



Climate change impact on areas with environmental aptitude for *Bouteloua gracilis* and *Bouteloua repens* in Mexico

Impacto del cambio climático en las áreas con aptitud ambiental para *Bouteloua gracilis* y *Bouteloua repens* en México

Martínez Sifuentes, J. A.¹, Duran Puga, N.², Ruiz Corral, J. A.², González Eguiarte, D. R.², Mena Munguía, S.²

Universidad de Guadalajara ¹Profesor Asociado, Departamento de Ciencias Pecuarias y Agrícolas, Centro Universitario de Los Altos; ²Profesor Investigador, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.

Cite this paper/Como citar este artículo: Martínez Sifuentes, J. A., Duran Puga, N., Ruiz Corral, J. A., González Eguiarte, D. R., Mena Munguía, S. (2020). Climate change impact on areas with environmental aptitude for *Bouteloua gracilis* and *Bouteloua repens* in Mexico. *Revista Bio Ciencias* 7, e720. doi: <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e720>



ABSTRACT

Grassland areas are characterized for having a ground cover which species from the Poaceae family predominate, among which *Bouteloua* genus stands out due to its quality as a fodder and its ecological characteristics. Temperature and precipitation are determinants for net primary productivity of grasslands, in which climate change could cause changes in the vegetation structure. Therefore, the objective of this research was to analyze the impact of climate change on areas with environmental fitness (EF) for *Bouteloua gracilis* and *B. repens* grasses in Mexico. Two climate change scenarios were analyzed, with representative concentration pathways of 4.5 and 8.5 for 2040-2060 and 2060-2080 periods. Twenty-eight environmental variables were used with Maxent model to analyze

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: April 5th 2019.

Accepted/Aceptado: March 11th 2020.

Available on line/Publicado: March 11th 2020.

*Corresponding Author:

Noé Durán Puga. Camino Ramón Padilla Sánchez No. 2100, Nextipac, Zapopan, Jalisco, México. C.P. 45110. E-mail: noe.duran@cucba.udg.mx

RESUMEN

Las áreas de pastizal se caracterizan por tener una cobertura de suelo en la que predominan especies de la familia Poaceae, entre las que sobresale el género *Bouteloua* por su calidad como forraje y sus características ecológicas. La temperatura y la precipitación son determinantes para la productividad primaria neta de los pastizales, en los que el cambio climático podría provocar cambios en la estructura de la vegetación, por lo cual esta investigación se realizó con el objetivo de analizar el impacto del cambio climático en las áreas con aptitud ambiental (EF) para las gramíneas *B. gracilis* y *B. repens* en México. Se analizaron dos escenarios de cambio climático, con las rutas de concentración representativas 4.5 y 8.5 en los periodos 2040-2060 y 2060-2080. Se utilizaron 28 variables ambientales con el modelo Maxent para analizar las áreas con EF para ambas especies. Los resultados mostraron que la temperatura media anual aumentará entre 2.8 °C y 5.0 °C, con cambios más acentuados en zonas áridas y semiáridas; la precipitación anual disminuirá entre 3.1 % y 14.4 %, con cambios principalmente en zonas con

areas with EF for both species. Results showed that the annual average temperature will increase from 2.8 °C to 5.0 °C, with noticeable changes in arid and semiarid zones; the annual average precipitation will decrease from 3.1 % to 14.4 %, mainly in zones with averages lower than 600 mm. New areas with EF will appear in some zones of the country and some others will disappear due to climate change, although in generally there will be greater area with EF, with increases from 6.2% to 9.1 % for *Bouteloua gracilis* and from 13.4 % and 16.5 % for *B. repens* compared with the current surface.

KEY WORDS

Bouteloua gracilis, *Bouteloua repens*, environmental fitness, climate change, Maxent.

Introduction

Native grasslands and grazing areas of other types of vegetation are characterized by a ground cover in which herbaceous species of the Poaceae family predominate, from which 205 genera exist in Mexico, grouping 1,216 species (Dávila *et al.*, 2018). Diverse studies proved that genera with higher presence in these areas are: *Bouteloua*, *Aristida*, *Andropogon*, *Muhlenbergia*, *Sporobolus* and *Heteropogon*, among others, having a ground cover between 7.3 % and 49.8 % of the surface, in the states of Chihuahua and Durango (Rodríguez-Maturino *et al.*, 2017); as well as *Bouteloua gracilis* and *Muhlenbergia rigida* in northeastern Jalisco, with a ground cover between 35 % and 40 % in areas with moderate grazing and between 5 % and 10 % in areas with overgrazing (Delgado-Balbuena *et al.*, 2013).

Species of *Bouteloua* genus are among the most important grasses in the grasslands of Mexico, for their nutritional quality for livestock and for their ecological characteristics (Herrera *et al.*, 2011), among them, Chino grass *Bouteloua repens* (Kunth) Scribn. & Merr and Navajiy grass *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths, so that the last one has been included in grassland improvement programs for its outstanding fodder characteristics (Beltrán *et al.*, 2010; Morales *et al.*, 2009). In addition, *Bouteloua* genus stands out for its diversity with 37 species and 14 varieties in Mexico and sites have been found where plants of this

promedios menores a 600 mm. Debido al cambio climático, se presentarán nuevas áreas con EF en algunas zonas del país y habrá pérdida en otras, aunque de manera general se tendrá mayor área con EF, con incrementos entre 6.2 % y 9.1 % en relación con la superficie actual para *Bouteloua gracilis* y entre 13.4 % y 16.5 % para *B. repens*.

PALABRAS CLAVE

Bouteloua gracilis, *Bouteloua repens*, aptitud ambiental, cambio climático, Maxent.

Introducción

Las áreas de pastizal nativo y las áreas de pastoreo de otros tipos de vegetación se caracterizan por tener una cobertura de suelo en la que predominan especies herbáceas de la familia Poaceae, de las cuales existen en México 205 géneros que agrupan a 1,216 especies (Dávila *et al.*, 2018). Diversas investigaciones han mostrado que los géneros con mayor presencia en estas áreas son: *Bouteloua*, *Aristida*, *Andropogon*, *Muhlenbergia*, *Sporobolus* y *Heteropogon*, entre otros, que tienen una cobertura del suelo entre el 7.3 % y 49.8 % de la superficie, en los estados de Chihuahua y Durango (Rodríguez-Maturino *et al.*, 2017); así como *Bouteloua gracilis* y *Muhlenbergia rigida* en el noreste de Jalisco, con cobertura entre 35 % y 40 % en áreas con pastoreo moderado y de 5 % y 10 % en áreas con sobrepastoreo (Delgado-Balbuena *et al.*, 2013).

Las especies del género *Bouteloua* están entre las más importantes en los pastizales de México, por su calidad alimenticia para el ganado y sus características ecológicas (Herrera *et al.*, 2011), entre las que destacan el zacate Chino *Bouteloua repens* (Kunth) Scribn. & Merr. y el zacate Navajita *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths, esta última ha sido incluida en programas de mejoramiento de pastizales por sus características forrajeras sobresalientes (Beltrán *et al.*, 2010; Morales *et al.*, 2009). Además, el género *Bouteloua* destaca por su diversidad con 37 especies y 14 variedades en México y se han encontrado sitios donde las plantas de este género producen hasta el 90 % de la biomasa vegetal (Giuliani *et al.*, 2014).

