

CAMBIOS PROYECTADOS EN EL RENDIMIENTO DE CINCO CULTIVOS ANTE UN AUMENTO DE LA TEMPERATURA GLOBAL DE 1.5°C Y 2°C EN MEXICO

Alejandro Ismael MONTERROSO-RIVAS, Jesús David GÓMEZ-DÍAZ y Antonio Rafael ARCE-ROMERO
Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. CP 56230
aimrivas@correo.chapingo.mx; dgomez1059@yahoo.com.mx; arce

RESUMEN

En México existe una superficie agrícola de 27 millones de hectáreas, de las que el 80% es agrícola de temporal y 20% de riego. El objetivo del trabajo es mostrar los cambios proyectados en el rendimiento de cultivos de importancia para México ante un aumento de la temperatura global de 1.5°C y 2°C. El método fue aplicar *AquaCrop* (FAO) por su balance hídrico, facilidad de calibración, aplicabilidad en el país y ser software libre. Se aplicó control de calidad (RClimDex) y homogeneización de temperatura (RHTestv4) a los datos. Para cebada, frijol, maíz, sorgo y trigo se compiló 15 variables fenológicas. Se calibró el modelo con rendimientos reportados por SIAP. Consideró cinco modelos (CNRM, GFDL, HADGEM, MPI y Ensamble REA) y dos RCP (4.5 y 8.5Wm⁻²). Resultados muestran cambio en rendimiento final, biomasa y productividad hídrica. Bajarán el rendimiento en cereales maíz, frijol y trigo. Sorgo y cebada con casos de aumento o disminución; soya aumentaría en regiones con alta precipitación. Modelos que proyectan impactos negativos son GFDL y HADGEM, de impacto medio es MPI y CNRM da cambios menos acentuados.

Palabras clave: Aquacrop, cebada, frijol, maíz, sorgo, trigo, modelación

ABSTRACT

In Mexico there is an agricultural area of 27 million hectares, of which 80% is agricultural seasonal and 20% irrigation. The objective of the work is to show the projected changes in the yield of crops of importance for Mexico before an increase in the global temperature of 1.5° C and 2° C. The method included AquaCrop (FAO) for water balance, ease of calibration, applicability in the country and free software. Quality control (RClimDex) and temperature homogenization (RHTestv4) were applied to the data. For barley, beans, corn, sorghum and wheat, 15 phenological variables were compiled. The model was calibrated with yields reported by SIAP. It considered five models (CNRM, GFDL, HADGEM, MPI and Ensamble REA) and two RCP (4.5 and 8.5Wm⁻²). Results show change in final yield, biomass and water productivity. It will lower the yield in cereals corn, beans and wheat. Sorghum and barley with cases of increase or decrease; Soybeans would increase in regions with high rainfall. Models that project negative impacts are GFDL and HADGEM, medium impact is MPI and CNRM gives less accentuated changes.

Key words: Aquacrop, barley, beans, corn, sorghum, wheat, model

1. INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que el crecimiento poblacional avanza a un ritmo acelerado y que ello conlleva al incremento de la demanda de alimento, que por ende aumenta la necesidad de producir más alimentos. Sin embargo, la desnutrición y la pobreza permanecen. La población continúa creciendo y el desbalance potencial entre el número de seres humanos y las necesidades alimentarias se vuelve un problema. Algunas investigaciones estiman que la producción mundial de alimentos tendrá que aumentar en un 70% para el 2050 y que los requerimientos de agua duplicarían las necesidades actuales para el 2025. La productividad agrícola, a su vez, debe mejorar, mientras que los recursos de suelo y agua se vuelven menos abundantes, y los efectos de cambio climático introducen una gran incertidumbre (Ocampo, 2011). El cambio climático ha puesto de manifiesto la susceptibilidad de la soberanía alimentaria de México, la cual tiene diversas causas, pero se ha visto agravada por dicho fenómeno (Gay García & Rueda Abad, 2015).

La actividad agrícola es parte importante de la economía en nuestro país por lo que es vulnerable a los cambios en el clima y a sufrir el impacto de los desastres. Basta recordar que las actividades primarias en el país, que dependen del comportamiento climático, son más o menos 30 millones de hectáreas en tierras de cultivo, 115 millones de agostadero y 45.5 con bosques y selvas (SAGARPA, 2007). Más en detalle se puede decir que de la superficie total del país, el 16.6% se destina a la agricultura. De esa superficie que se siembra, 74% es de temporal y 26% de riego. En el año 2012 la superficie de riego tecnificado ascendió a 578,429 ha y además se contó con 7,112 ha cultivadas en ambientes controlados (agricultura protegida). SAGARPA reporta que los principales granos básicos que se cultivan son: maíz, 76%; frijol, 11.8%; trigo, 11.5% y arroz, 0.8%. De modo que estudiar el comportamiento de dichos cultivos ante escenarios de cambio climático permitirá contar con información relativa a su comportamiento para sustentar la toma de decisiones, tanto políticamente como en campo.

