



Efecto del calentamiento global sobre la producción de alfalfa en México



Guillermo Medina-García ^{a*}

Francisco Guadalupe Echavarría-Cháirez ^a

José Ariel Ruiz-Corral ^b

Víctor Manuel Rodríguez-Moreno ^c

Jesús Soria-Ruiz ^d

Celia De la Mora-Orozco ^b

^a Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Zacatecas, Km 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo, Calera, Zac., México.

^b Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Camino Ramón Padilla Sánchez No. 2100 Nextipac, 44600, Zapopan, Jalisco, México.

^c INIFAP. Campo Experimental Pabellón, Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Ags., México.

^d INIFAP. Sitio Experimental Metepec, km. 4.5 Carretera Toluca-Zitácuaro, Vialidad Adolfo López Mateos s/n, Zinacantepec, Edo. Méx., México.

*Autor de correspondencia: medina.guillermo@inifap.gob.mx

Resumen:

La alfalfa es el principal cultivo forrajero en México en cuanto a superficie sembrada con 583,561 ha, lo que representa 57.1 %, mientras que los cultivos forrajeros maíz, avena y sorgo representan el 42.9 %. El objetivo de este estudio fue estimar el impacto del calentamiento global como resultado del cambio climático, con base en escenarios climáticos futuros, sobre la producción de alfalfa en áreas potenciales en condiciones de riego en

México. Para ello, anomalías de temperatura y precipitación del período 2021-2080 fueron usadas. Las anomalías se estimaron con un ensamble de 11 modelos de circulación general. Las áreas con potencial productivo de alfalfa se estimaron al considerar clima de referencia y escenarios climáticos futuros enfocados a dos rutas representativas de concentración (RCP) de gases de efecto invernadero (GEI). Los resultados sugieren incremento de la temperatura y su influencia sobre la reducción de las áreas con potencial productivo alto, situación que se agrava conforme se avanza hacia el futuro, con una reducción de 24.7 % en el año 2070 en la RCP 4.5 con respecto al clima de referencia. Resultados similares, pero con mayor disminución en la superficie con potencial productivo se encontraron en la RCP 8.5. Un efecto diferenciado fue estimado dependiendo de la región de cultivo. Debido a su alta demanda de agua, el cultivo de alfalfa puede ser sustituido por otros cultivos menos demandantes como maíz. Los resultados podrían utilizarse en el diseño de estrategias para adaptar el cultivo a los efectos del cambio climático en las áreas productoras de alfalfa.

Palabras clave: *Medicago sativa*, Cambio climático, Potencial productivo, RCP, México.

Recibido: 08/11/2017

Aceptado: 12/07/2018

Introducción

La alfalfa en condiciones de riego es el principal cultivo forrajero en México en cuanto a superficie sembrada con 583,561 ha (2006-2015), lo que representa 57.1 %, mientras que los cultivos forrajeros maíz, avena y sorgo representan el 42.9 %⁽¹⁾. Este cultivo es uno de los que más consumo de agua requiere⁽²⁾, con requerimientos hídricos entre 1,200 y 1,800 mm anuales aproximadamente^(3,4,5) lo cual lo hace dependiente de la disponibilidad de agua de riego. Además de la vulnerabilidad a las condiciones del clima, la influencia del cambio climático sobre el rendimiento y producción de esta leguminosa es incierta en el futuro.

Actualmente, el cambio climático causa alteraciones en los patrones climáticos y, por tanto, en el clima relacionado con el manejo de las actividades agrícolas. El incremento de temperatura, causado por el aumento en la concentración atmosférica de los gases efecto invernadero (GEI)⁽⁶⁾, propicia la desecación de muchas regiones debido al aumento de la evaporación⁽⁷⁾ y de la modificación de los patrones de lluvia⁽⁸⁾.

Para estimar los efectos del cambio climático en el futuro se utilizan escenarios climáticos, los cuales son representaciones del clima futuro, consistentes con los supuestos sobre las

emisiones futuras de gases de efecto invernadero y otros contaminantes y, con la comprensión del efecto del aumento de las concentraciones atmosféricas de estos gases en el clima mundial, sirven de base para la adopción de medidas de adaptación y reducción de emisiones^(9,10). Es importante reconocer que existe incertidumbre en los resultados de estos escenarios. Los modelos de circulación general permiten proyectar el clima futuro, pero no hay un modelo único que sea el más conveniente, por lo que se recurre a ensambles de varios modelos para reducir la incertidumbre⁽¹¹⁾.

Estudios recientes han demostrado que la temperatura en las áreas agrícolas de México se ha incrementado de manera notable desde 1990^(12,13). Este incremento de la temperatura trae consigo modificaciones en variables agroclimáticas como la acumulación de horas frío en el periodo invernal⁽¹⁴⁾. Al igual que en otros países, en México existe una preocupación por el cambio climático y sus posibles impactos sobre el sector productivo primario.

Por otra parte, como resultado del aumento de los GEI en la atmósfera, el incremento en la temperatura puede tener efectos tanto positivos como negativos sobre la producción de los cultivos. Un aumento en la temperatura acelera el proceso de madurez de los cultivos, reduce la duración del área foliar y con ello el requerimiento hídrico total hasta la madurez del cultivo^(15,16).

