*, ch. 1,2. Elsevier, 2016.
- [17] Zhong, W. y Haigh, J. D., “The greenhouse effect and carbon dioxide”, *Weather*, vol. 68, no. 4, pp. 100–105, 2013.
- [18] Lacis, A. A., Schmidt, G. A., Rind, D., y Ruedy, R. A., “Atmospheric co₂: Principal control knob governing earth’s temperature”, *Science*, vol. 330, no. 6002, pp. 356–359, 2010.
- [19] for Environmental Information, N. C., “State of the climate: Global climate report for annual 2021”, Recuperado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202113>, 2021.
- [20] Pierrehumbert, R. T., *Principles of Planetary Climate*. Cambridge University Press, 2010.
- [21] Tanhua, T., Körtzinger, A., Friis, K., Waugh, D. W., y Wallace, D. W. R., “An estimate of anthropogenic co₂ inventory from decadal changes in oceanic carbon content”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, no. 9, pp. 3037–3042, 2007.
- [22] Ballantyne, A. P., Alden, C. B., Miller, J. B., Tans, P. P., y White, J. W. C., “Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years”, *Nature*, vol. 488, pp. 70–72, 2012.
- [23] Friedlingstein, P., Jones, M. W., O’Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quere, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bopp, L., Chau, T. T. T., Chevallier, F., Chini,

- L. P., Cronin, M., Currie, K. I., Decharme, B., Djeutchouang, L. M., Dou, X., Evans, W., Feely, R. A., Feng, L., Gasser, T., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gurses, O., Harris, I., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Luijkx, I. T., Jain, A., Jones, S. D., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Kortzinger, A., Landschutzer, P., Lauvset, S. K., Lefevre, N., Lienert, S., Liu, J., Marland, G., McGuire, P. C., Melton, J. R., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rodenbeck, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Schwingshackl, C., Seferian, R., Sutton, A. J., Sweeney, C., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Vuichard, N., Wada, C., Wanninkhof, R., Watson, A. J., Willis, D., Wiltshire, A. J., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., y Zeng, J., “Global carbon budget 2021”, *Earth System Science Data*, vol. 14, no. 4, pp. 1917–2005, 2022.
- [24] Stern, N., “Stern review: the economics of climate change”, vol. 30, 2006.
- [25] SEMARNART, I., “Sexta comunicación nacional y segundo informe bienal de actualización ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático”, 2018.
- [26] IPCC, “Climate change 2014: Synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change”, 2014. [Equipo de redacción, R. K. Pachauri y L. A. Meyer]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- [27] IPCC, “Observations:atmosphere and surface, en: Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change”, 2013. [Equipo de redacción, T. F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- [28] Rosenzweig, C., Karoly, D., Vicarelli, M., Neofotis, P., Wu, Q., Casassa, G., Menzel, A., Root, T. L., Estrella, N., Seguin, B., Tryjanowski, P., Liu, C., Rawlins, S., y Imeson, A., “Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change”, *Nature*, vol. 453, pp. 353–357, 2008.
- [29] Hansen, G. y Stone, D., “Assessing the observed impact of anthropogenic climate change”, *Nature Climate Change*, vol. 6, pp. 532–537, 2016.
- [30] IPCC, “Summary for policymakers, en: Global warming of 1.5°C. an ipcc special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty”, 2018. [Equipo de redacción, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R.

- Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, y T. Waterfield]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- [31] IPCC, “Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility, en: Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change”, 2013. [Equipo de redacción, T. F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- [32] Knutson, T. R., McBride, J. L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., Held, I., Kossin, J. P., Srivastava, A. K., y Sugi, M., “Tropical cyclones and climate change”, *Nature Geoscience*, vol. 3, pp. 157–163, 2010.
- [33] Sadiddin, A., Cattaneo, A., Cirillo, M., y Miller, M., “Food insecurity as a determinant of international migration: evidence from sub-saharan africa”, *Food Security*, vol. 11, pp. 513–530, 2019.
- [34] Schmidhuber, J. y Tubiello, F. N., “Global food security under climate change”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, no. 50, pp. 19703–19708, 2007.
- [35] Gutiérrez, M. y Espinosa, T., *Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático: Diagnóstico Inicial, Avances, Vacíos y Potenciales Líneas de Acción en Mesoamérica*. Banco Interamericano de Desarrollo, 2010.
- [36] Gay, C., Estrada, F., y Conde, C. e. a., “Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in veracruz, mexico”, *Climatic Change*, vol. 79, pp. 259–288, 2006.
- [37] Climate Links, “Climate risk profile: Mexico”, Recuperado de: <https://www.climatelinks.org/resources/climate-risk-profile-mexico>.
- [38] Murray Tortarolo, G. N., “Seven decades of climate change across mexico”, *Atmósfera*, vol. 34, no. 2, pp. 217–226, 2021.
- [39] IPCC, “Summary for policymakers. en: Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. part a: Global and sectoral aspects. contribution of working group ii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change”, 2014. [Equipo de redacción, C. B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- [40] Hausfather, Z., “Explainer: The high-emissions ‘rcp8.5’ global warming scenario”, Recuperado de : <https://www.carbonbrief.org/explainer-the-high-emissions-rcp8-5-global-warming-scenario>, 2019.