A la fecha se han realizado diversos estudios sobre este tema, la mayoría de ellos enfocados en conocer algunos de los impactos del cambio climático sobre la productividad y la distribución agrícola de los cultivos (Gay y Rueda, 2015). No obstante, los estudios de impactos sobre la producción agrícola han versado sobre cuatro vertientes: los estudios de cambio en superficies aptas para el desarrollo de los cultivos; sobre el cambio en el rendimiento esperado; sobre el cambio que se podrá esperar al modificarse la estación de crecimiento y sobre el cambio en necesidades hídricas por los cultivos (Monterroso Rivas et al., 2015). En este sentido, Ahumada et al. (2014) reportan una revisión bibliográfica de los trabajos realizados a propósito de los impactos del cambio climático en México, donde destaca que los mayores impactos son la reducción del rendimiento y la disminución de áreas aptas para los cultivos.

Con lo mencionado anteriormente, se ha destacado puntualmente la importancia de estudiar al rendimiento con escenarios de cambio climático, pues se sabe que es una variable que tiene relación directa con el beneficio económico que se puede obtener de la agricultura. A pesar de la multitud de enfoques para evaluar y estimar el rendimiento, el modelo Aquacrop de la FAO (Steduto, Hsiao, Raes, & Fereres, 2009) ha demostrado arrojar resultados aceptables en términos de sencillez, robustez y precisión en un contexto tanto nacional como internacional (Flores-Gallardo, Ojeda-Bustamante, Flores-Magdalen, Sifuentes-Ibarra, & Mejía-Saénz, 2013; Soddu et al., 2013).

Aquacrop es un modelo que utiliza la cantidad de agua disponible para simular la producción actual y potencial de biomasa de un cultivo. Fue desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO y es el resultado de la revisión del documento de riego y drenaje de la FAO No. 33 titulado "*Yield Response to Water*" (Smith & Steduto, 2012). Además de sus aplicaciones en el manejo hídrico de los cultivos, se sabe que ha sido ampliamente utilizado para modelar impactos potenciales del cambio climático en diferentes agrosistemas.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente es evaluar la posible respuesta de algunos cultivos básicos, de importancia económica y alimenticia en el país, bajo escenarios de cambio climático y al considerar un aumento global de la temperatura de 1.5°C y 2°C. El empleo del software de modelación Aquacrop (Vanuytrecht et al., 2014) basado en el análisis de balances hídricos permite analizar el impacto de las alteraciones de las variables agroclimáticas, de los diversos estudios de caso, y su impacto sobre la producción de biomasa y de grano.

2. MATERIAL Y METODOS

Mediante el empleo del software Aquacrop de FAO (Vanuytrecht et al., 2014) se realizaron las proyecciones de rendimiento. Mediante revisión bibliográfica se obtuvo la información climática, fenológica, edáfica y de manejo agrícola para cada cultivo y variedad empleada necesaria para la generación de modelos y posteriores simulaciones.

Fueron seleccionados cinco cultivos por su importancia económica y alimentaria: cebada, frijol, maíz, sorgo y trigo (SIAP-SAGARPA, 2016). La diversidad de los ambientes bajo los cuales son cultivados son diversos y dependen entre otros de la latitud y del ambiente en el que se cultivan. La heterogeneidad de condiciones ambientales del país ha permitido el empleo y desarrollo de múltiples variedades, un elemento que debe considerarse al momento de implementar alguna medida de adaptación a las potenciales nuevas condiciones climáticas. Por lo que para cada cultivo se seleccionó una estación meteorológica como fuente de información representativa del cultivo.

La información climática requerida fue obtenida para cada una de las estaciones meteorológicas bajo estudio (clave entre paréntesis): cebada en Tlaxpan, Estado de México (15101); frijol en Villa de Cos, Zacatecas (32059) y Chapingo, Estado de México (15170); maíz en Atotonilco, Jalisco (14017) y en Chapingo, Estado de México (15170); sorgo en González, Tamaulipas (28035) y en Celaya, Guanajuato

(11009); y trigo en Navojoa, Sonora (26102) y en Puebla, Puebla (21035). Todos obtenidos de ERIC (2015).