Diversos estudios se han desarrollado para identificar las zonas donde la producción de cultivos se pudiera realizar con mayor probabilidad de éxito y rentabilidad. Esas áreas son también llamadas áreas con potencial productivo⁽¹⁷⁻²⁰⁾. Sin embargo, el efecto del cambio climático sobre cultivos en áreas con potencial productivo se ha estudiado poco.

Los cambios en los patrones climáticos tienen profundos efectos sobre el crecimiento y productividad de las plantas a corto plazo⁽²¹⁾. En México se han realizado estudios sobre la temática de cambio climático y su impacto en la agricultura, pero pocos han analizado con detalle los efectos sobre sistemas productivos en particular, lo cual limita el diseño de estrategias de adaptación del cultivo al cambio climático⁽²²⁾.

La alfalfa es una especie que tiene un amplio rango de adaptabilidad. La creencia es que dependiendo del ambiente donde se desarrolle, el cambio climático puede influir sobre ella de manera positiva o negativa. Diversos estudios han demostrado la gran variabilidad de respuesta de la alfalfa al cambio climático⁽²³⁻²⁷⁾.

La alfalfa es un cultivo con requerimiento intensivo de agua. Su rentabilidad depende en gran medida de la disponibilidad de agua y sus costos. Es posible obtener mayor producción de alfalfa incrementando el riego en el período de crecimiento⁽²⁾. La deficiencia de agua afecta el crecimiento de las plantas y se prevé que el cambio climático aumentará el estrés hídrico en los cultivos en algunas partes de los Estados Unidos de América⁽⁶⁾. Grandes reducciones

de la superficie de cultivo de alfalfa en las llanuras del norte en Estados Unidos de América han sido observadas debido a la expansión de cultivos más rentables como maíz y soya, así como a la disminución de agua para riego⁽²⁸⁾.

El objetivo de este estudio fue estimar el impacto del calentamiento global como efecto del cambio climático en escenarios climáticos futuros sobre las áreas potenciales de alfalfa de riego en México.

Material y métodos

Un modelo ensamble se integró a partir del valor de la mediana de 11 modelos de circulación general (MCG) reducidos en escala y calibrados⁽²⁹⁾ y pertenecientes al CMIP5 (Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5) reportados en la 5ª entrega del IPCC: (BCC-CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M), los cuales se obtuvieron a partir de información del portal de datos de Cambio Global de WorldClim.

El ensamble se generó considerando dos rutas representativas de concentración (RCP) de gases efecto invernadero, esto es, con dicho fin se utilizó un RCP de emisiones intermedias (4.5) consistente con un futuro con reducciones de emisiones relativamente ambiciosas, y un RCP de emisiones altas (8.5) coherente con un futuro sin cambios de política para reducir las emisiones⁽¹⁰⁾.

Los valores mensuales del ensamble de los 11 modelos de las variables temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación de los años 2021 a 2080, para los escenarios 2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080, en adelante referidos como climas o años 2030, 2050 y 2070, respectivamente, fueron usados. El clima base o de referencia con base en las mismas variables del periodo 1961-2010 del sistema de información climática del INIFAP⁽³⁰⁾ fue considerado. Se generaron imágenes temáticas raster con una resolución de 30" arco, correspondientes a los valores mensuales de las tres variables del clima base y de los escenarios.

En los estudios relacionados con la agricultura, entre ellos el de potencial productivo, es conveniente utilizar una buena resolución para la aplicación de los resultados de los MCG con reducción de escala. Por lo tanto, el sistema de información climática del INIFAP utiliza una resolución 90 m, de tal manera que los resultados del potencial productivo tengan el detalle suficiente para aplicarlos en la toma de decisiones de planes a largo plazo.

La segunda parte del estudio consistió en la estimación del potencial productivo, el cual se basa en los requerimientos agroecológicos de las especies vegetales⁽³¹⁾. Las áreas con potencial productivo para el cultivo de alfalfa en condiciones de riego fueron obtenidas. Las áreas potenciales se obtuvieron para el clima base y los tres escenarios climáticos en los RCP 4.5 y 8.5. Para la obtención de las áreas con potencial productivo se utilizó información de temperatura y precipitación del INIFAP, la información de uso del suelo serie 5 y edafología escala 1:250,000 del INEGI. Para ello, se utilizaron los sistemas de información geográfica IDRISI Selva y ArcGis Ver. 10.1.

Finalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos, se proponen algunas medidas de adaptación para el cultivo de alfalfa ante escenarios de cambio climático.

