

# Impacto del cambio climático en la agricultura de secano de Aguascalientes, México para un futuro cercano (2015-2039)

Climate change impact on rainfed agriculture in Aguascalientes, Mexico for the near future (2015-2039)

Iván Montiel-González<sup>1</sup>, Santos Martínez-Santiago<sup>1</sup>, Armando López Santos<sup>1</sup>, Gabriel García Herrera<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Programa de Maestría en Recursos Naturales y Medioambiente de Zonas Áridas de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango, México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango, México. Autor para correspondencia: alopez@chapingo.urruza.edu.mx; armando.lopezsantos@gmail.com

## Resumen

Los objetivos de la investigación fueron: 1) Evaluar los impactos probables del cambio climático (CC) en la agricultura de secano (AS) en Aguascalientes, México, con base en el modelo HadGEM2-ES para el forzamiento radiativo 8.5 en un futuro cercano, 2015-2039; y 2) Determinar la magnitud de los impactos del CC en la aptitud productiva de la AS a través del análisis de la variabilidad de la precipitación media anual (PMA). La unidad de estudio comprendió el territorio de Aguascalientes, cuyos climas predominantes son semiseco [BS<sub>1</sub>kw, BS<sub>1</sub>hw(w)] y templado subhúmedo [C(wO)], y PMA de 526 mm. La evaluación del impacto potencial del CC en la AS de Aguascalientes se basa en el análisis de características edáficas y topográficas en las cuales se practica esta actividad y se complementa con el análisis de la PMA para el futuro cercano, apoyados con imágenes satelitales tipo SPOT. Los resultados indican incrementos probables en la PMA del 20 %, lo cual no necesariamente garantiza un impacto positivo en la productividad del cultivo de maíz, ya que hay factores asociados a las condiciones edáficas, topográficas y de las políticas de uso de la tierra que determinan el éxito del mismo.

**Palabras clave:** escenarios climáticos, forzamiento radiativo, mitigación, adaptación.

## Abstract

The objectives of this research were: 1) To assess the probable impacts of climate change (CC) on the rainfed agriculture (RA) in Aguascalientes, Mexico based on the model HadGEM2-ES 8.5 in the Near Future, 2015-2039; and 2) to determine the magnitude of the impacts of CC on the productive aptitude of RA through the analysis of the variability of mean annual rainfall (MAR). The study unit comprises the territory of Aguascalientes whose predominant climates are semi-dry [BS<sub>1</sub>kw, BS<sub>1</sub>hw(w)] and temperate subhumid [C(wO)], and the MAR is 526 mm. The evaluation of the potential impact of CC on RA of Aguascalientes was performed by the analysis of edaphic and topographic characteristics under which this activity is practiced and complemented with an analysis of the MAR for the near future supported with SPOT satellite imagery. The results show a probable increase of 20 %; this does not necessarily guarantee a CC positive impact on maize production, because there are other factors associated with edaphic and topographic conditions and land use politics that determine its success.

**Keywords:** climatic scenarios, radiative forcing, mitigation, adaptation.

## Introducción

La intensificación de la variabilidad de los fenómenos hidrometeorológicos a nivel global ha impactado en poco tiempo y de diversas formas a los sistemas naturales y antrópicos (Bellon, Hodson, & Hellin, 2011; IPCC, 2007; Jean-François et al., 2017; Reed & Stringer, 2015); según el Quinto Reporte de Valoración (AR5, por sus siglas en inglés) sobre Cambio Climático del International Panel on Climatic Change (IPCC, 2014), los impactos atribuibles a esta problemática para las regiones tropicales y templadas donde se cultivan los principales alimentos a nivel mundial (soya, trigo, arroz y maíz) presentaron tasas negativas en los rendimientos por decenio (1960-2013) con máximos entre -2 y -3 %, respectivamente; específicamente para maíz, la tasa fue de  $-1.75 \pm 1.25$  %.

El IPCC (2007) en su reporte previo (AR4) advirtió que a nivel global se esperarían incrementos de temperatura y mayor variabilidad de la lluvia con efectos directos en todos los sectores de la economía, especialmente en las actividades primarias (agricultura, ganadería y forestal); ello fue confirmado recientemente en el AR5; esto considerando la tendencia de incremento de la temperatura media global en el periodo de 1986 a 2005, que fue de aproximadamente  $0.61$  °C ( $0.55$  a  $0.67$  °C), más caliente que el periodo de 1850 a 1900. En este sentido, la Convención Marco de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés) menciona que en el transcurso de un decenio (2000-2010) se han registrado temperaturas extremas con más frecuencia y largos periodos de sequía en todas las regiones del mundo (UNCCD, 2013).

México, por sus características socioeconómicas y ecológico-geográficas, presenta gran vulnerabilidad sectorial (IPCC, 2007; IPCC, 2014). Las sequías recurrentes afectan de modo irreversible a sistemas naturales y antrópicos (López-Santos & Martínez-Santiago, 2015; Magaña, 2013); por ejemplo, la sequía registrada en 2011 se extendió en más del 40 % del territorio nacional (19 entidades) y conllevó costos estimados en poco más de 15 mil millones de pesos, equivalentes al 6.39 % del Producto Interno Bruto (PIB) del sector agropecuario (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [SEMARNAT-INECC], 2012). Algunos estudios que han reportado impactos potenciales del cambio climático con base en distintos escenarios futuros son los siguientes.