Para todos los casos se obtuvieron los valores registrados posteriores al año 2000 de las variables climáticas temperatura máxima y mínima, así como precipitación. La evapotranspiración fue calculada de acuerdo a la ecuación de Penman modificada por la FAO (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006). Con esta información se calibró el software, al comparar con aquella recolectada de rendimientos reales.

La información respectiva a cada cultivo en específico consta de dos apartados, las características fenológicas del mismo y el manejo a realizarse en campo, ambos componentes fueron cubiertos mediante el análisis de bases de datos oficiales y de estudios científicos, así como de aproximaciones tomando en cuenta valores de referencia que se encuentran dentro de los archivos del software. Dentro de las características fenológicas más importantes se encuentran la fecha de siembra, el rango de temperatura óptima de crecimiento, densidad de plantación, cobertura máxima a alcanzar, susceptibilidad a elementos externos, así como los días desde la siembra hasta la emergencia, máxima cobertura y profundidad de raíces, floración, senescencia y madurez del cultivo.

Por último, los valores referentes al componente suelo fueron obtenidos desde la cartografía oficial proveniente de la publicación edafología serie II por el INEGI (2005), de igual manera se hizo uso de perfiles agrícolas reportados por la misma instancia. Las variables a conocer fueron la clase textural del suelo en relación a la proporción de sus agregados, número y profundidad de sus horizontes, número de curva y profundidad del acuífero. La clasificación textural permitió determinar el régimen de humedad del suelo, el cual se encuentra en la información predeterminada del software.

Se elaboraron modelos base que fueron calibrados con valores históricos, y validados por medio de índices de concordancia. Haciendo uso de dichos modelos se llevaron a cabo simulaciones con escenarios de cambio climático considerando tres modelos generales de circulación de la atmósfera (HADGEM, MPI y GFDL), dos concentraciones de forzamiento radiativo de la atmósfera (RCP 4.5 y 8.5 W/m²) y asumiendo 1.5 y 2.0 °C de incremento global en la temperatura a esperarse hacia los horizontes temporales 2041 y 2051 respectivamente.

3. RESULTADOS

En la figura 1 se muestran las proyecciones de precipitación en los sitios estudiados y que sirven de base para el análisis de rendimientos de los cinco cultivos. Se observa que en todos los casos la distribución actual se mantiene aunque en algunos lugares es más incierto, como en Zacatecas.