Resultados de investigaciones indican que en las siguientes décadas se presentarán cambios en las variables del clima por efecto del calentamiento global en la mayor parte del

genus produce up to 90 % of the vegetal biomass (Giuliani et al., 2014).

Results of studies indicated that changes in climate variables will appear in the next decades due to global warming in most of the Mexican territory and the planet (Durán et al., 2014; Ruíz et al., 2011, Zarazúa et al., 2011); among these changes, temperature and rainfall stood out, due to the fact that they are climatic determinants for plants physiological processes, which is markedly evidenced in the net primary productivity of the ecosystems (Pérez-Ramos et al., 2012).

Climate is a determinant of primary productivity in these ecosystems, so that climate change will have an effect on vegetal communities by modifying in turn services and products provided by these areas (Sage & Zhu, 2011; Reeves et al., 2014), which has motivated studies to evaluate the impact of climate change in vegetal communities. Regarding this, Bocksberher et al. (2016), when analyzing the distribution of 302 Gramineae species, found that precipitation was the variable that exercised the highest influence over the distribution of species and that adaptation in dryer environments was given by the smallest size of plants and by type C₄ photosynthetic pathway; on the other hand, Martinson et al. (2011) reported that *Bouteloua* species showed a negative relation to precipitation, which suggested an adaptive advantage to dry conditions. This current research work was realized with the purpose of analyzing the impact of climate change in areas with environmental fitness for *B. gracilis* and *B. repens* Gramineae in Mexico.

Material and Methods

The study was carried out by using Maximum Entropy Principle (Phillips et al., 2009), referred to as Maxent, to model the ecological niche and predict the area with environmental fitness (EF) for *B. gracilis* and *B. repens* Gramineae; this model has been widely used to estimate potential distributions of vegetal species in general (Durán et al., 2016; Franklin et al., 2013) and for gramineae (Meneses et al., 2014), based on the most significant environmental conditions, using only presence data of the species.

The study included the analysis of reference and future climates data obtained from WorldClim portal, version 2 (Fick & Hijmans, 2017), corresponding to the Geophysical

territorio mexicano y del planeta (Durán et al., 2014; Ruíz et al., 2011, Zarazúa et al., 2011); entre tales cambios sobresalen la temperatura y la precipitación pluvial debido a que son determinantes climáticos para los procesos fisiológicos de las plantas, lo que se manifiesta de manera notable en la productividad primaria neta de los ecosistemas (Pérez-Ramos et al., 2012).

El clima es un determinante de la productividad primaria en los ecosistemas, por lo que el cambio climático tendrá efecto en las comunidades vegetales modificando a su vez los servicios y productos que proveen estas áreas (Sage & Zhu, 2011; Reeves et al., 2014), lo que ha motivado realizar estudios para evaluar el impacto del cambio climático en comunidades vegetales. Al respecto, Bocksberger et al. (2016), al analizar la distribución de 302 especies de gramíneas encontraron que la precipitación fue la variable que ejerció mayor influencia en la distribución de las especies y que la adaptación en ambientes más secos está dada por el tamaño más pequeño de las plantas y por la ruta fotosintética tipo C₄; por su parte, Martinson et al. (2011), consignan que las especies de *Bouteloua* mostraron una relación negativa a la precipitación, lo que sugiere una ventaja adaptativa a condiciones de sequía. La presente investigación se realizó con el objetivo de analizar el impacto del cambio climático en las áreas con aptitud ambiental para las gramíneas *B. gracilis* y *B. repens* en México.

Material y Métodos

La Investigación se llevó a cabo utilizando el modelo de Máxima Entropía (Phillips et al., 2009), referido como Maxent, para modelar el nicho ecológico y predecir el área con EF para las gramíneas *B. gracilis* y *B. repens*; este modelo se ha utilizado ampliamente para estimar las distribuciones potenciales de especies vegetales en general (Durán et al., 2016; Franklin et al., 2013) y para gramíneas (Meneses et al., 2014), con base en las condiciones ambientales más significativas, usando solamente datos de presencia de la especie.

La investigación incluyó el análisis de los datos de clima de referencia y clima futuro obtenidos del portal de Worldclim versión 2 (Fick & Hijmans, 2017), correspondientes al modelo de circulación general GFDL-CM3; se usaron los datos del periodo 1960-1990 como clima de referencia y de los periodos 2041-2060 y 2061-2080, referidos más adelante como periodos 2050 y 2070, respectivamente,

Fluid Dynamics Laboratory Coupled Model 3 (GFDL-CM3); data from 1960-1990 period were used as a reference climate and from 2041-2060 and 2061-2080 periods, later referred to as 2050 and 2070 periods, respectively, with a spatial resolution of 30 seconds of terrestrial arc (Hijmans *et al.*, 2005). Likewise, representative concentration pathways (RCP) of 4.5 and 8.5 W m⁻² were used in the simulation (Van Buuren *et al.*, 2011).

From worldwide climate data obtained, those corresponding to Mexico were extracted and were manipulated by means of layers in *raster* format, using ArcMap 10.2 application, later data were transformed into ASCII format, to obtain the layers of environmental variables with the Idrisi Selva 17.0 system (Eastman, 2016). Resulting layers were in turn analyzed using the Maxent model in order to analyze the areas with EF for *B. gracilis* and *B. repens* species.

The analysis of potential distribution of both species performed with the Maxent program was based on geographic references provided in decimal degrees of latitude and longitude, from the sampling sites of both species. Five hundred one geographical references of *B. gracilis* and 451 of *B. repens* were used, which were obtained from Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2017).

The model used in Maxent included the analysis of 28 environmental variables: annual accumulated precipitation (mm), accumulated precipitation from May to October (mm), accumulated precipitation from November to April (mm), accumulated precipitation from December to February (mm), precipitation of the most humid month (mm), precipitation of the driest month (mm), annual maximum temperature (°C), maximum temperature from May to October (°C), maximum temperature from November to April (°C), annual mean temperature (°C), mean temperature from May to October (°C), mean temperature from November to April (°C), mean temperature of the warmest month (°C), mean temperature of the coldest month (°C), annual minimum temperature (°C), minimum temperature from May to October (°C), minimum temperature from November to April (°C), photoperiod from May to October (H), photoperiod from November to April (H), annual humidity index (mm), humidity index from May to October (HI), humidity index from November to April (HI), humidity index from December to February (HI), annual thermal oscillation (°C), thermal oscillation from

con una resolución espacial de 30 segundos de arco terrestre (Hijmans *et al.*, 2005). Así mismo, en la simulación se usaron las rutas de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) de 4.5 y 8.5 W m⁻² (Van Buuren *et al.*, 2011).