Conde et al. (1997) evaluaron impactos del CC en siete sitios productores de maíz (Atacomulco, México; Izucar, Puebla; Ixcamilpa, Puebla; Coatepec, Veracruz; Tuxpan, Veracruz; La Huerta, Jalisco y Magdalena, Jalisco) mediante modelación de predicción con CERES (Crop Environment Resource Synthesis, por sus siglas

en inglés) para maíz (CERES-Maize), con base en dos modelos: CCM (Canadian Climate Center Model, por sus siglas en inglés) y GFDL-R30 (Geophysical Fluids Dynamics Laboratory, por sus siglas en inglés), a partir de datos diarios de temperatura y precipitación y, al considerar incrementos arbitrarios de temperatura ( $+2$  °C,  $+4$  °C) y precipitación pluvial ( $\pm 20$  %), encontraron, que con  $2$  °C de incremento de la temperatura y  $-20$  % de precipitación, las áreas no adecuadas para el cultivo de maíz podrían incrementarse en un 18 %. Monterroso, Conde, Rosales, Gómez, y Gay (2011) evaluaron la aptitud territorial actual de México para el cultivo de maíz de secano y mediante simulaciones de escenarios socioeconómicos de CC (A2 y B2) descritos en el AR4 para el horizonte 2010-2039. Ellos Monterroso et al., (2011) encontraron que las áreas con mayor aptitud son las más vulnerables, estimando afectaciones de hasta 4.3 % de la superficie actual. Sin embargo, este tipo de conocimiento no se ha generado para el caso del estado de Aguascalientes, México.

Es así que los objetivos de la presente investigación fueron: 1) Evaluar los impactos probables del CC en la agricultura de secano de Aguascalientes, México, con base en el modelo HadGEM2-ES para el forzamiento radiativo 8.5 en un futuro cercano, 2015-2039; y 2) Determinar la magnitud de los impactos del CC en la aptitud productiva de la agricultura de secano con base en el análisis de variabilidad precipitación pluvial.

## Materiales y métodos

### Descripción de la unidad de estudio (UE)

El territorio de Aguascalientes se consideró como UE. Su superficie es de 562.1 kilohectáreas (kha). Aguascalientes se ubica entre los paralelos  $21.61$  y  $22.45^\circ$  de latitud norte y entre los meridianos  $-101.816$  y  $-102.866^\circ$  de longitud oeste. Dicho territorio colinda al norte, noreste y oeste con Zacatecas y al sureste y sur con Jalisco (Figura 1).

El 86 % de la UE presenta clima árido ( $BS_1kw$ ) y semiárido  $BS_1hw(w)$ ; en tanto que el 14 % restante es de clima templado subhúmedo con lluvias en verano [ $C(wO)$ ]. Los promedios anuales de temperatura y precipitación son  $17.4$  °C y 526 mm, respectivamente; las alturas varían entre 1,540 y 3,050 msnm (INEGI, 2005).

La UE está integrada por 11 municipios (Figura 1), cuyos nombres y referencias oficiales (claves municipales) son: Aguascalientes (001), Asientos (002), Calvillo (003), Cosío (004), Jesús María (005), Pabellón de Arteaga (006), Rincón de Romos (007), San José de Gracia (008), Tepezalá (009), El Llano (010) y San Francisco de los Romo (011) (INEGI, 2005). Según datos oficiales (SAGARPA-SIAP, 2014), en un decenio (2004-2013) se han cultivado 166.42 kha, lo cual representa el 29.6 % del