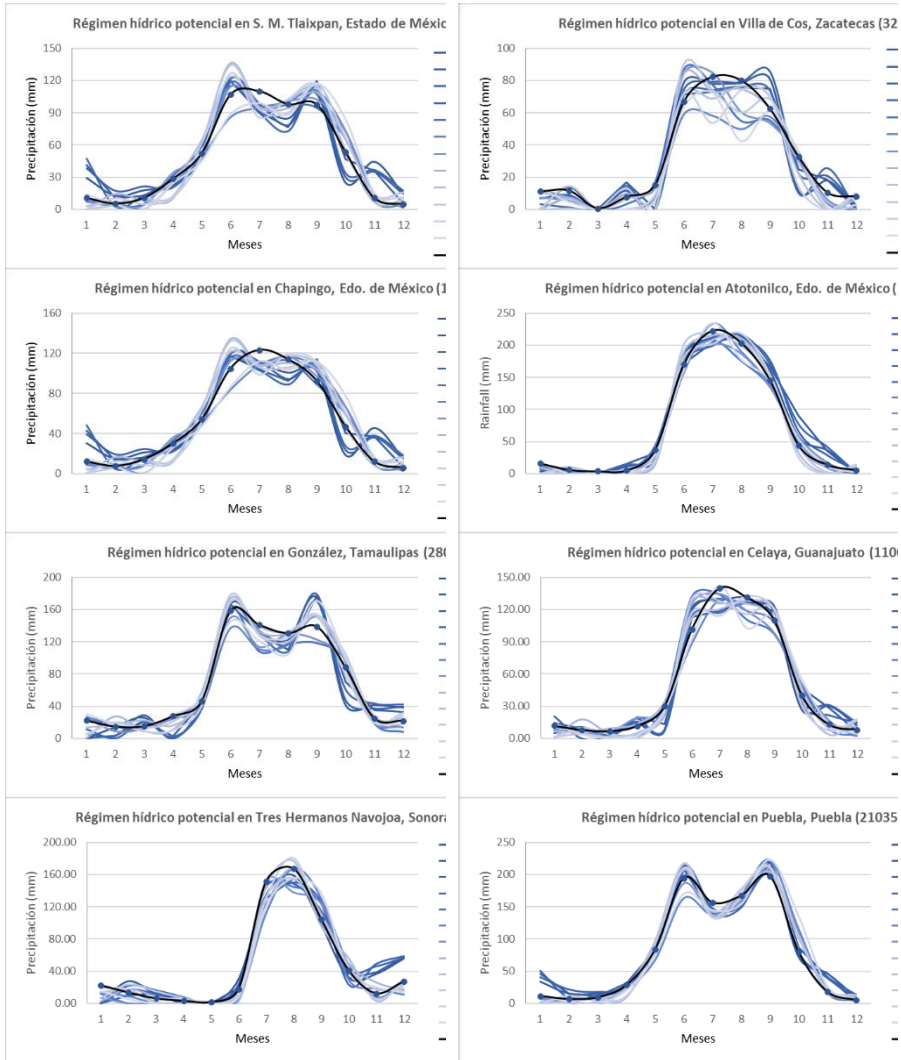


Fig. 1. Proyección de la distribución de la precipitación en los sitios estudiados

El objetivo en cada uno de los modelos generados fue obtener índices de concordancia entre los valores de la serie histórica y los de la serie de calibración, considerando un valor de R^2 superior a 0.5 y un error cuadrático medio normalizado inferior al 30%. Estos parámetros significarían un modelo acorde a los valores históricos, sin embargo, dada la amplia influencia de factores externos y la variabilidad en cuanto a condiciones climáticas y de manejo reflejadas en el rendimiento histórico, dichos indicadores estadísticos no siempre fueron alcanzados. Para la realización del estudio se aceptaron todos los modelos cuyos parámetros se aproximaron lo mejor posible en sus resultados estimados a los valores reportados por el SIAP.

Toda vez que se calibraron los resultados se proyectó el rendimiento con los escenarios de cambio climático mencionados. Los resultados se muestran en la figura 2

4. DISCUSIÓN

Cebada. En el centro de México y en la estación de San Miguel Tlaixpan, en el estado de México, todos los escenarios señalan un ligero incremento en la precipitación durante el periodo de crecimiento con respecto al volumen histórico. El modelo MPI con ambos RCP y para los dos horizontes de tiempo presentan los mayores incrementos con un aumento de casi 55 mm. Por su parte, el modelo HADGEM con RCP de 8.5 presenta un incremento de 10 mm aproximadamente, siendo este último el más bajo de todos. Con un aumento en la precipitación durante el periodo de crecimiento la producción de biomasa se podría incrementar en 4.13 y 2.28 t/ha con el modelo MPI para ambos horizontes temporales y con RCP 4.5 y 8.5 respectivamente. Los escenarios con RCP 4.5 en los modelos HADGEM y GFDL prevén incremento en 1.2 t/ha aproximadamente para ambos horizontes de tiempo. Sin embargo, disminución promedio para el horizonte lejano en 2 t/ha en la producción de biomasa con respecto al valor base. El modelo MPI con RCP 4.5 y 8.5 presenta incrementos del 56% y 28% respectivamente para ambos horizontes temporales.

Los modelos HADGEM y GFDL registran disminución en el rendimiento con reducción cercana al 60% del valor base en el horizonte 2051 con RCP 8.5, siendo este último el escenario más severo. Es posible identificar la relación directa entre los cambios en la producción de biomasa y su efecto en los volúmenes de grano proyectado bajo escenarios de cambio climático.

Frijol. Hacia el norte del país, en Villa de Cos, Zacatecas, la precipitación base del periodo de crecimiento oscila por 143 mm, mientras que con los escenarios futuros incrementa al menos 20 mm en el caso de GFDL/RCP 4.5 para el horizonte 2051, y llega a disminuir casi 30 mm con HADGEM/RCP 8.5 para el horizonte 2041. Aun así, la precipitación no es suficiente para mantener un desarrollo óptimo del cultivo, puesto que el frijol requiere de al menos 200 mm de precipitación para un buen crecimiento. La tendencia en cuanto a formación de biomasa del cultivo frijol disminuye.

El rendimiento de frijol para los escenarios al horizonte 2041 con un aumento de temperatura de 1.5° C sería crítico, ya que todos los escenarios son negativos o de disminución. Es posible encontrar disminuciones de hasta 12%; mientras que para el horizonte 2051 con aumento de 2°C, sólo el escenario HADGEM/ RCP 4.5 mantiene una condición de aumento en el rendimiento del cultivo en 2.5%. A pesar de que no es una cifra tan significativa, dentro del panorama general, dicho escenario es el único que proyecta un ligero aumento.