- [41] RCP Database, “Information on individual rcps”, Recuperado de: <https://tn.tcat.iiasa.ac.at/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome#rcpinfo>.
- [42] Gurovich, L. A., *Fundamentos y diseño de sistemas de riego*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1985.
- [43] “Existen diferentes sistemas de riego en la agricultura”, Recuperado de: <https://www.gob.mx/senasica/articulos/existen-diferentes-sistemas-de-riego-en-la-agricultura?idiom=es>, Sep 2016.
- [44] Wani, S., Johan, R., y Theib, O., *Rainfed agriculture: Unlocking the potential*. CABI, 2009.
- [45] FAO, “The state of food and agriculture 2020. overcoming water challenges in agriculture”, 2020.
- [46] SIAP, “Anuario estadístico de la producción agrícola”, Recuperado de: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>, 2020.
- [47] “Agricultura, valor agregado (% del pib)”, Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS>, 2020.
- [48] SIAP, *Panorama Agroalimentario 2020*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020.
- [49] “La agricultura y su relación con la pobreza en México”, Recuperado de: http://www.cedrssa.gob.mx/post_la_n-agricultura-n_y_su_relacinin_con_la_n-pobreza_en_mn-xico-n.htm, March 2020.
- [50] “Invirtiendo en la población rural en México”, Recuperado de: https://www.ifad.org/documents/38714170/39150184/mexico_s_web.pdf/f51deb05-c52d-4614-a0cd-f3c84ab5d7f6, 2017.
- [51] Ritchie, H. y Roser, M., “Diet compositions”, *Our World in Data*, 2017. <https://ourworldindata.org/diet-compositions>.
- [52] Cassman, K. G., “Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 96, no. 11, pp. 5952–5959, 1999.
- [53] FAOSTAT, “Invirtiendo en la población rural en México”, Recuperado de: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>, 2020.
- [54] Ramirez-Cabral, N. Y. Z., Kumar, L., y Shabani, F., “Global alterations in areas of suitability for maize production from climate change and using a mechanistic species distribution model (climex)”, *Sci Rep*, vol. 7, no. 5910, 2017.

- [55] Piperno and, D. R. y Flannery, K. V., “Piperno dr, flannery kv. the earliest archaeological maize (*zea mays* l.) from highland mexico: new accelerator mass spectrometry dates and their implications. *proc natl acad sci u s a*. 2001;98(4):2101-2103. doi:”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 98, no. 4, pp. 2101–2103, 2001.
- [56] Ranum, P., Peña-Rosas, J. P., y Garcia-Casal, M. N., “Global maize production, utilization, and consumption”, *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1312, no. 1, pp. 105–112, 2014.
- [57] “Planeación agrícola nacional 2017-2030. maíz grano blanco y amarillo mexicano.”, Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256429/B_sico-Ma_z_Grano_Blanco_y_Amarillo.pdf, 2017.
- [58] Murray-Tortarolo, G. N., Jaramillo, V. J., y Larsen, J., “Food security and climate change: the case of rainfed maize production in mexico”, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 253-254, pp. 124–131, 2018.
- [59] “Agricultura: Producción por cultivo”, Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>, 2019.
- [60] “Tipos de cultivo, estacionalidad y ciclos”, <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/tipos-de-cultivo-estacionalidad-y-ciclos>, Oct 2016.
- [61] “La producción de autoconsumo no solo se utiliza para comer”, Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/autoconsumo?idiom=es>, 2020.
- [62] Jaramillo Albuja, J. G., Peña Olvera, B. V., Hernández Salgado, J. H., Díaz Ruiz, R., y Espinosa Calderón, A., “Caracterización de productores de maíz de temporal en Tierra Blanca, Veracruz”, *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 9, pp. 911 – 923, 08 2018. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342018000500911&nrm=iso.
- [63] Bellon, M. R., Mastretta-Yanes, A., Ponce-Mendoza, A., Ortiz-Santamaría, D., Oliveros-Galindo, O., Perales, H., Acevedo, F., y Sarukhán, J., “Beyond subsistence: the aggregate contribution of campesinos to the supply and conservation of native maize across mexico”, *Food Security*, vol. 13, pp. 39–53, 2021.
- [64] Bellon, M. R., Mastretta-Yanes, A., Ponce-Mendoza, A., Ortiz-Santamaría, D., Oliveros-Galindo, O., Perales, H., Acevedo, F., y Sarukhán, J., “Evolutionary and food supply implications of ongoing maize domestication by mexican campesinos”, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 285, no. 1885, 2018.
- [65] “Maíz el cultivo de México”, Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-el-cultivo-de-mexico>, Jul 2020.