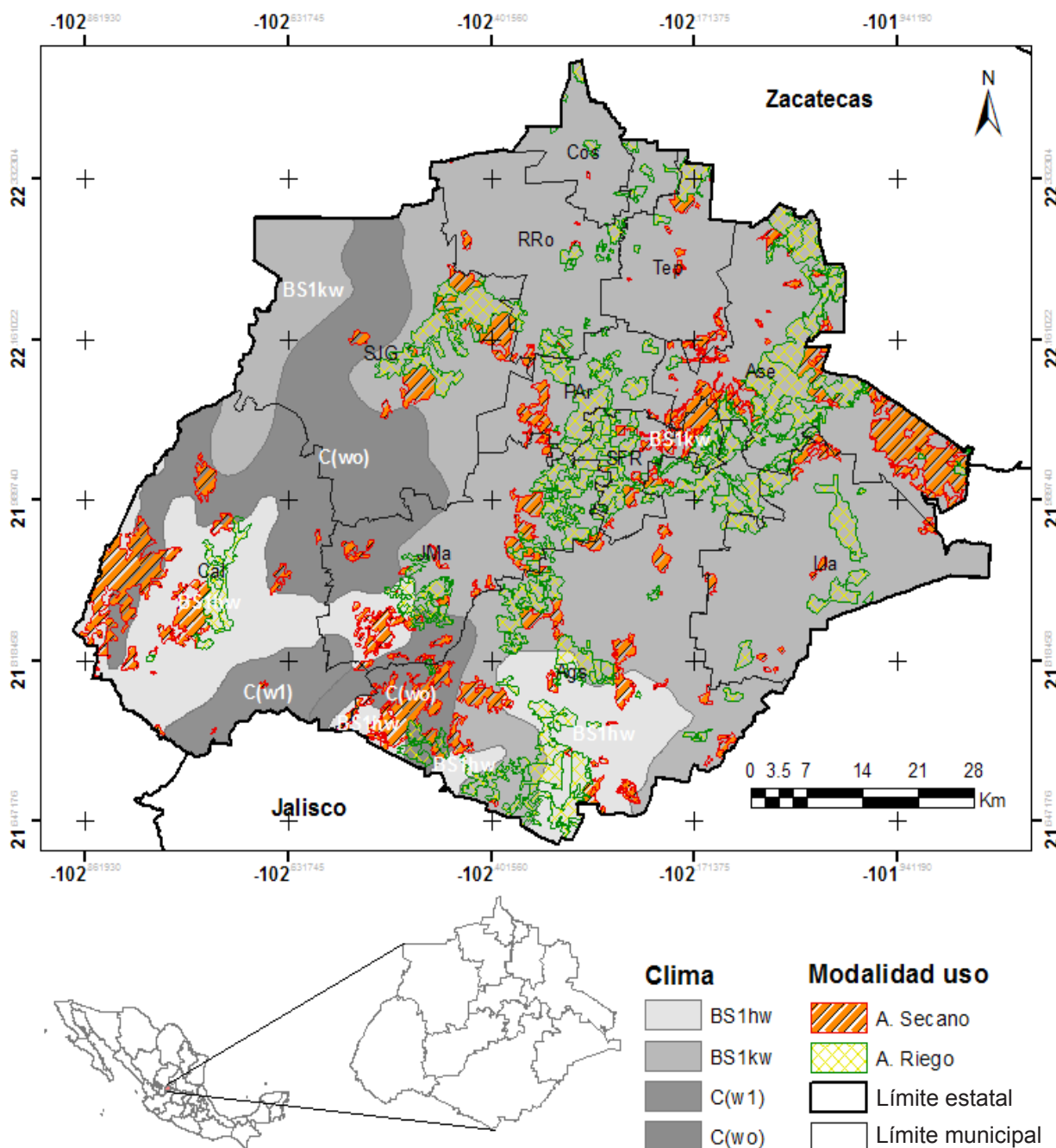


Figura 1. Localización de la UE, clima y modalidad de uso de la tierra (INEGI, 2013).

territorio estatal. La agricultura de secano se practica en el 56 % de la superficie laborable. El cultivo de mayor importancia es el maíz en sus diferentes variedades: blanco, amarillo y forrajero (GOBAGS, 2011).

#### Climatología base y escenario de cambio climático empleado

La climatología base empleada fue la propuesta por Hijmans, Parra, Jones, y Jarvis (2005), correspondiente al periodo 1950-2000, la cual por su consistencia ha sido empleada tanto en el AR4 (IPCC, 2007), como en el AR5 (IPCC, 2014); también, esa climatología base fue empleada por Conde, Estrada, Martínez, Sánchez,

y Gay (2011) en los estudios regionalizados de cambio climático en México.

El modelo HadGEM2-ES (2015-2039) se empleó para un forzamiento radiativo 8.5 (RCP8.5), incluido en la Actualización de Escenarios de CC para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional, desarrollado por el grupo de trabajo encabezado por Cavazos et al. (2013); ese modelo fue previamente descrito por Jones et al. (2011) y evaluado por Collins et al. (2011).

Los modelos HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR (Max-Plank Institute) y GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics

Laboratory) se reanalizaron a partir de las anomalías observadas y, al considerar el factor topográfico, fueron mejorados por Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, y Romero-Centeno, (2010) por escala geográfica al pasar de 55 km<sup>2</sup> a 926 m<sup>2</sup> para la Región México, Sur de los Estados Unidos de América, El Caribe y Centro América. Los modelos reanalizados están disponibles en formato txt y Geotiff. La descarga del modelo empleado se llevó a cabo en la Unidad de Informática para las Ciencias Ambientales y Atmosféricas (UNIATMOS) del Instituto de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (<http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/Docs/despliegues.html>).

### Análisis de aptitud de la agricultura de secano

El análisis de aptitud de la agricultura de secano de la UE se llevó a cabo mediante el método propuesto por la SEDESOL-INE (1998). Para ello, se utilizó el índice *PECRE* definido como el número de días durante el año con disponibilidad de agua y temperaturas favorables para el desarrollo de un cultivo. El *PECRE* está basado en la PMA histórica y para el futuro cercano 2015-20139 ( $FC_{15-39}$ ) y se expresa como:

$$PECRE = (0.24089 \times PMA) - (0.0000387 \times PMA^2) - 33.1919 \quad (1)$$

Para la evaluación de la AS actual y futura se utilizó el *PECRE* en la determinación de la extensión de maíz (*EXPEM*):

$$EXPEM = 80.3840 - (0.4126 \times PECRE) \quad (2)$$

La *EXPEM* es un índice que se correlacionó con las superficies de agricultura de secano dedicadas primordialmente al cultivo de maíz, las cuales fueron calificadas con base en lo descrito por el INIFAP (2008) y Luna (2008), quienes clasifican el potencial productivo del maíz de secano con base en dos variables bioclimáticas: promedios anuales de lluvia (PMA) y temperatura (TMA), como se indica en el Cuadro 1.

Asimismo, lo descrito por Reveles-Torres, Luna, Mejía, Hernández, y García (2014) se tomó como referencia particularmente con relación al potencial definido para la altura media sobre el nivel del mar.