Resultados y discusión

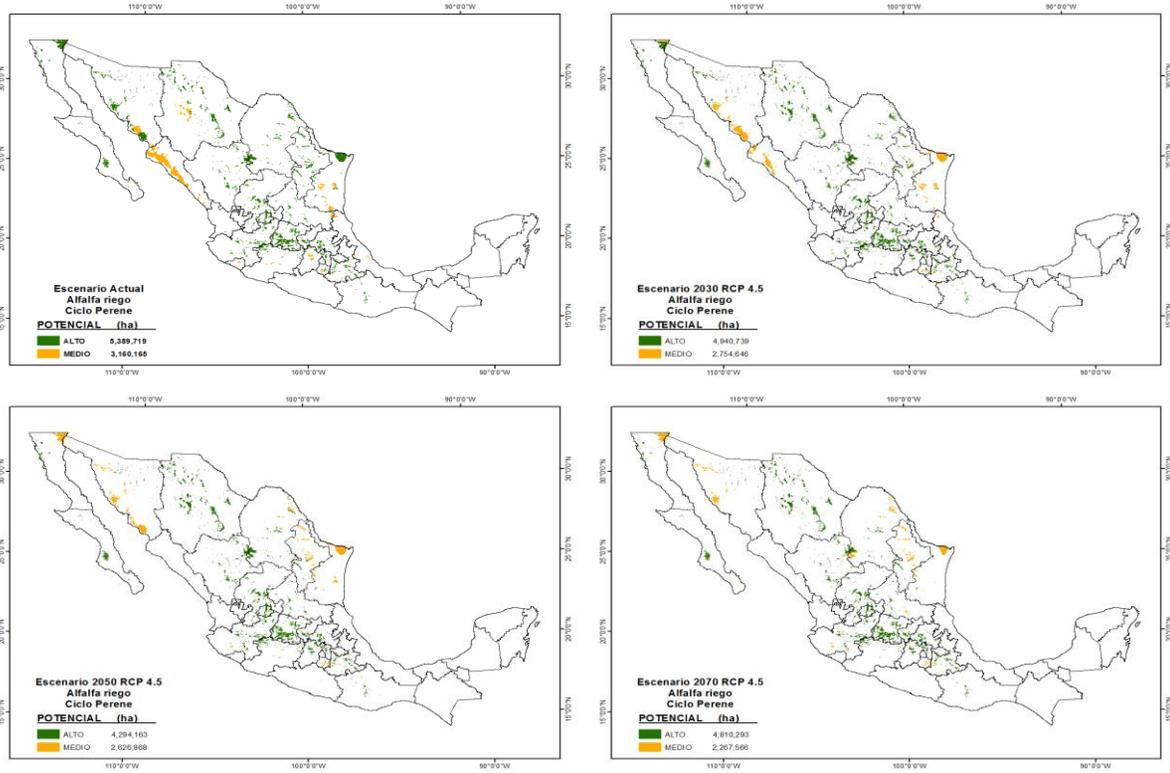
En el Cuadro 1 se presentan las superficies con potencial de producción de alfalfa en condiciones de riego, en las condiciones climáticas actuales y para los climas 2030, 2050 y 2070, en dos rutas representativas de concentración de gases de efecto invernadero. La superficie potencial obtenida es independiente del uso actual del suelo agrícola, es decir, no necesariamente esa superficie está disponible para sembrar alfalfa en condiciones de riego.

Cuadro 1: Superficie con potencial productivo alto y medio de alfalfa de riego como cultivo perene bajo las condiciones climáticas actuales y en los escenarios climáticos 2030, 2050 y 2070 en los RCP 4.5 y 8.5

RCP	Escenario climático	Potencial productivo	
		Alto	Medio
4.5	Actual	5,389,719	3,160,165
	2030	4,940,739	2,754,646
	2050	4,294,163	2,626,868
	2070	4,058,779	2,267,566
8.5	2030	4,735,023	2,586,661
	2050	4,006,668	2,079,239
	2070	3,126,862	1,962,538