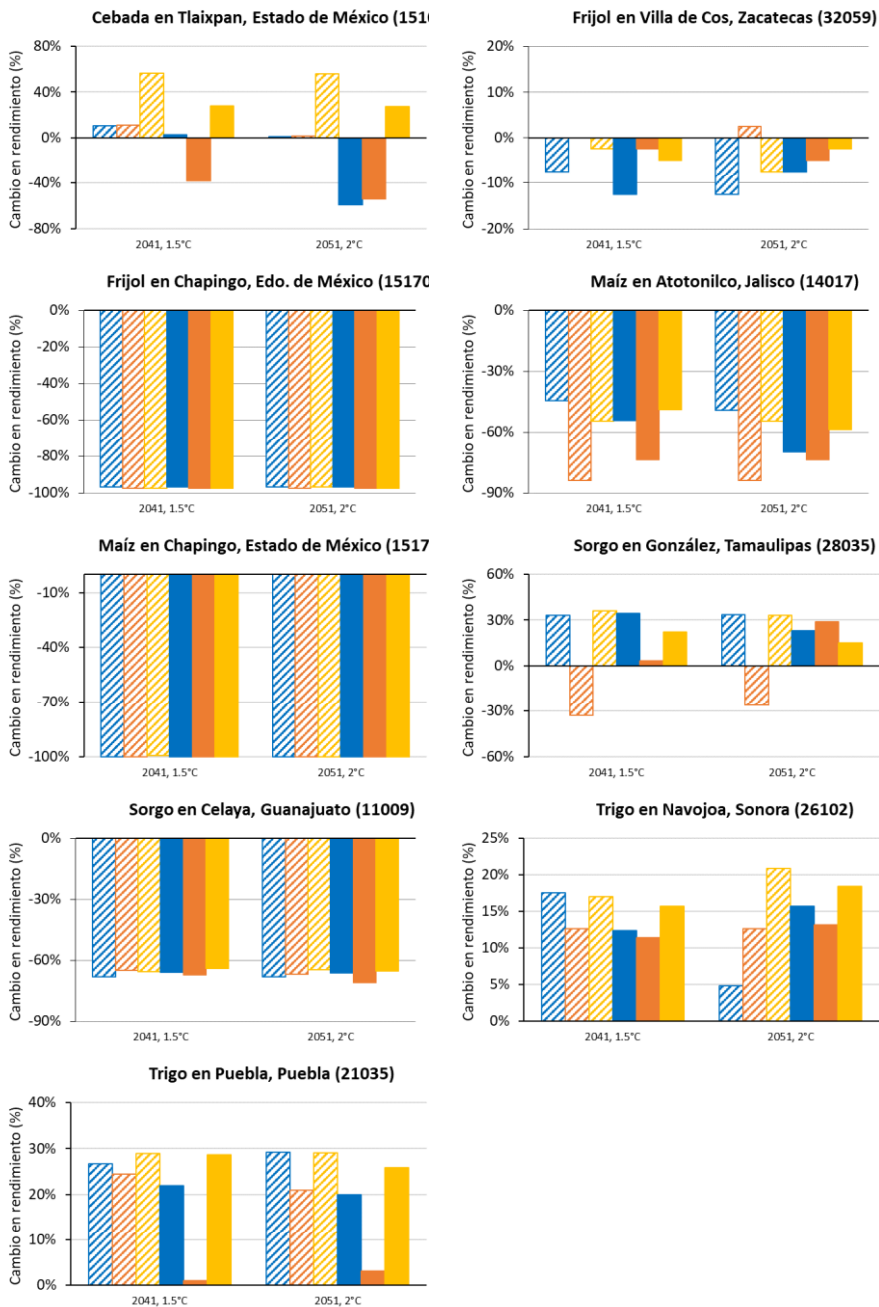


Fig. 2. Cambio en rendimientos proyectados para los cultivos estudiados: trigo, sorgo, maíz, frijol y cebada.

En lo que se refiere al centro del país, en Chapingo estado de México, la precipitación para el periodo de crecimiento del frijol bajo condiciones actuales es de 394 mm, mientras que los diferentes escenarios tendrían un comportamiento similar. El escenario HADGEM/ RCP 8.5 para el horizonte 2051 es de destacar, ya que prevé un aumento drástico de precipitación de 225 mm más que el escenario base. La tendencia de biomasa en t/ha para frijol tendría una abrupta caída, donde solo los escenarios de HADGEM/ RCP 8.5 para el horizonte 2051 y MPI/ RCP 8.5 horizonte 2051 tienen una disminución arriba de 0, es decir solo estos 2 escenarios son los positivos de los doce modelados. Dentro de la estimación de biomasa potencial se tienen rangos del 7.6 – 9.2.