A partir de los datos de clima mundial obtenidos se extrajeron los correspondientes a México y se manipularon a través de capas en formato *raster* con el uso de la aplicación ArcMap 10.2, posteriormente se transformaron a formato ASCII, para obtener las capas de las variables ambientales con el sistema Idrisi Selva 17.0 (Eastman, 2016). Las capas resultantes a su vez fueron analizadas con el modelo Maxent para analizar las áreas con EF para las especies de *B. gracilis* y *B. repens*.

El análisis de distribución potencial de las dos especies realizado con el programa Maxent se basó en referencias geográficas proporcionadas en grados decimales de latitud y longitud, de los sitios de colecta de ambas especies. Se utilizaron 501 referencias geográficas de *B. gracilis* y 451 de *B. repens*, que fueron obtenidas de Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2017).

El modelo utilizado en Maxent incluyó el análisis de 28 variables ambientales: precipitación acumulada anual (mm), precipitación acumulada de mayo a octubre (mm), precipitación acumulada de noviembre a abril (mm), precipitación acumulada de diciembre a febrero (mm), precipitación del mes más húmedo (mm), precipitación del mes más seco (mm), temperatura máxima anual (°C), temperatura máxima de mayo a octubre (°C), temperatura máxima de noviembre a abril (°C), temperatura media anual (°C), temperatura media de mayo a octubre (°C), temperatura media de noviembre a abril (°C), temperatura media del mes más cálido (°C), temperatura media del mes más frío (°C), temperatura mínima anual (°C), temperatura mínima de mayo a octubre (°C), temperatura mínima de noviembre a abril (°C), fotoperiodo de mayo a octubre (H), fotoperiodo de noviembre a abril (H), índice de humedad anual (mm), índice de humedad de mayo a octubre (HI), índice de humedad de noviembre a abril (HI), índice de humedad de diciembre a febrero (HI), oscilación térmica anual (°C), oscilación térmica de mayo a octubre (°C), oscilación térmica de noviembre a abril (°C), oscilación térmica de diciembre a febrero (°C) y textura del suelo.

El modelo Maxent se ajustó para 25 % de los datos para prueba aleatoria y 75 % para entrenamiento, 10

May to October (°C), thermal oscillation from November to April (°C), thermal oscillation from December to February (°C) and soil texture.

Maxent model was adjusted to 25% of data for the randomized test and 75% for the training, 10 repetitions with the cross-validation test and 2500 interactions for convergence; also in addition, *Logistic* output format and *Jackknife* test were required for analyzing the importance of each environmental variable. Given that the results obtained with Maxent algorithm were under the influence of the sampling sites with which the program was supplied (Phillips & Dudik, 2008; Elith et al., 2011), establishing a threshold value was required to estimate the areas with EF for each species (Norris, 2014; Liu et al., 2016), so that a Fixed cumulative value 10 logistic threshold was used in this study (in the Maxent model). Areas with EF obtained with Maxent were examined with Idrisi system and maps were generated with values corresponding to this threshold, from data produced by the application of the model in the reference climate and each scenario of climate change.

Areas occupied by water bodies and urban centers were excluded in the calculation of the potential surface of distribution of both species; these thematic layers were obtained by means of the map of the use of soil and vegetation (INEGI, 2009).

Results and Discussion

Model fixing

In the present research, values of the receiver operating characteristic curve or ROC curve, which represents sampling data fixing, were of 0.957 for *B. gracilis* in all climatic scenarios and of 0.928 to 0.930 for *B. repens* (Table 1), the training data curve and the test data curve were closed to each other, which indicated that there was no omission error (Hernández et al., 2018). Data were in accordance with the value of 0.946 obtained in another research for *B. curtispindula* (Martinson et al., 2011). Values obtained with this model were satisfactory, and indicated the advantage of classifying areas with environmental fitness of both species (Parolo et al., 2008).

Climate change in Mexico

The analysis of annual mean temperature predicted that there will be an increase of 2.8 and 3.4 °C in 2050 and 3.4 and 5.0 °C in 2070, with rcp 4.5 and rcp 8.5, respectively.

replicaciones con la prueba de validación cruzada y 2500 interacciones para convergencia; además, se solicitó el formato de salida *Logistic* y la prueba *Jackknife* para analizar la importancia de cada variable ambiental. Dado que los resultados obtenidos con el algoritmo Maxent son influidos por los sitios de muestreo con que se alimenta el programa (Phillips & Dudik, 2008; Elith et al., 2011), se requiere fijar un valor umbral para estimar las áreas con EF para cada especie (Norris, 2014; Liu et al., 2016), por lo que en esta investigación se utilizó como umbral logístico el valor 10 acumulativo fijo (Fixed cumulative value 10 logistic threshold, en el modelo Maxent). Las áreas con EF obtenidas con Maxent fueron examinadas con el sistema Idrisi y se generaron mapas con los valores correspondientes a este umbral, a partir de los datos arrojados por la aplicación del modelo en el clima de referencia y cada escenario de cambio climático.

Se excluyeron las áreas ocupadas por los cuerpos de agua y centros urbanos en el cálculo de la superficie potencial de distribución de ambas especies; estas capas temáticas se obtuvieron mediante la carta del uso del suelo y vegetación (INEGI, 2009).

Resultados y Discusión

Ajuste del modelo

En la presente investigación, los valores de la curva operacional o curva ROC, la cual representa el ajuste de los datos de muestreo, fueron de 0.957 para *B. gracilis* en todos los escenarios climáticos y de 0.928 a 0.930 para *B. repens* (Tabla 1), la curva de los datos de entrenamiento y la curva de los datos de prueba se sitúan cercanas entre sí, lo que indica que no hay error de omisión (Hernández et al., 2018). Datos congruentes con el valor de 0.946 obtenido en otra investigación para *B. curtispindula* (Martinson et al., 2011). Los valores obtenidos con este modelo son satisfactorios, e indican la bondad para clasificar las áreas con aptitud ambiental de ambas especies (Parolo et al., 2008).

Cambio climático en México

El análisis de la temperatura media anual predice que habrá un aumento de 2.8 y 3.4 °C para el 2050 y de 3.4 y 5.0 °C en el 2070, con el rcp 4.5 y el rcp 8.5 respectivamente. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas, como lo refieren Ruiz et al. (2011), Durán et al. (2014), quienes consignan un aumento en

Table 1.
Area under the curve (AUC) values and standard deviation (SD) for *Bouteloua gracilis* and *B. repens* on reference climate and four climate change scenarios in Mexico.

Tabla 1.
Área bajo la curva (AUC) y valores de la desviación estándar (SD) para *Bouteloua gracilis* y *B. repens* en el clima de referencia y cuatro escenarios de cambio climático en México.

| Climate period | <i>B. gracilis</i> | <i>B. repens</i> |
|----------------|--------------------|------------------|
| 1960-1990 | 0.957 ± 0.006 | 0.928 ± 0.010 |
| rcp 4.5/2050 | 0.957 ± 0.007 | 0.930 ± 0.009 |
| rcp 4.5/2070 | 0.957 ± 0.007 | 0.930 ± 0.010 |
| rcp 8.5/2050 | 0.957 ± 0.007 | 0.930 ± 0.010 |
| rcp 8.5/2070 | 0.957 ± 0.007 | 0.929 ± 0.010 |

These results were in agreement with previous studies, as referred by Ruiz *et al.* (2011) and Durán *et al.* (2014), who consigned an increase in temperature between 1.8 and 3.3 °C in several areas of Mexico and by Galindo *et al.* (2014), who mentioned an increase of 2.5 °C.