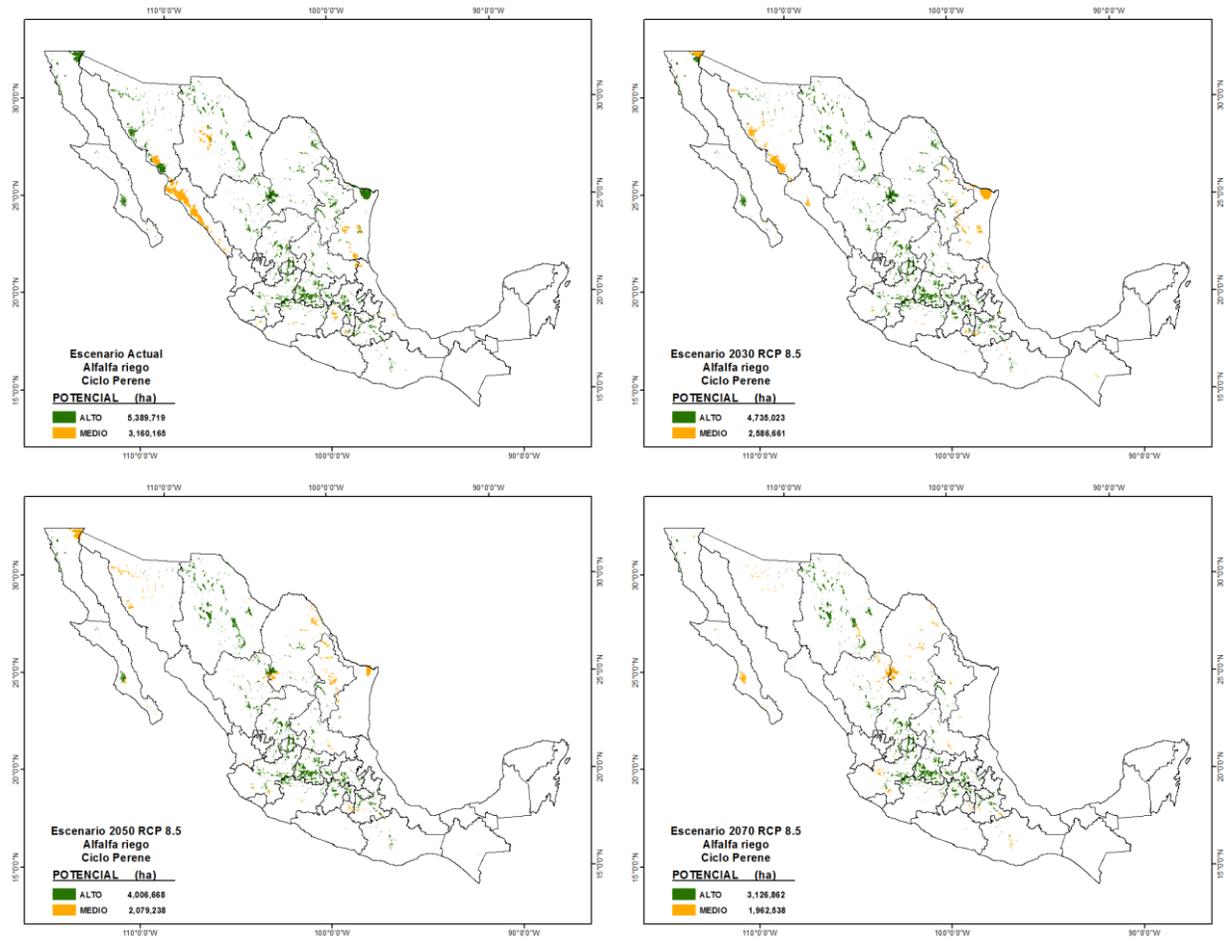
Se observa como la superficie de alto potencial de alfalfa de riego disminuye conforme se avanza hacia el futuro en los años 2030, 2050 y 2070 en el RCP 4.5, con respecto a las condiciones climáticas promedio o actuales, pasando de 5,389,719 ha en el clima actual a 4,058,779 ha en el año 2070. De igual manera el potencial productivo medio disminuye hacia el futuro, pasando de 3,160,165 ha en el escenario actual a 2,267,566 ha en el año 2070 (Figura 1).

Figura 1. Potencial productivo de alfalfa de riego en las condiciones climáticas actuales promedio y los climas 2030, 2050 y 2070 en el RCP 4.5



Comportamiento similar ocurre en el RCP 8.5, solo que la disminución de las superficies es mayor con respecto al escenario actual, pasando el potencial productivo alto de 5,389,719 a 3,126,862 ha, una reducción de 42.0 % de la superficie y el potencial medio disminuye su superficie de 3,160,165 hasta 1,962,538 ha, un porcentaje de 37.9 %, en el año 2070 (Figura 2).

Figura 2. Potencial productivo de alfalfa de riego en las condiciones climáticas actuales promedio y los climas 2030, 2050 y 2070 en el RCP 8.5



La reducción de la superficie con potencial productivo alto y medio puede deberse básicamente al aumento de la temperatura media anual en los diferentes escenarios climáticos, tal como se ha encontrado en otros estudios en México en los ambientes cálidos donde se produce alfalfa⁽³²⁾ debido a que un aumento de la temperatura puede reducir su producción. Esto se puede ver en el Cuadro 2; la temperatura media del escenario actual en las áreas de alto potencial es de 19.9°C, mientras que en los dos primeros climas del RCP 4.5 es de 20.9 y 21.9 °C; es decir, incrementos de 1.0 y 2.0 °C respectivamente, fueron estimados; el aumento en el tercer clima puede ser de 2.5 °C con respecto al clima de referencia y causar condiciones diferentes a las óptimas para el desarrollo de la alfalfa.

Cuadro 2: Temperatura y precipitación media anual de las áreas con potencial productivo alto de alfalfa de riego, obtenidas considerando la superficie de potencial actual, en los diferentes escenarios y RCP

RCP	Escenario	Temperatura (°C)		Precipitación	
		Media	DEA	Media (mm)	DEA (%)
	Actual	19.9		436.6	
	2030	20.9	1.0	425.8	2.5
4.5	2050	21.9	2.0	414.9	5.0
	2070	22.4	2.5	413.8	5.2
	2030	21.2	1.3	416.3	4.7
8.5	2050	22.5	2.6	395.9	9.3
	2070	23.7	3.8	383.4	12.2

DEA=Diferencia con respecto al escenario actual.