Los diferentes escenarios de rendimiento para frijol en Chapingo son bastante pobres, existe un panorama general del 97% en disminuciones, tanto para los escenarios del horizonte 2041 como para los del 2051. El estrés hídrico por cobertura llega en algunos casos hasta el 80%, lo que implica que la planta de frijol no tendría oportunidad de desarrollar fotosíntesis correctamente. El estrés por fertilidad de suelo se mantiene en cero y la productividad del agua se encuentra en 0.01.

Maíz. En el occidente del país, en Atotonilco, Jalisco, la mayoría de los escenarios señalan un incremento en la precipitación durante el periodo de crecimiento para la estación Atotonilco con respecto al volumen histórico, de entre ellos el modelo GFDL RCP 8.5 para el año 2041, presenta el mayor incremento al hablar de poco más de 100 mm de diferencia. Por su parte para el horizonte de tiempo 2051, el modelo GFDL RCP 8.5, es el que presenta el mayor aumento con cerca de 100 mm de diferencia con respecto al dato base. Aun y cuando se presenta cambio en la precipitación durante el periodo de crecimiento para todos los modelos, la producción de biomasa para todos los modelos va en decremento, con la excepción del GFDL RCP 4.5 el cual, en el año 2041, presenta un decremento, decayendo para el horizonte 2051; con lo que respecta a los demás modelos, todos van en decremento, siendo más drástico lo obtenido por el modelo HADGEM en ambos RCP y horizontes de tiempo.

Para este lugar los rendimientos decrecen en todos los modelos, ambos RCP y ambos horizontes de tiempo, considerándose con mayor magnitud lo obtenido por el modelo HADGEM RCP 4.5 para el 2041 y 2051 con un decremento del 84.1% sobre el actual para ambos casos.

En el centro del país y para la estación Chapingo, estado de México, se observan incrementos generales en la precipitación durante el periodo de crecimiento para todos los escenarios. El incremento más alto de 100 mm aproximadamente para el horizonte 2041 en el modelo MPI con RCP 4.5. Es posible considerar que los escenarios siguen la misma tendencia con aumentos que van de 20 a 60 mm en promedio aproximadamente. Aún con precipitaciones superiores al valor histórico, las diversas simulaciones indican una producción de biomasa cercana a 0 en el horizonte 2041, la condición es similar en el horizonte 2051 incrementando muy ligeramente, solo el modelo GDFL con RCP de 4.5 indica una producción de poco más de 2 t/ha. Las diversas simulaciones realizadas señalan una severa afectación sobre el rendimiento del cultivo debido a un estrés hídrico por cobertura que oscila entre el 66 y 76 %, un estrés hídrico por cierre estomatal en un rango del 47 a 51 %, y aunque en menor

grado se encuentra un estrés por temperatura hasta del 3 %, la suma de todos los factores ambientales como lo es también la casi nula polinización reportada por el software explica el porqué de una producción de grano casi inexistente.

Como consecuencia de la casi nula producción de biomasa el rendimiento obtenido en los diversos escenarios es de 0, debe señalarse que las simulaciones fueron realizadas con los parámetros que fueron empleados para la calibración del modelo, lo que considera características del manejo del cultivo, de la fertilidad del suelo y la misma fecha de siembra.

Sorgo. En el oriente del país, en González, Tamaulipas, los diferentes escenarios indican variaciones en los volúmenes de precipitación durante el periodo de crecimiento con respecto al valor histórico. El modelo MPI señala un incremento de hasta 20 mm en el horizonte cercano con RCP de 4.5, valor que disminuye hacia el horizonte 2051. Por su parte, los modelos HADGEM Y GFDL presentan disminuciones de 23 y 31 mm respectivamente para el horizonte 2041 con RCP 4.50. En cuanto a la producción de biomasa se nota una concordancia general con las variaciones en los volúmenes precipitados, aunque existen excepciones como lo es el modelo GFDL con RCP 8.5 y 4.5 el cual indica una disminución en la precipitación, pero un aumento en la producción de biomasa, representando dicho incremento el 19% del valor base. Por su parte el escenario más severo corresponde al modelo HADGEM con RCP 4.5 cuya producción de biomasa estimada corresponde a una pérdida del 27% del valor base, finalizando con una producción de 4.23 t/ha en el horizonte 2051.

Los rendimientos obtenidos para el cultivo presentan una tendencia superior al valor histórico en todos los escenarios a excepción del modelo HADGEM con RCP 4.5 cuyo rendimiento disminuye en 30% en el horizonte 2041. Se observa un incremento en el rendimiento para los escenarios con RCP 4.5 superiores en los modelos restantes. Es posible considerar un incremento del 20% en promedio en el rendimiento para este sitio en el horizonte 2051.