### Aptitud de los suelos de la UE para uso agrícola

La definición de aptitud de los suelos de la UE se realizó a partir de los conjuntos de datos vectoriales edafológicos, Serie II del INEGI (2007) en escala 1:250,000 (F13-06, F13-09, F14-04 y F14-07). La serie fue creada mediante el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRBS, por sus siglas en inglés) (IUSS Working Group WRB, 2014). Las unidades de suelo identificadas (Edafología, Serie II) como dominantes a 0.30 m de profundidad en la UE fueron agrupadas, mediante álgebra de mapas en ArcGis 10.1<sup>\*</sup> (ESRI-Redlands, CA, USA), conforme a lo descrito en el Manual de las Buenas Prácticas del IPCC (2003), para seis Grupos de Suelo como se describe a continuación (Cuadro 2).

### Aptitud territorial de la UE por condiciones topográficas

Para determinar la aptitud por condiciones topográficas, los datos de relieve de la UE del Continuo de Elevación Mexicano (CEM 3.0) en formato raster con una resolución de 30 m se obtuvieron del INEGI (2015). Tres clases de pendiente se determinaron como se muestra a continuación (Cuadro 3).

### Distribución espacial de cambios y detección de impactos

La técnica de análisis de impacto del cambio climático se basó en la comparación de rangos ajustados en límites semejantes entre los valores del periodo base o histórico (1950-2000) y el escenario para el  $FC_{15-39}$ , de acuerdo a lo descrito por López-Santos, A., Pinto Espinoza, J., Ramírez López, E. M., & Martínez Prado, M. A. (2013). La importancia relativa de los

**Cuadro 1. Potencial para el maíz de secano definido mediante TMA y PMA.**

Rangos de PMA <sup>b</sup> Para rendimientos	Rangos de TMA <sup>a</sup> para rendimientos		
	Alto 18 a 26 °C	Medio 12 a 18 °C y 26 a 30 °C	Potencial Bajo <12 °C
Alto: 500 mm	Alto potencial	Potencial medio	Potencial medio bajo
Medio: 500-300 mm	Potencial medio	Potencial medio bajo	Bajo o nulo potencial
Bajo rendimientos:<300 mm	Bajo o nulo potencial	Bajo o nulo potencial	Bajo o nulo potencial

Fuente: <sup>a</sup>INIFAP, 2008; <sup>b</sup>Luna, 2008.

**Cuadro 2. Grupos de suelo definidos por el IPCC para determinar reservas carbono orgánico en el suelo (COS) conforme a las clasificaciones de la WRB y USDA.**

Grupos IPCC	Característica principal	Unidad suelo INEGI-WRB <sup>a</sup>	Unidad, suelo USDA <sup>b</sup>
Grupo 1. AAA	Los suelos con minerales de arcilla de alta actividad (AAA) son suelos con un nivel de desgaste entre leve y moderado, en los que predominan minerales de arcilla silicatada 2:1.	Leptosoles, Vertisoles, Kastanozems, Chernozems, Phaeozems, Luvisoles, Alisoles, Solonetz, Calcisoles, Gypsisoles, Umbrisoles, Cambisoles y Regosoles	Mollisoles, Alfisoles muy alcalinos, Aridisoles, Inceptisoles
Grupo 2. ABA	Los suelos con minerales de arcilla de baja actividad (ABA) son suelos muy desgastados en los que predominan los minerales de arcilla 1:1 y el hierro amorfo, así como los óxidos de aluminio.	Acrisoles, Lixisoles, Nitisoles, Ferralsoles, Durisoles	Ultisoles, Oxisoles, Alfisoles ácidos
Grupo 3. Arenosos	Incluye todo tipo de suelos (con independencia de su clasificación taxonómica) que contengan más de un 70 % de arena y menos de un 8 % de arcilla, con base en el análisis de textura tipificados	Arenosoles	Psammentos
Grupo 4. Espódicos	Suelos muy podzolizados	Podzoles	Espodosoles
Grupo 5. Volcánicos	Suelos derivados de cenizas volcánicas con mineralogía alofánica.	Andosoles	Andisoles
Grupo 6. Humedal	Suelos con drenaje restringido que ocasiona crecidas periódicas y condiciones anaeróbicas	Gleysoles	Subórdenes ácuicos

Fuente: IPCC, 2003; <sup>a</sup>INEGI-WRB = Correspondencia Clasificación Edafológica del INEGI, Serie II y la WRB; <sup>b</sup>USDA = Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América.

**Cuadro 3. Clasificación de la pendiente y topoformas para el análisis de aptitud por condiciones topográficas de la UE.**

Clase de pendiente	Rango	Topoforma
A	0-8 %	Valle, llanura y meseta con variación de 500 m
B	8-30 %	Lomeríos y mesetas con variación de 500 a 750 m
C	>30 %	Sierra, bajada y meseta con variación >750m

cambios para tres clases definidas (grande, mediano y pequeño) se obtuvo de la siguiente forma:

$$IR_{ci} = \frac{S_{ci} * 100}{\sum_{i=1}^n ci} \quad (3)$$

Donde  $IR_{ci}$  es el valor relativo en porcentaje de la  $i$ -ésima clase definida;  $S_{ci}$  es la superficie geoespacialmente calculada de la  $i$ -ésima clase;  $n$  es el número de clases definidas;  $\sum_{i=1}^n ci$  es la sumatoria de la superficie de cada clase ( $ci$ ), desde la 1 a la  $n$ .

### Resultados y discusión

La evaluación del impacto potencial del CC en la AS de Aguascalientes para un  $FC_{15-39}$  se basa en el análisis de las características edáficas y topográficas en las cuales se practica esta actividad actualmente. También,

la evaluación se complementa con el análisis del impacto del CC en la PMA para un  $FC_{15-39}$  considerando el modelo HadGEM2-ES, RCP8.5. Los resultados se presentan a continuación.