En la Figura 3A se presenta la superficie con potencial productivo alto para los diferentes escenarios climáticos, en algunos de los principales estados productores de alfalfa en el país. Ahí se puede observar que el efecto posible del cambio climático no es el mismo en las diferentes regiones del país para la producción de alfalfa de riego, tal como ha sido reportado por otros autores⁽²⁶⁾, quienes mencionan que el rendimiento varió por municipio desde -10 a 14 % en los escenarios B1 y A2 en el estado de California, EUA. En general y a nivel país, la tendencia es hacia menos superficie con potencial alto, pero en regiones templadas actuales la superficie con potencial podría aumentar en el futuro, como es el caso del estado de Chihuahua, de manera similar a lo obtenido en otros estudios⁽²⁷⁾ y en otros estados se mantendrá estable como son los casos de Guanajuato e Hidalgo, como en otro estudio en California, EUA, donde el rendimiento se mantuvo sin cambio hasta el año 2050 en los escenarios B1 y A2⁽²⁴⁾; en cambio en los estados con clima cálido las áreas con potencial productivo alto presentan una tendencia a disminuir significativamente, como es el caso de los estados de Baja California y Sonora y la región de La Laguna de los estados de Coahuila y Durango, similar a lo encontrado con temperaturas altas sin incremento de rendimiento⁽²⁵⁾. En el potencial medio se observa una tendencia diferenciada entre los estados, pero en general donde disminuye el área con alto potencial, aumenta la de mediano potencial, ya que esa superficie pasará de alto a medio potencial. En el estado de Sonora primero aumenta el potencial medio y luego disminuye (Figura 3B). Tendencia similar se ha encontrado en las áreas productoras de maíz⁽²²⁾ y frijol⁽¹³⁾ en México. En el RCP 8.5 (Figura 4A y 4B) se observa un comportamiento similar en el potencial alto, pero la tendencia a disminuir es más pronunciada.

Figura 3. Superficie de potencial productivo alto (A) y medio (B) de alfalfa de riego ciclo perene en las condiciones climáticas promedio y los climas del RCP 4.5, en diferentes estados del país

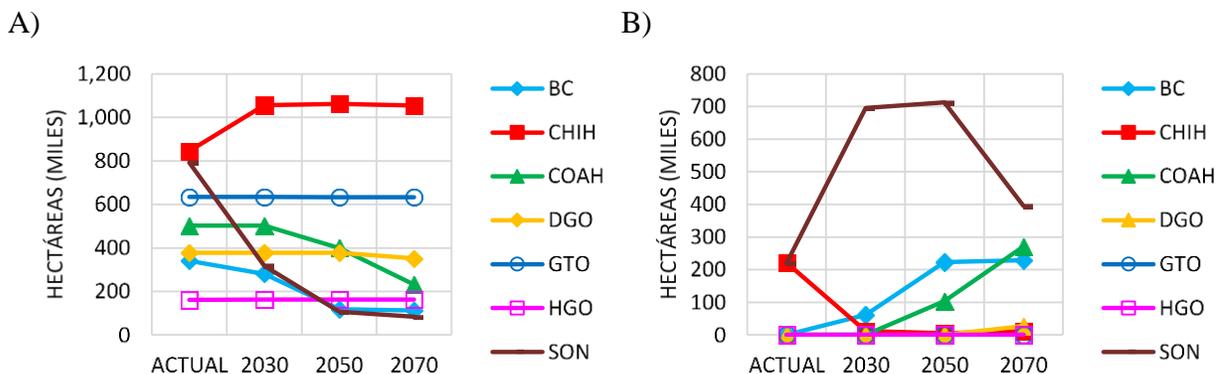
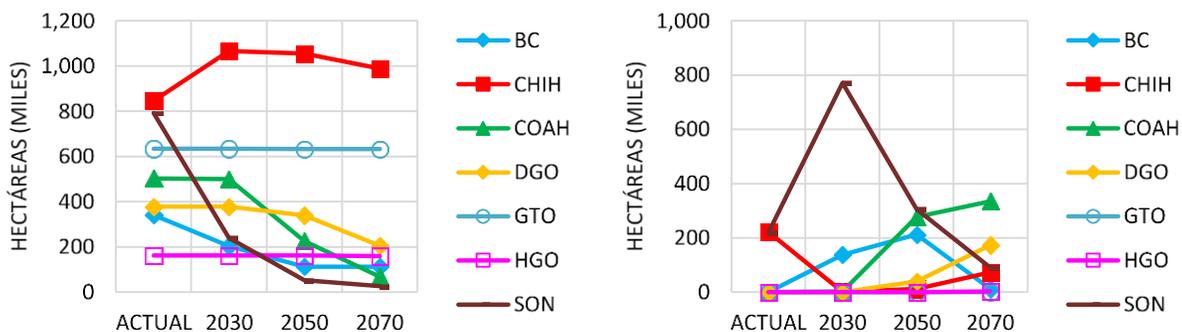


Figura 4: Superficie de potencial productivo alto (A) y medio (B) de alfalfa de riego ciclo perene en las condiciones climáticas promedio y los climas del RCP 8.5, en diferentes estados del país



A corto plazo (2030), solo en la región más caliente donde se cultiva alfalfa (estados de Baja California y Sonora) disminuirá la superficie con potencial productivo alto en 17.8 y 60.0 % en el RCP 4.5, respectivamente, y 40.1 y 69.7 % en el RCP 8.5, respectivamente, (Figuras 3 y 4).

No obstante que en la obtención de las áreas con potencial para la producción de alfalfa no se considera la precipitación, es posible que esas áreas potenciales se vean afectadas por la baja disponibilidad de agua para riego, ya sea agua de presa o de bombeo de los mantos acuíferos. La precipitación en los escenarios climáticos futuros con respecto al clima actual sufrirá una reducción (Cuadro 3). En las áreas de alto potencial en el RCP 4.5 hay una

reducción de 22.8 mm para el año 2070, mientras que, en el RCP 8.5 hay una reducción mayor de la precipitación de hasta de 53.2 mm en el año 2070 en las áreas de alto potencial y 59.8 mm en las de mediano potencial.