It was important to point out that changes in annual minimum temperature and annual maximum temperature will be different for each geographic region, with a general tendency to be more marked in arid and semiarid regions than in temperate and tropical regions; In the present study, results showed an increase in maximum temperature and in the frequency of future scenarios; with the reference climate, the peak of maximum temperature was of 30 °C with a frequency of 12.3 %; it is forecasted that in 2050 it will raise to 33 °C with a frequency of 14.6 % and to 34 °C with a frequency of 15.2 %, and for 2070 it will raise to 35.0 °C with a frequency of 15.1 % and 36.0 °C with a frequency of 17.3 % with rcp 4.5 and rcp 8.5, respectively. Minimum temperature will also raise in future scenarios, although frequency will not change; with rcp 4.5 temperature will increase by 2.25 °C in 2050 and by 2.65 °C in 2070, and with rcp 8.5 it will increase by 2.73 °C and 4.11 °C.

Results for annual precipitation showed that there will be a decrease of 3.1% in 2050 and 7.0% in 2070, with rcp 4.5; and of 6.5% and 14.4 with rcp 8.5. In this regards, in other studies, results showed that precipitation in Mexico will decrease from 2 to 12% in the same period (Durán *et*

la temperatura entre 1.8 y 3.3 °C en diversas áreas de México y Galindo *et al.* (2015), mismos que mencionan un incremento de 2.5 °C.

Es importante señalar que los cambios en la temperatura mínima anual y temperatura máxima anual, serán diferentes para cada región geográfica, con tendencia general a que sea más acentuado en las áreas áridas y semiáridas que en las áreas templadas y tropicales; En el presente estudio los resultados mostraron un aumento en la temperatura máxima y un aumento en la frecuencia en los escenarios futuros; con el clima de referencia de pico de temperatura máxima de 30 °C con una frecuencia de 12.3 %; en el 2050 se pronostica que se elevará a 33 °C con frecuencia de 14.6 % y a 34 °C con frecuencia de 15.2 %, y para el 2070 se incrementará a 35.0 °C y frecuencia de 15.1 % y 36.0 °C y frecuencia de 17.3 % con el rcp 4.5 y rcp 8.5, respectivamente. La temperatura mínima también aumentará en los escenarios futuros, aunque no cambiará la frecuencia; con el rcp 4.5 la temperatura se incrementará en 2.25 °C en el 2050 y en 2.65 °C en el 2070, y con el rcp 8.5 el aumento será de 2.73 °C y de 4.11 °C.

Los resultados para la precipitación anual reflejan que habrá una disminución de 3.1 % en el 2050 y 7.0 % en el 2070, con el rcp 4.5; y de 6.5 % y 14.4 % con el rcp 8.5. Al respecto, en otras investigaciones los resultados muestran que la precipitación en México disminuirá del 2 a 12 % en el mismo periodo (Durán *et al.*, 2014), entre

al., 2014), between 3.8 and 4.5% (Ruíz *et al.*, 2011), and by 10% (Galindo *et al.*, 2015). These changes will be present mainly in the zones with precipitation lower than 600 mm; the study also forecasted that there will be slight increases in the zones with annual rainfall higher than 2000 mm; in these zones, native vegetation of xerophilous thickets and natural grassland largely proliferated, and they were mainly located in the center, northeast and northwest of Mexico. Given the aforementioned, a lower availability of humidity in the soil, along with an increase in annual mean temperature, in grassland areas would cause alterations in the structure and in the net main productivity (Edwards & Smith, 2010; Martinson *et al.*, 2011; Bocksberger *et al.*, 2016).

Areas with environmental fitness

Areas with EF for estimated *B. gracilis*, were mainly distributed in the Mexican Altiplano region (Figure 1, left side), mainly located in Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes and Guanajuato, northern part of Jalisco, southern Coahuila, southern Nuevo Leon and small zones in Queretaro, Hidalgo, Estado de Mexico, Morelos and Puebla. Generally, native vegetation of these areas is grassland and/or xerophilous thickets. Results of the study were congruent with the areas of distribution for the species, described by Cortés *et al.* (2013), who indicated that the areas with higher probability for the presence of *B. gracilis* had between 400 and 800 mm of annual precipitation and annual mean temperature of 13 to 19 °C; as well, the areas defined in the present study were in accordance with the areas of distribution (Coahuila, Nuevo Leon and Tamaulipas) pointed out by Herrera *et al.* (2008).

On the other hand, *B. repens* (Figure 1, right side) had a wide distribution in the central region of the country, since it covered a great part of the surface of the states of Jalisco, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato, Colima, Michoacán, Queretaro and Hidalgo, a lesser proportion in the north of Chihuahua, southern Durango, center and south of Nuevo Leon and southern Tamaulipas; small areas in the states of Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Quintana Roo, Yucatan and Baja California Sur. The wide surface with EF for *B. repens* can be due to the fact that it was distributed in open grassland fields, plains and/or slopes in sandy and rocky soils, in oak and pine woodlands, grasslands and xerophilous thickets (Herrera *et al.*, 2008), conditions presented by a great part of the Mexican territory.

3.8 y 4.5 % (Ruíz *et al.*, 2011), y del 10 % (Galindo *et al.*, 2015). Estos cambios se presentarán principalmente en las zonas con precipitación menor a 600 mm, donde prolifera en gran medida la vegetación nativa de matorral xerófilo y pastizal natural, y se ubican principalmente en el centro, noreste y noroeste de México; el estudio pronostica también que, habrá ligeros incrementos en las zonas con precipitación superior a los 2000 mm anuales. Por lo anterior, una menor disponibilidad de humedad en el suelo, junto con un incremento en la temperatura media anual, en las áreas de pastizal provocaría alteraciones en la estructura y en la productividad primaria neta (Edwards & Smith, 2010; Martinson *et al.*, 2011; Bocksberger *et al.*, 2016).

Áreas con aptitud ambiental

Las áreas con EF para *B. gracilis* estimadas, se distribuyen principalmente en la región del Altiplano Mexicano (Figura 1, lado izquierdo), ubicadas principalmente en Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Guanajuato, parte del norte de Jalisco, sur de Coahuila, sur de Nuevo León y pequeñas zonas en Querétaro, Hidalgo, Estado de México, Morelos y Puebla. De manera general, la vegetación nativa de estas áreas es pastizal y/o matorral xerófilo. Los resultados del estudio son congruentes con las áreas de distribución para la especie, descritas por Cortés *et al.* (2013), quienes indican que las áreas con mayor probabilidad para la presencia de *B. gracilis* tienen entre 400 y 800 mm de precipitación anual y una temperatura media anual de 13 a 19 °C; así mismo, las áreas definidas en la presente investigación son acordes con las áreas de distribución (Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas) señaladas por Herrera *et al.* (2008).