### Aptitud de la UE por condición edáfica para la AS

De las 23 Unidades de suelos que cubren el territorio mexicano, 10 de las más importantes están en el territorio de Aguascalientes (Xix-Ake, 2010). Conforme a la homologación edafológica de referencia (IPCC-INEGI-WRB-USDA), dos Grupos de Suelos de los seis descritos anteriormente fueron identificados (Cuadro 2).

Los suelos con arcillas de alta actividad (Grupo 1. Suelos AAA) son los de mayor presencia (Phaeozems, PH; Leptosoles, LP; Regosoles, RG; Calcisoles, CL; Luvisoles, LV; y Cambisoles, CM) cubriendo el 72 % del

territorio, mientras que el 27.2 % restante (Durisoles, DU; Kastañozems, KS; Planosoles, PL; Fluvisoles, FL), corresponde al Grupo de Suelos con arcillas de poca actividad (Grupo 2. Suelos ABA); de ambos grupos de suelos, los PH, LP y DU destacan por cubrir en conjunto una superficie equivalente al 73.7 %; aunque es importante resaltar que los dos primeros del Grupo 1 de Suelos AAA (PH y LP) suman el 54.3 % con 177.5 y 120.1 kha, respectivamente (Cuadro 4).

Además, la AS se asienta en las diez Unidades de suelos identificadas. En el Grupo 1 se detectó que los PH, LP y RG tienen amplia distribución, tanto en el Centro sur (Aguascalientes, Jesús María, San Francisco de los Romo) y Norte (Rincón de Romos y Cosío) como en los extremos Oriente (El Llano y Asientos) y Occidente (Calvillo y San José de Gracia) ocupando una superficie de 57.2 kha, lo que representa el 63.8 % del inventario edafológico; en tanto que en el Grupo 2, las Unidades DU y KS son las más sobresalientes por cubrir una superficie de 15.7 kha que representa el 22.2 % del total inventariado (Figura 2).

En el Grupo 2, de las cuatro Unidades de suelo sobresale el Durisol (DU) por su localización en la parte Centro-Oriente (Jesús María, San Francisco de los Romo, Pabellón de Arteaga, Asientos, Tepezalá, Rincón de Romos y Cosío) y en porciones del Sureste (El

Llano y Aguascalientes), a alturas desde 1,806 hasta 2,255 msnm; en esta Unidad de Suelo se localizan áreas en los municipios de Asientos, El Llano y San Francisco de los Romo; el primero con una superficie de 5.6 kha, lo que representa el 78 % de esta Unidad de Suelo (DU) donde se practica la AS (Figura 2).

#### Aptitud de la UE por condición topográfica para la AS

La AS de la UE se detectó en áreas cuyas alturas varían entre 1,800 y 2,400 msnm, en los rangos de pendientes de 0 a 8 y 8 a 30 %; el primer rango es caracterizado por presentar topofórmos de valles, llanuras y mesetas con variación de 500 m; en tanto que el segundo rango es caracterizado por la presencia de lomeríos y mesetas con variación de 500 a 750 msnm. Además, es importante destacar que la AS se localiza en la periferia del Distrito de Riego 001 (Pabellón de Arteaga), cuya superficie no supera las 12 kha, en áreas de valle con pendiente suave menor al 3 % en la cuenca del Río San Pedro, principal sistema hidrológico superficial de Aguascalientes (Figura 3).

Cabe hacer notar que en los municipios del norte del estado, Cosío y Rincón de Romos, las alturas promedio son de entre 1,900 y 2,100 msnm y presentan áreas abiertas al cultivo, según se pudo apreciar en la

**Cuadro 4. Inventario edafológico de Aguascalientes agrupado de acuerdo al IPCC (2003).**

Gpo. IPCC	Unidad de suelo	Inventario	ASUSI		IRUSE		IRGS		IRIEE	
			----- kha -----		----- % -----					
<i>Grupo 1. Suelos AAA</i>										
	Phaeozem (PH)	177.5	35.1	19.8	8.8	32.4				
	Leptosol (LP)	120.1	13.5	11.2	3.4	21.9				
	Regosol (RG)	51.7	8.6	16.7	2.2	9.4				
	Calcisol (CL)	13.1	1.7	13.4	0.4	2.4				
	Luvisol (LV)	17.0	1.4	8.5	0.4	3.1				
	Cambisol (CM)	19.1	0.8	4.1	0.2	3.5				
	Suma G 1	398.6	61.2		15.4	72.8				
<i>Grupo 2. Suelos ABA</i>										
	Durisol (DU)	106.2	7.3	6.8	4.9	19.4				
	Kastanozem (KS)	15.6	8.4	54.2	5.7	2.8				
	Planosol (PL)	23.5	5.1	21.9	3.5	4.3				
	Fluvisol (FL)	3.9	1.0	26.9	0.7	0.7				
	Suma G 2	149.2	21.9		14.7	27.2				
	Suma G1 + G2	547.7	83.1		30.0	15.2				

kha = Kilohectáreas; ASUSI = Agricultura de secano establecida en una Unidad de suelos específico del inventario; IRUSE = Importancia relativa con respecto a una Unidad de suelo específica (IRUSE = ASUSI/Inventario); IRGS = Importancia relativa con respecto a un Grupo de Suelos: G1 o G2 (IRGS = ASUSI/Suma, G1 o G2); IRIEE = Importancia relativa con respecto al inventario estatal edafológico (IRIEE = ASUSI/Suma G1+G2).