- [66] Krishna Kumar, K., Rupa Kumar, K., Ashrit, R. G., Deshpande, N. R., y Hansen, J. W., “Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics”, *Climatic Change*, vol. 70, pp. 31–72, 2005.
- [67] Krishna Kumar, K., Rupa Kumar, K., Ashrit, R. G., Deshpande, N. R., y Hansen, J. W., “Climate impacts on indian agriculture”, *International Journal of Climatology*, vol. 24, no. 11, pp. 1375–1393, 2004.
- [68] Challenger, A., *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México : pasado presente y futuro*. México: UNAM, Instituto de Biología, 1982.
- [69] Ritchie, H. y Roser, M., “CO₂ and greenhouse gas emissions”, Recuperado de: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>, 2020.
- [70] FAO, *Climate change and food security: risks and responses*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
- [71] Gornall, J., Betts, R., Burke, E., Clark, R., Camp, J., Willett, K., y Wiltshire, A., “Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century”, *Phil. Trans. R. Soc. B*, vol. 365, no. 1554, p. 2973–2989, 2010.
- [72] Allan, R. P. y Soden, B. J., “Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes”, *Science*, vol. 321, no. 5895, pp. 1481–1484, 2008.
- [73] Feng, X., Porporato, A., y Rodriguez-Iturbide, I., “Changes in rainfall seasonality in the tropics”, *Nature Climate Change*, vol. 3, pp. 811–815, 2013.
- [74] Ruiz Corral, J. A., Medina García, G., Ramírez Díaz, J. L., Flores López, H. E., Ramírez Ojeda, G., Manríquez Olmos, J. D., Zarazúa Villaseñor, P., González Eguiarte, D. R., Díaz Padilla, G., y Mora Orozco, C. d. L., “Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México”, *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 2, pp. 309 – 323, 10 2011. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800011&nrm=iso.
- [75] Mendelsohn, R., “The impact of climate change on agriculture in developing countries”, *Journal of Natural Resources Policy Research*, vol. 1, no. 1, pp. 5–19, 2008.
- [76] Jägermeyr, J., Müller, C., Ruane, A. C., Elliott, J., Balkovic, J., Castillo, O., Faye, B., Foster, I., Folberth, C., Franke, J. A., Fuchs, K., Guarin, J. R., Heinke, J., Hoogenboom, G., Iizumi, T., Jain, A. K., Kelly, D., Khabarov, N., Lange, S., Lin, T.-S., Liu, W., Mialyk, O., Minoli, S., Moyer, E. J., Okada, M., Phillips, M., Porter, C., Rabin, S. S., Scheer, C., Schneider, J. M., Schyns, J. F., Skalsky, R., Smerald, A., Stella, T., Stephens, H., Webber, H., Zabel, F., y Rosenzweig,