Por su parte, *B. repens* (Figura 1, lado derecho) tienen una amplia distribución en la región central del país, ya que cubre gran parte de la superficie en los estados de Jalisco, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato, Colima, Michoacán, Querétaro e Hidalgo, una menor proporción en el norte de Chihuahua, sur de Durango, centro y sur de Nuevo León y sur de Tamaulipas; pequeñas áreas en los estados de Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Quintana Roo, Yucatán y Baja California Sur. La amplia superficie con EF para *B. repens* se puede deber a que se distribuye en terrenos abiertos de pastizales, planicies y/o laderas en suelos arenosos y pedregosos, en bosques de encino, de pino, pastizales y matorrales xerófilos (Herrera *et al.*, 2008), condiciones que presenta gran parte del territorio mexicano. Los resultados de esta investigación pronostican también que el cambio climático provocará modificaciones en la

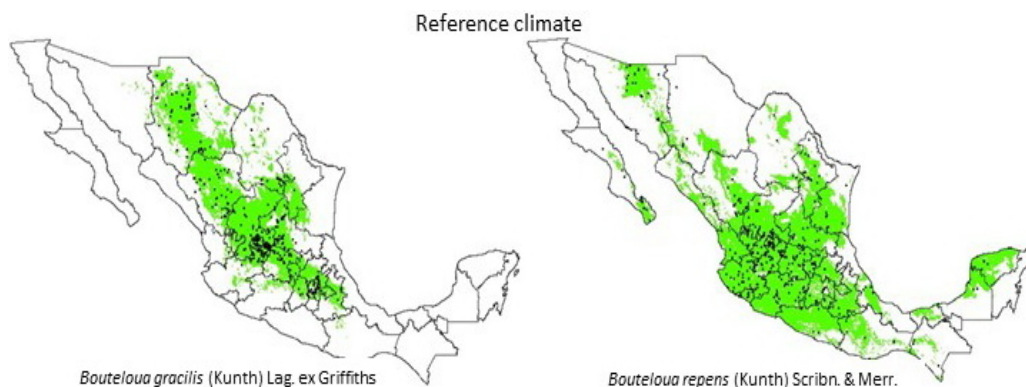


Figure 1. Area with environmental aptitude for *Bouteloua gracilis* (left side image) and *B. repens* (right side) on the reference climate. The dots indicate collect sites for both species.

Figura 1. Área con aptitud ambiental para *Bouteloua gracilis* (imagen del lado izquierdo) y *B. repens* (lado derecho) en el clima de referencia. Los puntos indican sitios de colecta para ambas especies.

Results of this research work predicted that climate change will also cause modifications on the distribution of areas with EF, so that areas of expansion, constriction or distribution management of the species under study will appear (Table 2), in some zones of the country (Figure 2). This was in accordance with what was mentioned

distribución de las áreas con EF, de forma que se presentarán áreas de expansión, constricción o mantenimiento de distribución de las especies bajo estudio (Tabla 2), en algunas zonas del país (Figura 2). Esto concuerda con lo mencionado por Hu *et al.* (2015), donde refiere que las tasas del cambio climático afectarán dramáticamente los

Table 2.
Area with environmental aptitude for *Bouteloua gracilis* and *B. repens* on reference climate and relative change (%) in four scenarios of climate change in Mexico.
Tabla 2.
Área con aptitud ambiental para *Bouteloua gracilis* y *B. repens* con el clima de referencia y el cambio relativo (%) con cuatro escenarios de cambio climático en México.

| Climate escenarios | <i>B. gracilis</i> (km ²) | % | <i>B. repens</i> (km ²) | % |
|--------------------|---------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|
| 1960-1990 | 385,305 | 100.0 | 714,837 | 100.0 |
| 4.5/2050 | 420,407 | 109.1 | 832,732 | 116.5 |
| 4.5/2070 | 414,051 | 107.5 | 829,877 | 116.1 |
| 8.5/2050 | 419,214 | 108.8 | 828,168 | 115.9 |
| 8.5/2070 | 409,327 | 106.2 | 810,655 | 113.4 |

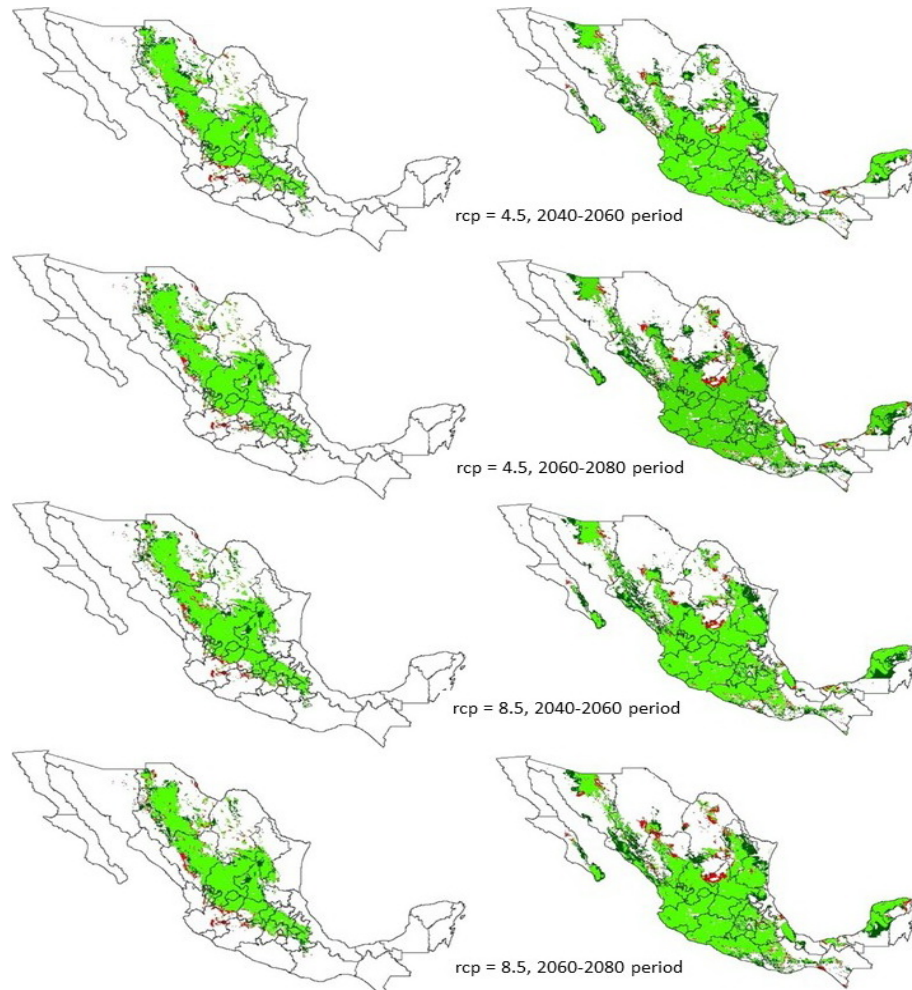


Figure 2. Area with environmental aptitude for *Bouteloua gracilis* (left side) and *B. repens* (right side) in Mexico due to climate change effect with rcp 4.5 and 8.5, on 2050 and 2070 periods. New area is showed in dark green and lost areas in orange color.