En el centro del país, en Celaya, Guanajuato, presenta un incremento en la precipitación para todos los modelos, RCP y horizontes de tiempo, con respecto al dato base. Sin embargo, el modelo GFDL con RCP 4.5 en ambos horizontes de tiempo es el que presenta un incremento mayor, al presentar cerca de 200 mm más respecto al dato base. En el horizonte de tiempo 2041, todos los modelos en ambos RCP presentan un decremento en la producción de biomasa, siendo el modelo HADGEM en ambos RCP el que presenta un decremento mayor. Sin embargo, con lo que respecta al horizonte de tiempo 2051, se nota un ligero incremento en la generación de biomasa con respecto al horizonte de tiempo 2041, aunque sigue en decremento de acuerdo al dato base. En este horizonte de tiempo, adquiere mayor incremento el modelo HADGEM 8.5 y de menor decremento el modelo MPI RCP 8.5.

Referente al cambio en los rendimientos obtenidos, se presenta un decremento para todos los escenarios, RCP y horizontes de tiempo, siendo el modelo GFDL RCP 4.5, el que presenta un decremento mayor para el horizonte de tiempo 2041, y el modelo HADGEM RCP 8.5 para el horizonte 2051, con un decremento del 68.22% y 71.15 % respectivamente.

Trigo. En el norte del país, en Navojoa, Sonora, se inicia con precipitación base de 51 mm durante el periodo de crecimiento. Los escenarios señalan una oscilación con respecto al valor histórico de 23 y 30 mm en cuanto a incremento y disminución respectivamente. El modelo GFDL con RCP 4.5 presenta el escenario más favorable, mientras que el modelo HADGEM con RCP 4.5 posee la disminución más severa disminuyendo hasta 30 mm para el horizonte 2051. Aun con disminución en la precipitación durante el periodo de crecimiento todas las simulaciones indican un incremento en la producción de biomasa con respecto al valor base. El modelo MPI en ambos RCP posee los mayores valores para los dos horizontes de tiempo a pesar de no poseer los mayores incrementos en precipitación, por el contrario, el modelo GFDL con RCP 4.5 presenta en 2051 una disminución con respecto al valor obtenido en el horizonte 2041, el resto de los escenarios presenta una tendencia de crecimiento continuo.

El rendimiento obtenido por las simulaciones muestra concordancia con el valor de producción de biomasa obtenida, el modelo GFDL con RCP 4.5 posee un alto rendimiento en horizonte cercano, 2041, llegando a representar un incremento de 17.54% con respecto al valor base y que desciende a un 4.8% en 2051, el resto de escenarios se encuentran cercanos a un incremento de 13% aproximadamente con la excepción del modelo MPI cuya proyección al horizonte 2051 es de un incremento de 20.88 y 18.43% para los RCP4.5 y 8.5 respectivamente.

Para el caso de Puebla, en el centro del país, los diversos modelos señalan un incremento en la precipitación durante el periodo de crecimiento superior a 130 mm en todos los casos. Los escenarios varían en un intervalo de 75 mm, siendo el modelo MPI con RCP 4.5 aquel que alcanza 607 mm en el año 2041. Por su parte el modelo HADGEM con RCP 8.5 presenta el menor incremento, aunque no por ello moderado, para el año 2051 proyecta una precipitación de 523 mm. La producción de biomasa manifiesta un incremento de manera general para la mayoría de los escenarios, encontrándose entre 6.4 y 6.6 t/ha para el año 2041 y oscilando entre 6 y 6.8 t/ha en el año 2051. Para este último horizonte el modelo HADGEM con RCP 4.5 posee el valor menor mientras que el modelo GFDL con RCP 4.5 presenta la mayor producción al igual que en el horizonte 2041. El comportamiento del cultivo con el modelo HADGEM con RCP 8.5 mantiene la producción de biomasa en un valor continuo y similar al valor base.