- C., “Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models”, *Nature Food*, vol. 873, pp. 873–885, 2021.
- [77] *Agriculture and climate change – Challenges and opportunities at the global and local Level*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019.
- [78] Nelson, G. C., Valin, H., Sands, R. D., Havlik, P., Ahammad, H., Deryng, D., Elliott, J., Fujimori, S., Hasegawa, T., Heyhoe, E., Kyle, P., Von Lampe, M., Lotze-Campen, H., Croz, M. D., van Meijl, H., van der Mensbrugghe, D., Muller, C., Popp, A., Robertson, R., Robinson, S., Schmid, E., Schmitz, C., Tabeau, A., y Willenbockel, D., “Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 9, pp. 3274–3279, 2014.
- [79] Rosenzweig, C. y Parry, M. L., “Potential impact of climate change on world food supply”, *Nature*, vol. 367, pp. 133–138, 1994.
- [80] Cline, W., “Global warming and agriculture”, *Finance & Development*, vol. 0045, no. 001, p. A007, 2008.
- [81] Lobell, D. B., Schlenker, W., y Costa-Roberts, J., “Climate trends and global crop production since 1980”, *Science*, vol. 333, no. 6042, pp. 616–620, 2011.
- [82] IPCC, *Food Security and Food Production Systems, En: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC, 2014.
- [83] Tesfaye, K., Kruseman, G., Cairns, J. E., Zaman-Allah, M., Wegary, D., Zaidi, P., Boote, K. J., Rahut, D., y Erenstein, O., “Potential benefits of drought and heat tolerance for adapting maize to climate change in tropical environments”, *Climate Risk Management*, vol. 19, pp. 106–119, 2018.
- [84] Jones, P. G. y Thornton, P. K., “The potential impacts of climate change on maize production in africa and latin america in 2055”, *Global Environmental Change*, vol. 13, no. 1, pp. 51–59, 2003.
- [85] Ureta, C., González, E. J., Espinosa, A., Trueba, A., Piñeyro-Nelson, A., y Álvarez Buylla, E. R., “Maize yield in mexico under climate change”, *Agricultural Systems*, vol. 177, p. 102697, 2020.
- [86] Velázquez Angulo, G., Romero González, J., Ahumada Cervantes, R., y Flores Tavizón, E., “Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz”, 2014.
- [87] Guzmán-Soria, E., de la Garza Carranza, M., González-Farías, J., y Hernández-Martínez, J., “Análisis de los costos de producción de maíz en la región bajo de guanajuato”, *Análisis Económico*, vol. 29, no. 70, pp. 145–160, 2014.

- [88] Feng, S., Krueger, A. B., y Oppenheimer, M., “Linkages among climate change, crop yields and mexico us cross-border migration”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 32, pp. 14257–14262, 2010.
- [89] Murray Tortarolo, G. N. y Salgado, M. N., “Drought as a driver of mexico-us migration”, *Climatic Change*, vol. 164, no. 48, 2021.
- [90] Jolliffe, I. T., *Principal Components Analysis*. Springer, 2002.
- [91] Wichern, D. W. y Johnson, R. A., *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall, 1982.
- [92] Wilks, D. S., *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Elsevier, 2006.
- [93] Hartigan, J. A., *Clustering Algorithms*. John Wiley & Sons, 1975.
- [94] CONEVAL, “Medición de la pobreza: ¿qué es el índice de rezago social?”, Recuperado de: <https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Que-es-el-indice-de-rezago-social.aspx>, 2020.
- [95] Robles, J. N. y Navarro, D. M., “Analfabetismo en México: una deuda social”, *Realidad, datos y espacio. Revista internacional de estadística y geografía*, vol. 3, no. 3, pp. 5–17, 2012. <https://www.mexicosocial.org/analfabetismo-en-mexico-una-deuda-social/>.
- [96] Grupo Internacional de Trabajo sobre Asuntos Indígenas (IWGIA), “El mundo indígena 2020: México”, *El Mundo Indígena*, vol. 34, 2020. <https://www.iwgia.org/es/mexico/3745-mi-2020-mexico.html>.
- [97] CONEVAL, “Pobreza en la población indígena”, Recuperado de: https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_Indigena.aspx, 2018.
- [98] CEPAL, “Definición de algunos indicadores demográficos”, Recuperado de: https://www.cepal.org/sites/default/files/def_ind.pdf, N/A.
- [99] SEDEMA, “Glosario definición: Actividades económicas”, Recuperado de: [http://www.claraboya.com.mx/glosario-definicion/Actividades\\$\\$\\$20econ\\$\\$\\$C3\\$%\\$B3micas](http://www.claraboya.com.mx/glosario-definicion/Actividades$$$20econ$$$C3$%$B3micas), N/A.
- [100] Banxico Educa, “Producto interno bruto”, Recuperado de: <http://educa.banxico.org.mx/economia/crecimiento-pib.html>, N/A.
- [101] SIAP, “Sistema de información agroalimentaria y de consulta (siacon)”, 2018.
- [102] INEGI Censo de Población y Vivienda 2020, “Población total por entidad federativa y grupo quinquenal de edad según sexo, serie de años censales de 1990 a 2020”, Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=Poblacion_Poblacion_01_e60cd8cf-927f-4b94-823e-972457a12d4b, 2020.