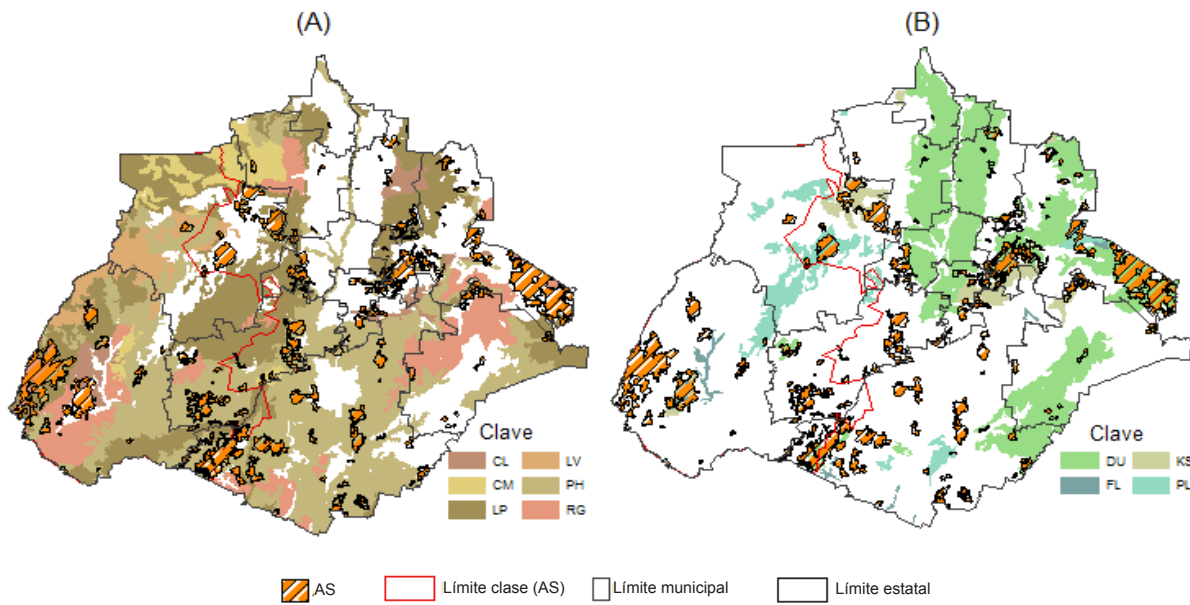


Figura 2. Distribución espacial de la agricultura de secano (AS) en las Unidades de Suelos de los Grupos 1 (A) y Grupo 2 (B) identificados en el estado de Aguascalientes.

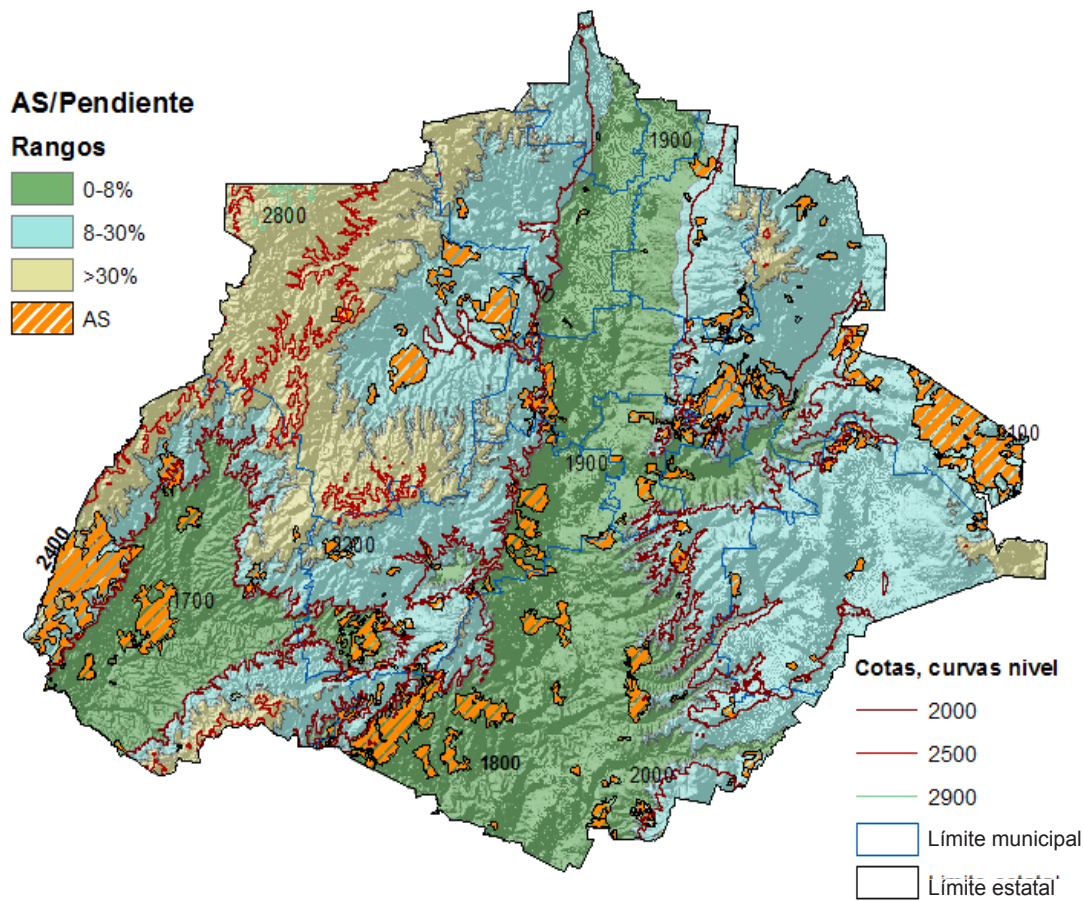


Figura 3. Relación entre la distribución espacial de la AS y rangos de pendiente.

imagen de satélite. En el inventario consultado (INEGI, 2013), las superficies detectadas con actividad reciente fueron de muy poca importancia e inapreciable en ambos municipios; esto sin duda se debe a que es la zona donde se presenta el mayor grado de aridez (Figura 3).