Cuadro 3: Superficie sembrada y balance hídrico para la producción de alfalfa en los principales estados productores en México

Estado	SS (ha)	PP (mm)	RH (mm)	PP SS		Déficit SS	%RH PP
				(millones m ³)			
Chihuahua	77,144	410	1,473	316.1	1,136.3	820.2	27.8
Baja California	29,388	103	1,822	30.3	535.5	505.2	5.7
Sonora	29,038	276	1,636	80.3	475.1	394.8	16.9
Durango	28,267	274	1,601	77.6	452.6	375.0	17.1
Guanajuato	52,397	620	1,333	324.8	698.6	373.8	46.5
Coahuila	21,308	251	1,566	53.4	333.7	280.3	16.0
Hidalgo	47,686	537	1,054	255.9	502.5	246.6	50.9
San Luis Potosí	13,809	394	1,345	54.4	185.7	131.3	29.3
Zacatecas	11,104	414	1,205	46.0	133.8	87.8	34.4
Jalisco	9,680	612	1,450	59.2	140.3	81.1	42.2
Puebla	18,205	701	1,100	127.7	200.3	72.7	63.7
Querétaro	8,108	545	1,182	44.2	95.8	51.6	46.1
Aguascalientes	6,339	493	1,205	31.2	76.4	45.2	40.9
México	8,247	691	1,019	57.0	84.0	27.0	67.8

SS= superficie sembrada, PP= precipitación anual, RH= requerimientos hídricos alfalfa.

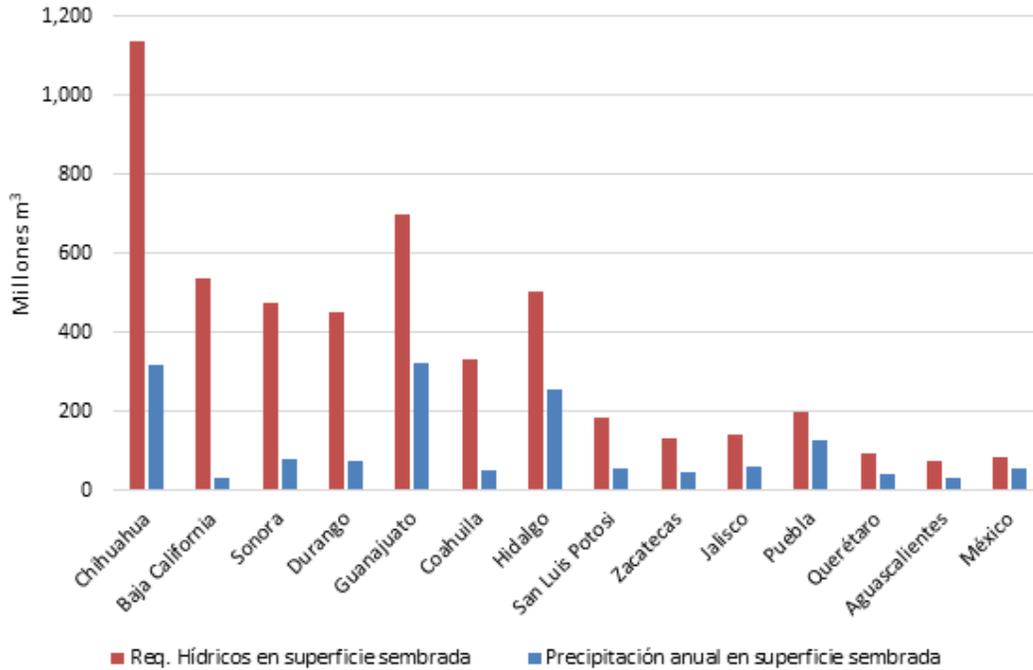
%RH PP= porcentaje del requerimiento hídrico cubierto por la precipitación.

El cultivo de alfalfa es muy demandante de agua⁽²⁾. En el Cuadro 3 se presenta el uso consuntivo o requerimiento hídrico en cada uno de los principales estados productores de alfalfa, el cual va desde 1,019 en el estado de México hasta 1,822 en el estado de Baja California. Con este dato y la superficie promedio sembrada (2006-2015) se obtuvieron los requerimientos hídricos en toda esa superficie. Por otro lado, también se estimó el volumen de agua promedio aportado por la precipitación en la misma superficie sembrada por Estado. De esta manera se obtuvo el déficit hídrico en la superficie sembrada.

En el mismo Cuadro 3 se aprecia que el déficit de agua en la superficie sembrada con alfalfa varía mucho entre un estado y otro, el cual va desde 27.0 hasta 820.2 millones de m³, lo que corresponde a un déficit promedio de 63.9 % con respecto al requerimiento hídrico. Los estados donde es mayor este déficit son precisamente en los del norte del país, porque la superficie sembrada es mayor y la precipitación es menor. Esos estados son Chihuahua, Baja

California y Sonora (Figura 5), es decir, los estados del centro del país donde la precipitación es mayor el déficit hídrico es menor.