- [103] INEGI. Censo de Población y Vivienda 2020, “Edad mediana por entidad federativa, serie de años censales de 1995 a 2020”, Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=Poblacion_Poblacion_04_bb9a3db4-4c69-4231-aaaf-abef21dda472, 2020.
- [104] CONEVAL, “Índice de rezago social 2020 a nivel nacional, estatal, municipal y localidad”, Recuperado de: https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Indice_Rezago_Social_2020.aspx, 2020.
- [105] INEGI Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo, “Población ocupada con ingresos de hasta un salario mínimo - 15 años y más”, Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/#tabMCcollapse-Indicadores>, 2021.
- [106] INPI, “Indicadores socioeconómicos de los pueblos indígenas de México, 2015: Estimaciones nacionales y por entidad federativa”, Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/239923/04-estimaciones-nacionales-por-entidad-federativa.pdf>, 2015.
- [107] INEGI Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo, “Indicadores por entidad federativa: Tasa de ocupación agropecuaria - 15 años y más”, Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/estatal/?ag=07000009#grafica>, 2021.
- [108] CONEVAL, “Resultados de pobreza en México 2020 a nivel nacional y por entidades federativas”, Recuperado de: https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2020.aspx, 2020.
- [109] INEGI Censo de Población y Vivienda, “Panorama sociodemográfico de México: Tabla de indicadores (razón de dependencia)”, Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197711.pdf, 2020.
- [110] INEGI Sistema de Cuentas Nacionales de México, “Pib de las actividades económicas por entidad federativa”, Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/programas/pibent/2013/#Tabulados>, 2019.
- [111] INEGI Sistema de Cuentas Nacionales de México, “Pib de las entidades federativas por actividad económica”, Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/programas/pibent/2013/#Tabulados>, 2019.
- [112] UCLA Advanced Research Computing, “Principal components (pca) and exploratory factor analysis (efa) with spss.”, Recuperado de: <https://stats.oarc.ucla.edu/spss/seminars/efa-spss/#s3>.
- [113] INEGI Cuéntame de México, “Información por entidad”, Recuperado de: cuentame.inegi.org.mx/monografias/default.aspx?tema=me, N/A.

- [114] CONAPO, “Índices de intensidad migratoria México-Estados Unidos 2010”, Recuperado de: http://www.conapo.gob.mx/swb/CONAPO/Indices_de_intensidad_migratoria_Mexico-Estados_Unidos_2010, 2010.
- [115] CONEVAL, “Coeficiente de gini, 2008-2018”, Recuperado de: [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D1_POBREZA00_27&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREA NIO=*](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D1_POBREZA00_27&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREA NIO=*, 2018), 2018.
- [116] SIAP, *Atlas Agroalimentario 2012-2018*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2018.
- [117] Boué, C., López Ridauro, S., Rodríguez Sánchez, L. M., Hellin, J., y Fuentes Ponce, M., “Local dynamics of native maize value chains in a peri-urban zone in Mexico: The case of San Juan Atzacualoya in the state of Mexico”, *Journal of Rural Studies*, vol. 64, pp. 28–38, 2018.
- [118] SIAP, *Atlas Agroalimentario 2019*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2019.
- [119] “Cultivo del maíz en México, en riesgo por el cambio climático”, Recuperado de: <https://www.forbes.com.mx/cultivo-del-maiz-en-mexico-en-riesgo-por-el-cambio-climatico/>, Feb 2020.
- [120] “Primeras pérdidas de cultivo de maíz”, Recuperado de: <https://www.novedadescampeche.com.mx/estado/campeche/primeras-perdidas-de-cultivo-de-maiz/>, Oct 2021.
- [121] “Sequía afecta más de 12 mil hectáreas de milpa a campesinos de José María Morelos”, Recuperado de: <https://www.poresto.net/quintana-roo/2021/9/13/sequia-afecta-mas-de-12-mil-hectareas-de-milpa-campesinos-de-jose-maria-morelos-283096.html>, Sep 2021.