### Aptitud actual y cambios probables del régimen pluviométrico de la UE

La PMA es el aspecto ambiental más relevante que determina la viabilidad de la agricultura de secano, de tal manera que el estudio de su comportamiento en cuanto a magnitud y distribución ha permitido establecer características y potencialidades de aptitud territorial (INIFAP, 2008; Luna, 2008; Sánchez *et al.*, 2014; SEDESOL-INE, 1998), cuyo origen está asociado al crecimiento y emancipación de la cultura Mesoamericana (Bellon *et al.*, 2011; Carrillo-Trueba, 2009; Reveles-Torres *et al.*, 2014); por ello, el análisis de la aptitud (actual y futura) de la UE se aplica de modo específico para el maíz cultivado en condiciones de secano.

### Aptitud actual de la UE

El cultivo de maíz, dada su amplia diversidad genética (Reveles-Torres *et al.*, 2014), se siembra desde niveles del mar hasta los 3 mil metros de altura (Carrillo-Trueba, 2009), por ello se ha tratado de definir y clasificar con base en la aptitud ambiental (Criterio 1) o potencial productivo (Criterio 2); por ejemplo, en el método para el ordenamiento del territorio la SEDESOL-INE (1998) define una aptitud adecuada cuando el valor de la PMA  $\geq 720$  mm y los índices PECRE y EXPEM son  $\geq 121$  y  $\leq 30$ , respectivamente; en tanto que Luna (2008) propone tres clases de ambientes que varían entre los 720 mm y menos de 300 mm (Cuadro 5).

### Aptitud futura, cambios probables de la UE

La información analizada, tanto de los datos históricos como del  $FC_{15-39}$ , indica que la PMA en la UE podrá incrementarse en una magnitud de poco más de 96 mm, lo cual representaría una lámina de lluvia 20 %

mayor a la que se ha registrado como promedio anual del periodo definido como histórico (1950-2000); es decir, la lluvia en los rangos inferior y superior pasaría de 358 a 435 y de 617 a 733 mm, lo que representa cambios relativos de 22 y 19 %, respectivamente (Cuadro 6).

Los cambios en el régimen pluviométrico antes descrito (Cuadro 6), considerando las Clases de aptitud definidas a partir de la PMA y de los índices PECRE y EXPEM (Cuadro 5), muestran que la UE podría experimentar una afectación significativa en  $FC_{15-39}$  en cuanto a la aptitud ambiental actual estimada para las Clases C2 y C3, con superficies actuales que cubren 33 y 66 %, respectivamente, de la superficie total de la UE (Figura 4), cuya descripción es la siguiente.

La Clase 2 con una PMA entre 500-720 mm ocupa una superficie de 185 kha (33 %) en la parte Oeste de la UE, comprende a Calvillo y parte de los municipios San José de Gracia y Jesús María; la Clase 3 con una PMA entre 300 y 500 mm ocupa una superficie de 376 kha (66 %), comprendiendo el resto de los municipios de la UE (Figura 4A).

El resultado del modelo HadGEM2-ES para el *forzamiento radiativo* 8.5 en un  $FC_{15-39}$  indica que la extensión actual de las clases 2 y 3 podría tener cambios del 85 y 42 % con respecto a la superficie que cubren actualmente; es decir, mientras que la clase 2 pasa de 187 a 347 kha, representando una expansión del 85 %; la clase 3 pasa de 375 a 216 kha, disminuyendo un 42 % (Figura 4B).

Las alteraciones antes descritas en una de las variables fundamentales (disponibilidad de agua de lluvia) determinan la viabilidad de la AS pues producen una zona crítica de cambios de 155.7 kha. Ello representa poco más del 27 % de la UE en su totalidad, misma que se extiende en una franja por el Centro de la UE de Norte a Sur (Figura 4C), afectando primordialmente a los municipios San José de Gracia, justamente donde se ubica la Presa Plutarco Elías Calles (Figura 4D), parte de Jesús María y Aguascalientes en su totalidad (Figura 4E).

**Cuadro 5. Relación entre PMA e índices PECRE y EXPEM a partir de los cuales se establece aptitud y potencial para agricultura de secano.**