Figura 5: Requerimientos hídricos en la superficie sembrada con alfalfa en cada estado y el volumen aportado por la precipitación en la misma superficie



La disminución de la lluvia y el aumento de la temperatura en los años futuros pueden provocar mayores niveles de evapotranspiración, debido a lo cual los cultivos sufrirán más por falta de humedad en su balance hídrico^(6,22). Comparando el cultivo de alfalfa con otros cultivos forrajeros como el maíz, el primero es mucho más demandante de agua, 1,350 mm anuales en promedio, mientras que el segundo tiene una demanda de agua de 550 mm en el ciclo. En las condiciones anteriores es de esperarse que en los años por venir el cultivo de la alfalfa paulatinamente será sustituido por otros cultivos menos demandantes de agua, tal como está sucediendo en las llanuras del norte de Estados Unidos de América, donde se están dando grandes reducciones de la superficie sembrada con alfalfa por otros cultivos como maíz y soya debido a las reducciones de agua para riego⁽²⁸⁾.

Los resultados obtenidos podrían utilizarse en la planeación o en el diseño de estrategias para enfrentar el cambio climático en las áreas productoras de alfalfa, como pudiera ser la búsqueda de nuevas variedades de alfalfa que se adapten a condiciones de mayor temperatura y tolerantes a condiciones de poca disponibilidad de humedad.

Conclusiones e implicaciones

El calentamiento global como efecto del cambio climático del Siglo XXI puede tener un efecto negativo en la viabilidad del cultivo de alfalfa en las áreas agrícolas de riego de México, ya que se espera que la superficie de alto potencial para esta especie descienda sostenidamente del año 2030 al año 2070, tanto en el escenario RCP 4.5 como en RCP 8.5. Sin embargo, si los patrones de emisiones de gases de efecto invernadero evolucionan hacia una RCP 8.5, la factibilidad del cultivo de alfalfa podría ser más afectado, ya que la reducción de superficie de alto potencial sería mayor que en el escenario RCP 4.5. El escenario más negativo se prevé para el año 2070 en el RCP 8.5, puesto que la reducción de la superficie de alto potencial podría ser hasta de 42 %. Pasando de una visión nacional a una visión estatal, lo previsible es un efecto diferenciado del cambio climático; estados donde la superficie potencial para el cultivo de alfalfa podría ser más afectada negativamente en el futuro son Baja California, Sonora y la región de La Laguna en Coahuila y Durango; mientras que otros estados del centro del país prácticamente no experimentarían efectos negativos; esto último podría ocurrir en Guanajuato e Hidalgo, incluso en Chihuahua se prevé un aumento de la superficie potencial para el cultivo de alfalfa. La alfalfa es una especie muy demandante de agua y se cultiva en condiciones de riego con un déficit promedio de 63.9 % con respecto al requerimiento hídrico en la superficie sembrada. Aunado a que para el escenario 2050 se prevé una reducción promedio de la precipitación de 7.2 %, el déficit de agua disponible podría aumentar, por lo que en un futuro cercano el cultivo de la alfalfa puede ser sustituido por otros cultivos menos demandantes como es el de maíz. Los resultados de este estudio pueden servir de base en el diseño de estrategias para enfrentar el cambio climático en las áreas productoras de alfalfa de riego en México, como pudiera ser la generación de nuevas variedades que se adapten a temperatura y evapotranspiración mayores o diseñar una nueva composición de los patrones de cultivos forrajeros en las áreas de riego del país.

Literatura citada:

1. SIACON. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta 1980-2014. SAGARPA. México, D. F. 2015. <http://www.siap.gob.mx/siacon> .Consultado 16 Sep, 2016.
2. Russo C, Green R, Howitt R. Estimation of Supply and Demand Elasticities of California Commodities. Department of Agricultural and Resource Economics. University of California, Davis. Working Paper No. 08-001. 2008.
3. Villanueva DJ; Loredó OC, Hernández RA. Requerimientos hídricos de especies anuales y perenes en las zonas media y altiplano de San Luis Potosí. Centro de Investigación Regional del Noreste. Campo Experimental Palma de la Cruz. Folleto Técnico No. 12. 2001.

4. Maciel PLH, Hernández DFJ, Macías VLM. Requerimientos hídricos de cultivos forrajeros en la unidad de riego El Niágara, Aguascalientes. Centro de Investigación Regional Norte-Centro. Campo Experimental Pabellón. Folleto Técnico No. 30. 2007.
5. Guzmán RSC, Valenzuela SC, Felix VP, Jiménez TA, Ruiz CS. Necesidades hídricas de los principales cultivos en el estado de Baja California. Centro de Investigación Regional del Noroeste. Campo Experimental Valle de Mexicali. Folleto Técnico No. 13. 2008.
6. 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 2014.
7. Woodhouse CA, Meko DM, MacDonald GM, Stahle DW, Cook ERA. 1,200 year perspective of 21st century drought in southwestern North America. Proc Natl Acad Sci USA 2010;(107):21283–21288.
8. Durán PN, Ruiz CJA, González EDR, Ramírez OG. Impact of climate change on grasses cultivation potential of three altitudinal strata- agricultural lands of México. AJAR. 2014;9(18):1396-1406.
9. IPCC-TGCI. Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 1. Prepared by Carter, TR, Hulme M, Lal M. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment. 1999.
10. Van Vuuren, DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, *et al.* The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change: 2011;109(1):5-31.
11. Montero-Martínez MJ, Ojeda-Bustamante W, Santana-Sepúlveda JS, Prieto-González R, Lobato-Sánchez R. Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México. Tecnología y Ciencias del Agua. 2013;4(2):113-128.
12. Ruiz CJA, Medina GG, Manríquez OJD, Ramírez DJL. Evaluación de la vulnerabilidad y propuestas de medidas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático. Informe Final de Proyecto INIFAP-INE. Guadalajara, Jalisco. 2010.
13. Medina-García G, Ruiz-Corral JA, Rodríguez-Moreno VM, Soria-Ruiz J, Díaz-Padilla G, Zarazúa-Villaseñor P. Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. Rev Mex Cienc Agríc 2016;(Pub. Esp. Núm. 13):2465-2474