Figura 2. Área con aptitud ambiental para *Bouteloua gracilis* (lado izquierdo) y *B. repens* (lado derecho) en México debido al efecto del cambio climático con los rcp4.5 y 8.5, en los periodos 2050 y 2070. El área nueva se muestra en verde oscuro y las áreas perdidas en color naranja.

by Hu *et al.* (2015), where they reported that the rates of climate change will dramatically affect community groups and biodiversity in tropical zones of the Earth.

The increase in the area with EF for *B. gracilis* and *B. repens* could be explained by the fact they both have C_4 photosynthetic pathway (Ogle, 2003; Giraldo-Cañas, 2010), which gave them advantage for prospering and predominating in grassland ecosystems, due to their

grupos de comunidades y la biodiversidad en las zonas tropicales de la tierra.

El incremento en el área con EF para *B. gracilis* y *B. repens* podría ser explicado por que ambas especies tienen ruta fotosintética C_4 (Ogle, 2003; Giraldo-Cañas, 2010), que les otorga ventaja para prosperar y predominar en los ecosistemas de pastizales debido a que tienen eficiencia entre 1.3 y 4.0 veces mayor en el

efficiency between 1.3 and 4.0 times greater in water use and in nitrogen use, in comparison with C_3 plants (Ghanoum *et al.*, 2011; Wi *et al.*, 2012; Polley *et al.*, 2014).

Environmental variables that greatly contributed to explain the distribution of *B. gracilis* and *B. repens*.

Results from this study showed that the environmental variables that contributed to explain the distribution of *B. gracilis* were: thermal oscillation from November to April, precipitation of the most humid month and photoperiod from October to April. For *B. repens*, precipitation of the most humid month and photoperiod from November to April were the variables that most contributed to the distribution of the species.

uso de agua y en el uso de nitrógeno, con respecto a las plantas C_3 (Ghanoum *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2012; Polley *et al.*, 2014).

Variables ambientales que en mayor medida contribuyeron a explicar la distribución de *B. gracilis* y *B. repens*.

Los resultados de esta investigación reflejaron que las variables ambientales que contribuyen a explicar la distribución de *B. gracilis* son: la oscilación térmica de noviembre a abril, la precipitación del mes más húmedo y el fotoperiodo de octubre a abril. Para *B. repens*, la precipitación del mes más húmedo y el fotoperiodo de noviembre a abril fueron las variables ambientales que más contribuyeron en la distribución de la especie.

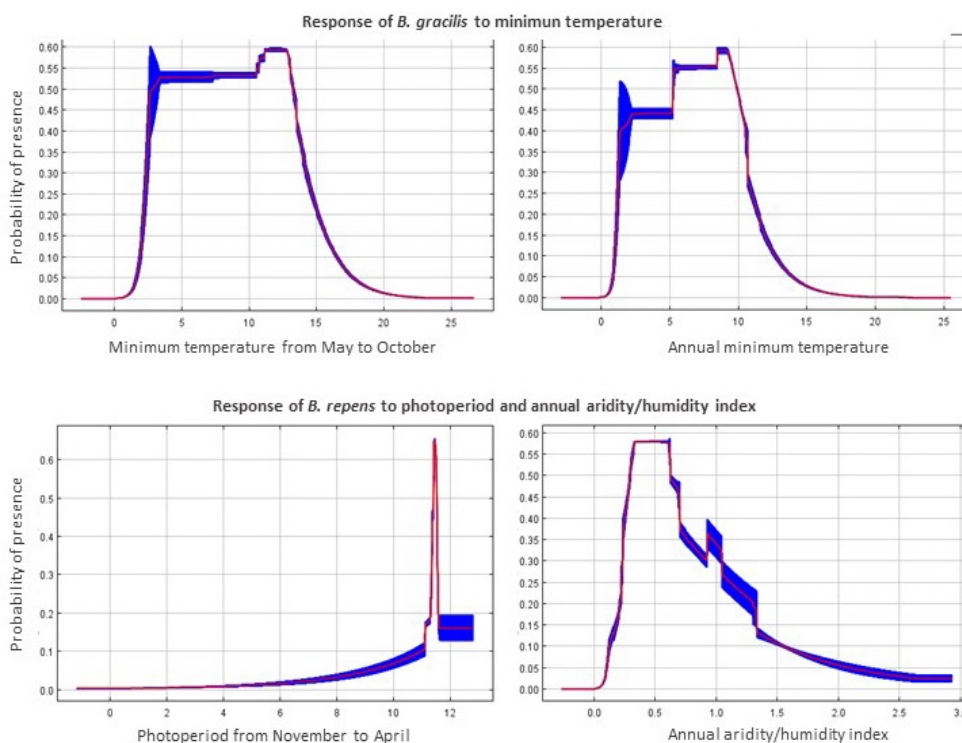


Figure 3. Main environmental variables explaining the *Bouteloua gracilis* presence (top figures) and *B. repens* (bottom figures) on reference climate. Red line show the answer zone for the variable and blue zone show the standard deviation.

Figura 3. Principales variables ambientales que explican la presencia de *Bouteloua gracilis* (figuras superiores) y *Bouteloua repens* (figuras inferiores) en el clima de referencia. La línea roja muestra la zona de respuesta a la variable y la zona azul muestra la desviación estándar.

In addition, *Jackknife* test of Maxent model analyzed the individual importance of each variable, which contributed to identify the variables that had important effects when the effect of other variables was excluded (Elith *et al.*, 2011); thus, for *Bouteloua gracilis* the most important individual contribution were minimum temperature from May to October and annual minimum temperature (Figure 3, upper part), with a favorable effect with temperatures between 7 and 13 °C, less favorable effect between 3 and 7 °C and clearly unfavorable effect for the species over 13 °C. Photoperiod was the main environmental variable for *Bouteloua repens* (Figure 3, upper part) with greater influence in the period from November to April (Figure 3, lower part) with a photoperiod of 11 of daylight in the cold and little rainy months of the year, followed by the annual aridity/humidity index between 0.3 and 0.7, which corresponded to semiarid and subhumid-dry categories, according to UNEP's classification (1997).

It is important to highlight that results from this study referred to the potential distribution of *B. gracilis* and *B. repens* in relation to environmental variables, but without taking into account ecological factors of the community that will also be modified by climate change. Altering seasonal patterns of rain could directly affect plants composition and phenology, as well as indirectly and significantly affect interactions between plants and competition for available resources (Prevey & Seastedt, 2015).