De manera general el rendimiento proyectado manifiesta un incremento con respecto al valor base, los modelos MPI y GFDL con RCP 4.5 presentan los mayores incrementos, llegando a representar un aumento de 29% en el horizonte 2051, por su parte el modelo HADGEM con RCP 8.5 presenta el incremento más bajo, entre el 3 y 1%. En general para Puebla el panorama es positivo pues no se presentan disminuciones en los rendimientos esperados

Por último, como referencia al potencial de impacto se presentan algunos valores relacionados con la producción de los cultivos para el año 2013 (Tabla 1). Se observa que

| Cultivo | Superficie (Has) | | | Producción (Ton) | Rendimiento (Ton/ha) | Valor (\$) |
|--------------|------------------|-------------|-----------|------------------|----------------------|----------------|
| | Sembrada | Cosecha | Siniestra | | | |
| Cebada grano | 266,673.5 | 259,134.0 | 7,539.5 | 464,064.1 | 1.85 | 1,707,831,227 |
| Frijol | 1,615,899.2 | 1,551,298.0 | 64,601.2 | 961,764.8 | 0.63 | 8,644,635,221 |
| Maíz grano | 6,132,976.6 | 5,835,264.6 | 297,711.9 | 13,200,813.6 | 1.84 | 44,973,045,523 |
| Sorgo grano | 1,394,671.7 | 1,087,958.4 | 306,713.3 | 2,763,673.2 | 3.20 | 7,795,208,401 |
| Trigo grano | 118,459.1 | 105,865.8 | 12,593.2 | 184,148.8 | 1.42 | 613,542,629 |

Tabla 1. Valores agrícolas y económicos promedio reportados por SAGARPA para el año 2013.

Fuente: SIAP, 2013

CONCLUSIONES

Es posible evaluar el impacto del cambio climático sobre el rendimiento de cultivos. El empleo del software especializado de modelación permitió analizar el impacto de las alteraciones de las variables agroclimáticas, de los diversos estudios de caso, y su impacto sobre la producción de biomasa y de grano. Los resultados muestran cambio en rendimiento final, biomasa y productividad hídrica. Bajarán el rendimiento en cereales maíz, frijol y trigo. Sorgo y cebada con casos de aumento o disminución; soya aumentaría en regiones con alta precipitación. Los modelos que proyectan impactos negativos son GFDL y HADGEM, de impacto medio es MPI y CNRM resultó en cambios menos acentuados. Lo anterior debe considerarse con precaución y se requieren más estudios locales para terminar de calibrar los resultados. Investigación futura debe versar sobre opciones de adaptación en la agricultura.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, al Departamento de Suelos, la Dirección General de Investigación y Posgrado y particularmente al Centro de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente – CIRENAM - por el apoyo financiero y logístico para la realización del proyecto del cual forma parte este trabajo.

REFERENCIAS

- Ahumada-Cervantes, R., Velázquez-Angulo, G., Flores-Tavizón, E., & Romero-Gonzalez, J. (2014). Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación Y Ciencia*, 22(61), 48–53.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Introducción a la

- evapotranspiración del cultivo. In *Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje #56*. Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E., & Mejía-Saénz, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia*, 47(4), 347-359.
- Gay García, C., & Rueda Abad, J. (2015). *Reporte Mexicano de Cambio Climático*. Ciudad de México: UNAM-PINCC. Retrieved from <http://www.pincc.unam.mx/reportemexico/index.php>
- IMTA. (2015). Eric III Versión 3.2 - extractor rápido de información climatológica. Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI. (2005). *Conjunto de datos vectoriales Edafológicos Serie I*. Aguascalientes, México: INEGI.
- Monterroso Rivas, A., Gómez Díaz, J., Sáenz Romero, C., Emilio Lluch Cota, S., Pérez Espejo, R., Javier Salvadeo, C., ... Baca del Moral, J. (2015). CAPÍTULO 5. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS Y SEGURIDAD ALIMENTARIA. In C. Gay García & J. Rueda Abad (Eds.), *Reporte Mexicano de Cambio Climático: Grupo II, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación* (pp. 97–118). Ciudad de México: UNAM-PINCC.
- Ocampo, O. (2011). El cambio climático y su impacto en el agro. *Revista de Ingeniería*, 33, 115–123.
- SAGARPA. (2007). *Programa Sectorial de desarrollo Agropecuario y Pesquero 2007-2012*. México, DF: Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca.
- SIAP-SAGARPA. (2016). *Atlas Agroalimentario 2016* (Primera). Ciudad de Mexico, Mexico: SAGARPA.
- Smith, M., & Steduto, P. (2012). *Yield response to water: the original FAO water production function*. Roma, Italia.
- Soddu, A., Deidda, R., Marrocu, M., Meloni, R., Paniconi, C., Ludwig, R., ... Perra, E. (2013). Climate Variability and Durum Wheat Adaptation Using the AquaCrop Model in Southern Sardinia. *Procedia Environmental Sciences*, 19(Supplement C), 830–835. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.092>
- Steduto, P., Hsiao, T., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop: the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., ... Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, 62, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>