14. Medina-García G, Ruiz-Corral JA, Ramírez-Legarreta MR, Díaz-Padilla G. Efecto del cambio climático en la acumulación de frío en la región manzanera de Chihuahua. *Rev Mex Cienc Agríc* 2011;(Pub. Esp. Núm. 2):195-207.
15. Ojeda-Bustamante W, Sifuentes-Ibarra E, Íñiguez-Covarrubias M, Montero-Martínez M.J. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 2011;45(1):1-11.
16. Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, Thomson AM, Wolfe D. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agron J* 2011;(103):351-370.
17. Medina GG, Zegbe DJA, Mena CJ, Gutiérrez LR, Reveles HM, Zandate HR, Ruiz CJA, Díaz PG; Luna FM. Potencial productivo de especies agrícolas en el Distrito de Desarrollo Rural Zacatecas, Zacatecas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Norte Centro, Campo Experimental Zacatecas, Calera de V. R., Zacatecas., México. Publicación Técnica No. 3. 2009.
18. Liu D, Wan F, Guo R, Li F, Cao H, Suna G. GIS-based modeling of potential yield distributions for different oat varieties in China. *Mathematical and Computer Modelling* 2011;(54):869–876.
19. Aguilar RN, Galindo MG, Fortanelli MJ, Contreras SC. Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 2010;11(2):144-154.
20. Díaz PG; Medina GG; Ruiz CJA, Serrano AV. Potencial productivo del cultivo de canola (*Brassica napus* L.) en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Golfo Centro, Campo Experimental Cotaxtla, Veracruz, México. Publicación Técnica No. 2. 2008.
21. Attipalli RR, Girish KR, Agepati SR. The impact of global elevated CO₂ concentration on photosynthesis and plant productivity. *Curr Science* 2010;99(1):46-57.
22. Ruiz CJA, Medina GG, Ramírez DJL, Flores LHE, Ramírez OG, Manríquez OJD, Zarazúa VP, González EDR, Díaz PG, Mora OC. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2011;(Pub. Esp. Núm. 2):309-323.
23. Izaurralde RC, Thomson AM, Morgan JA, Fay PA, Polley HW, Hatfield JL. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Forage and Rangeland Production. *Agron J* 2011;(103):371–381. doi:10.2134/agronj2010.0304

24. Jackson LE, Wheeler SM, Hollander AD. Case study on potential agricultural responses to climate change in a California landscape. *Climatic Change* 2011;(109):407. doi:10.1007/s10584-011-0306-3.
25. Hunink JE, Droogers P. Climate Change Impact Assessment on Crop Production in Uzbekistan. World Bank Study on Reducing Vulnerability to Climate Change in Europe and Central Asia (ECA) Agricultural Systems. Report FutureWater: 106. FutureWater. Costerweg 1G. 6702 AA Wageningen. The Netherlands. 2011.
26. Lee J, De Gryze S, Six J. Effect of climate change on field crop production in California's Central Valley. *Climatic Change* 2011;(109):335. doi:10.1007/s10584-011-0305-4.
27. Erice G, Sanz-Sáez A, Aranjuelo I, Irigoyen JJ, Aguirreolea J, Avice JC, Sánchez-Díaz M. Photosynthesis, N₂ fixation and taproot reserves during the cutting regrowth cycle of alfalfa under elevated CO₂ and temperature. *J Plant Physiol* 2011;(168):2007-2014.
28. Derner J, Joyce L, Guerrero R, Steele R. Northern Plains Regional Climate Hub Assessment of Climate Change Vulnerability and Adaptation and Mitigation Strategies, Anderson T, editor. United States Department of Agriculture. 2015.
29. Walton D, Meyerson J, Neelin JD. Accessing, downloading, and viewing CMIP5 data. Earth System Grid Federation. 2013.
30. Ruiz-Corral JA, Medina-García G, Rodríguez-Moreno VM, Sánchez-González JJ, Villavicencio GR, Durán PN, Grageda GJ, García RJE. Regionalización del cambio climático en México. *Rev Mex Cienc Agríc* 2016;(Pub. Esp. Núm. 13):2451-2464.
31. Medina GG, Ruiz CJA, Martínez PRA, Ortiz VM. Metodología para la determinación del potencial productivo de especies vegetales. *Agr Téc Méx.* 1997;23(1):69-90.
32. Santamaría CJ, Núñez HG, Medina GG, Ruiz CJA, Tiscareño LM, Quiroga GMH. 2000. Evaluación del modelo EPIC para estimar el potencial productivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en diferentes ambientes ecológicos de México. *Téc Pecu Méx* 2000;38(2):151-161