Conclusions

The analysis of climate change indicated that there will be a raise in the annual mean temperature of 2.8 °C and 5.0 °C in relation to the reference climate, and an annual accumulated decrease of precipitation between 3.1 % and 14.4% in future scenarios; these changes will be present mainly in the zones with annual precipitation lower than 600 mm in the reference climate.

The area with environmental fitness for *Bouteloua gracilis* will increase between 6.2 % and 9.1 % and between 13.4 % and 16.5 % for *Bouteloua repens*, in 2050 and 2070 respectively.

The ecological descriptors that together contributed to explain to a great extent the changes in areas with environmental fitness were thermal oscillation, precipitation

Además, la prueba *Jackknife* del modelo Maxent analiza la importancia individual de cada variable, lo que contribuye a identificar las variables que tienen efectos importantes cuando se excluye el efecto de otras variables (Elith *et al.*, 2011); de esta forma, para *Bouteloua gracilis* la contribución individual más importante fueron la temperatura mínima en los meses de mayo a octubre y la temperatura mínima anual (Figura 3, parte superior), con un efecto favorable con temperaturas entre 7 y 13 C, efecto menos favorable entre 3 y 7 °C y claramente desfavorables para la especie por arriba de 13 °C. El fotoperiodo fue la principal variable ambiental para *Bouteloua repens* (Figura 3, parte inferior) con mayor influencia en el periodo de noviembre a abril (Figura 3, parte de abajo) con un periodo de 11 horas de luz en los meses fríos y poco lluviosos del año, seguido del índice de aridez/humedad anual entre 0.3 y 0.7, que corresponde a las categorías semiárida y subhúmeda-seca, de acuerdo con la clasificación de UNEP (1997).

Es importante resaltar que los resultados de esta investigación se refieren a la distribución potencial de *B. gracilis* y *B. repens* en relación con las variables ambientales, pero sin tomar en cuenta factores ecológicos de la comunidad que también serán modificados por el cambio climático. Al alterar los patrones estacionales de lluvia pueden tener efectos directos en la composición y fenología de las plantas, así como efectos significativos indirectos de las interacciones entre plantas y competencia por los recursos disponibles (Prevey & Seastedt, 2015).

Conclusiones

El análisis del cambio climático indica que habrá un aumento en la temperatura media anual de 2.8 °C y 5.0 °C en relación con el clima de referencia, y una disminución acumulada anual de la precipitación entre 3.1 % y 14.4 % en los escenarios futuros; estos cambios se presentarán principalmente en las zonas con precipitación anual menor a 600 mm en el clima de referencia.

El área con aptitud ambiental para *Bouteloua gracilis* se incrementará entre 6.2 % y 9.1 % y para *Bouteloua repens* será entre 13.4 % y 16.5 % en el 2050 y 2070 respectivamente.

Los descriptores ecológicos que de manera conjunta contribuyeron en mayor medida a explicar los cambios en las áreas con aptitud ambiental fueron la oscilación térmica,

of the most humid month (September), photoperiod and minimum temperature of the most humid period.

la precipitación del mes más húmedo (septiembre), el fotoperiodo y la temperatura mínima del periodo más húmedo.

References

- Beltrán, L. S., García, D. C. A., Hernández, A. J. A., Loredo, O. C., Urrutia, M. J., González E. L. A. and Gámez V. H. G. (2010). Navajita Cecilia *Bouteloua gracilis* H.B.K. (Lag.). Nueva variedad de pasto para zonas áridas y semiáridas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 1(2): 127-130. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcp/v1n2/v1n2a4.pdf>
- Bocksberger, G., Schnitzler, J., Chatelain, C., Daget, P., Janssen, T., Schmidt, M., Thiombiano, A. and Zizka, G. (2016). Climate and the distribution of grasses in West Africa. *Journal of Vegetation Science* 27: 306-317. <https://doi.org/10.1111/jvs.12360>
- Cortés, O. A., Herrera, A. Y., Herrera, C. J. and Hernández V. D. (2013). Potential distribution of three native and one introduced grass species in semiarid highlands of Mexico using GIS techniques. *Journal of Botanical Research Institute of Texas* 7(1): 441-451. <https://www.jstor.org/stable/24621094>
- Dávila, P., Mejía-Saulés, M. T., Soriano-Martínez, A. M. and Herrera-Arrieta, Y. (2018). Conocimiento taxonómico de la familia Poaceae en México. *Botanical Sciences* 96(3): 462-514. <https://doi.org/10.17129/botsci.1894>
- Delgado-Balbuena, J., Arredondo, J. T., Loescher, H. W., Huber-Sannwald, E., Chavez-Aguilar, G., Luna-Luna, M. and Barretero-Hernandez, R. (2013). Differences in plant cover and species composition of semiarid grassland communities of central Mexico and its effects on net ecosystem exchange. *Biogeosciences* 10: 4673-4690. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4673-2013>
- Durán, P. N., Ruiz, C. J. A., González, E. D. R. and Ramírez, O. G. (2014). Impact of climate change on grasses cultivation potential of three altitudinal strata-agricultural lands of Mexico. *African Journal of Agricultural Research* 9: 1396-1406. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.8121>
- Durán, P. N., Ruiz, C. J. A., González, E. D. R., Mena, M. S. and Orozco, R. G. (2016). Cambio climático y su impacto sobre la aptitud ambiental y distribución geográfica de *Salvia hispanica* en México. *Interciencia* 41(6): 407-413. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33945816006>
- Eastman, J. R. (2016). Idrisi Selva, Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Manual versión 17. Clark Labs, Clark University. Obtenido el 15 de octubre de 2017 en <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/IDRISI-Selva-Spanish-Manual.pdf>
- Edwards, E. J., & Smith, A. (2010). Phylogenetic analysis reveal the shady history of C4 grasses. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 107: 2532- 2537. <https://doi.org/10.1073/pnas.0909672107>
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudik, M., Chee, Y. E. and Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17: 43- 57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Fick, S. E. & Hijmans, R. J. (2017). Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 37: 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Franklin, J., Davis, F. W., Ikegami, M., Syphard, A. D., Flint, L. E., Flint, A. L. and Hannah, L. (2013). Modeling plant species distributions under future climates: how fine scale do climate projections need to be?. *Global Change Biology* 19: 473-483. <https://doi.org/10.1111/gcb.12051>
- Galindo, L. M., Reyes, O. and Alatorre, J. E. (2015). Climate change, irrigation and agricultural activities in Mexico: A Ricardian analysis with panel data. *Journal of Development and Agricultural Economics* 7(7): 262-273. <https://doi.org/10.5897/JDAE2015.0650>
- Ghannoum, O., Evans, J. R. and Caemmerer, S. (2011). Chapter 8 Nitrogen and water use efficiency of C4 plants. In: Raghavendra, A. Sage. R (eds). C4 photosynthesis and related CO2 concentrating mechanisms. Dordrecht, the Netherlands. Springer Publishers. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9407-0_8
- Global Biodiversity Information Facility [GBIF]. (2017). GBIF Occurrence Download. *Bouteloua curtipendula* (Michx.), *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths, *Bouteloua repens* (Kunt) Scribu. and Merr. [Last check 11th February 2017] <https://www.gbif.org/es/>

- Giraldo-Cañas, D. (2010). Distribución e invasión de gramíneas C_3 y C_4 en un ambiente altitudinal de los Andes de Colombia. *Caldasia* 32(1): 65-86. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/36194/37660>
- Giuliani, A. L., Kelly, E. F. and Knapp, A. K. (2014). Geographic variation in growth and phenology of two dominant central US grasses: consequences for climate change. *Journal of Plant Ecology* 7(3): 211-221. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtt036>
- Hernández, R. J., Reynoso, S. R., Hernández, R. A., García, C. X., Hernández, M. E., Cob, U. J. V. and Sumano, L. D. (2018). Distribución histórica, actual y futura de *Cedrela odorata* en México. *Acta Botánica Mexicana* 124: 117-134. <https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1305>
- Herrera-Arrieta, Y., Peterson, P. M. and Valdes-Reyna, J. (2008). *Journal of the Botanical Research Institute of Texas* 2(2): 917-981. <https://www.jstor.org/stable/41971742>
- Herrera, C. J., González, G. F., Carrete, C. O. F., Naranjo, J. N., Pereda S. M. E. and Herrera, A. Y. (2011). Composition and quality of cattle diet under extensive grazing on grasslands in Northern Mexico. *Journal of Animal and Veterinary Advances* 10(21): 2831-2837. <https://doi.org/10.3923/javaa.2011.2831.2837>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. and Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hu, G. X., Jin, Y., Wang, R. X., Mao, F. J. and Li, Y. (2015). Predicting impacts of future climate change on the distribution of the widespread conifer *Platycladus orientalis*. *PLoS One*, 1, 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132326>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2009). Guía para interpretación cartográfica: Uso de suelo-vegetación Serie III. D. F. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- Liu, C., Newell, G. and White, M. (2016). On the selection of thresholds for predicting species occurrence with presence-only data. *Ecology and Evolution* 6(1): 337-348. <https://doi.org/10.1002/ece3.1878>
- Martinson, E. J., Eddy, Z. B., Commerford, J. L., Blevins, E., Rofsmeier, S. J. and McLauchlan, K. K. (2011). Biogeographic distributions of selected North American grassland plant species. *Physical Geography* 2011;32(6):583-602. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.32.6.583>
- Meneses, R. I., Larrea-Alcázar, D. M., Beck, S. G. and Espinoza, S. (2014). Modelando patrones geográficos de distribución de gramíneas (Poaceae) en Bolivia: Implicaciones para su conservación. *Ecología en Bolivia* 49(1): 3-19. http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v49n1/v49n1_a02.pdf
- Morales, N. C., Madrid P. L., Melgoza C. A., Martínez S. M., Arévalo G. S., Rascón C. Q. and Jurado G. P. (2009). Análisis morfológico de la diversidad del pasto navajita [*Bouteloua gracilis* (Willd. ex Kunth) Lag. ex Steud.], en Chihuahua, México. *Técnica Pecuaria en México* 47(3): 245-256. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61312111002>
- Norris, D. (2014). Model thresholds are more important than presence location type: Understanding the distribution of lowland tapir (*Tapirus terrestris*) in a continuous Atlantic forest of southeast Brazil. *Tropical Conservation Science* 7(3): 529-547. <https://doi.org/10.1177/194008291400700311>
- Ogle, K. (2003). Implications of interveinal distance for quantum yield in C_4 grasses: a modeling and meta-analysis. *Oecologia* 136: 532-542. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1308-2>
- Parolo, G., Rossi, G. and Ferrarini, A. (2008). Toward improved species niche modelling: *Arnica montana* in the Alps as a case study. *Journal of Applied Ecology*. 45(5): 1410-1418. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01516.x>
- Pérez-Ramos, I. M., Roumet, C., Cruz, P., Blanchard, A., Autran, P. and Garnier, E. (2012). Evidence for "a plant community economics spectrum" driven by nutrient and water limitations in a Mediterranean rangeland on Southern France. *Journal of Ecology* 100: 1315-1327. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12000>
- Phillips, S. J., Dudik, M., Elith, J., Graham, C. H., Lehmann, A., Leathwick, J. and Ferrier, S. (2009). Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecology Applications* 19: 181-197. <https://www.jstor.org/stable/27645958>
- Phillips, S. J. & Dudik, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Polley, H. W., Derner, J. D., Jackson, R. B., Wilsey, B. J. and Fay, P. A. (2014). Impacts of climate change drivers on C_4 grassland productivity: scaling driver effects through the plant community. *Journal of Experimental Botany* 65: 3415-3424. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru009>

- Prevey, J. S. & Seastedt, T. R. (2015). Effects of precipitation change and neighboring plants on population dynamics of *Bromus tectorum*. *Oecologia* 179(3): 765-775. <https://doi.org/10.1007/s00442-015-3398-z>
- Reeves, M. C., Moreno, A. L., Bagne, K. E. and Running, S. W. (2014). Estimating climate change effects on net primary production of rangelands in the United States. *Climate Change* 126: 429-442. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1235-8>
- Rodríguez-Maturino, A., Martínez-Guerrero, J. H., Chairez-Hernández, I., Pereda-Solís, M. E., Villarreal-Guerrero, F., Rentería-Villalobos, M. and Pinedo-Álvarez, A. (2017). Mapping land cover and estimating the grassland structure in a priority area of the Chihuahuan Desert. *Land* 6, 70. <https://doi.org/10.3390/land6040070>
- Ruiz, C. J. A., Medina G. G., Ramírez D. J. L., Flores, L. H. E., Ramírez, O. G., Manríquez, O. J. D., Zarazúa, V. P., González, E. D. R., Díaz, P. G. and De la Mora, O. C. (2011). Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productivas de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Publ. Esp. 2: 309-323. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2nspe2/v2spe2a11.pdf>
- Sage, R. F. & Zhu, X. G. (2011). Exploiting the engine C4 photosynthesis. *Journal of Experimental Botany* 62: 2989-3000. <https://doi.org/10.1093/jxb/err179>
- UNEP. (1997). World Atlas of Desertification, 2nd ed. United Nations Environment Programme. Oxford University Press, England.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., A. Thomson., Hibbard, K., Hurt, G., Kram, T., Krey, V., Jean-Francois, L., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, J. S. and Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: and overview. *Climatic Change* 109: 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Wu, Z., Dijkstra, P., Koch, G. W. and Hungate, B. A. (2012). Biogeochemical and ecological feedbacks in grasslands responses to warming. *Natural Climate Change* 2: 458-461. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1486>
- Zarazúa-Villaseñor, P., Ruiz-Corral, J. A., González-Eguiarte, D. R., Flores-López, H. E. and Ron-Parra, J. (2011). Impacto del cambio climático sobre la agroclimatología del maíz en Ciénega de Chapala, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Publ. Esp. 2: 351-363. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2nspe2/v2spe2a14.pdf>