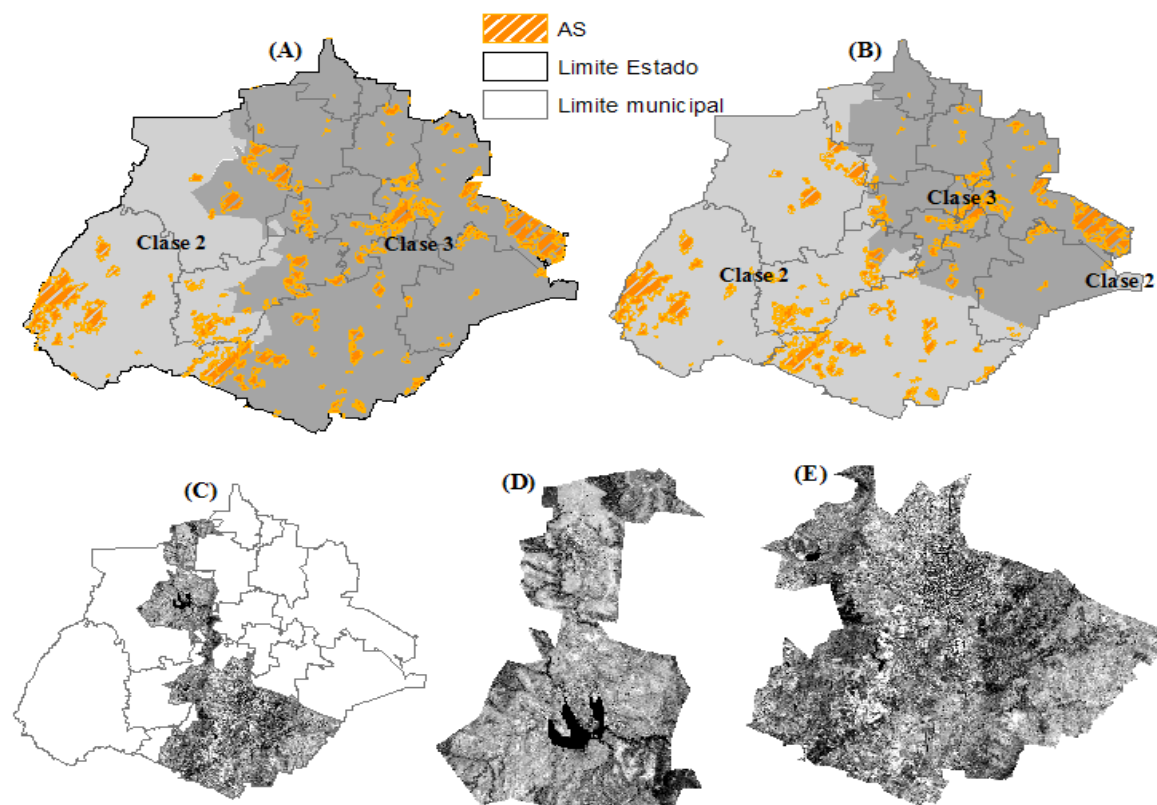
Clase	PMA mm	PECRE ----- Índice -----	EXPEM	Criterio 1	Criterio 2
C1	$\geq 720$	$\geq 121$	$\leq 30$	Apto	Muy alto
C2	500-720	78-121	30-48	No apto	Alto
C3	300-500	36-78	48-66	No apto	Medio
C4	<300	>35.5	<65.6	No apto	Bajo o nulo

Criterio 1 = SEDESOL-INE, 1998; Criterio 2 = Luna, 2008.

**Cuadro 6. Análisis del impacto del CC en la PMA para la UE.**

Rango	PMAH	PMAFC <sub>15-39</sub>	----- Impacto -----	
			CA	IR
		----- mm -----		
Inferior	358	435	77	22
Superior	617	733	116	19
Promedio	487.5	584	96.5	20

PMAH = Precipitación Media Anual Histórica; PMAFC<sub>15-39</sub> = Precipitación Media Anual para el Escenario Futuro 2015-20139; Ca = Cambio Absoluto; IR = Importancia Relativa.



**Figura 4. Distribución espacial de las dos Clases de aptitud territorial actual (A), futura (B) y definición de la zona crítica de cambios (C) e imagen de satélite SPOT de la porción Norte (D) y Sur (E) de la UE.**

### **Análisis del impacto futuro en la AS de maíz de la UE**

#### **Importancia del cultivo de maíz de secano**

La superficie agrícola en México es de 21,000 kha (10.5 % del territorio nacional) de las cuales 14,500 kha (69 %) son dedicadas a la AS, donde el cultivo de maíz grano ocupó un promedio de 6,957 kha ( $\pm 12$  %) en un lapso de 32 años (1980-2012) y representó el 48 % de dicha superficie (AS) (SAGARPA - SIAP, 2014), convirtiéndolo en el principal cultivo cíclico del país (Guzmán, De la Garza, González & Hernández, 2014; INEGI, 2012);

en estas áreas de AS viven 23 millones de personas (Sánchez et al., 2014). En ese mismo periodo, la UE abarcó 61 kha promedio con el mismo cultivo (maíz), lo que representó el 0.4 % del total nacional (SAGARPA-SIAP, 2014); a nivel nacional, el rendimiento promedio es de 300 kg·ha<sup>-1</sup> con máximos de hasta 900 kg·ha<sup>-1</sup> (AgroDer, 2012).

#### **Sensibilidad de la AS en la UE**

La historia reciente (2004-2013) de producción de maíz de secano en la UE indica que hubo impactos importantes ya que de las 93 kha establecidas en promedio anual.

Uno de cada dos años presentó siniestralidad mayor al 30 %, debido a la variabilidad recurrente de la PMA que fue registrada por la Red Nacional de Estaciones Agroclimáticas del INIFAP (2014), destacando los años 2005, 2009 y 2011. Este último con mucho menos lluvia que generó una siniestralidad que afectó al 96 % de la superficie total establecida (Figura 5).

El comportamiento de la siniestralidad descrita (Figura 5) es consistente con lo reportado por Luna y Gutiérrez (2000) para la Región Centro Norte de México, quienes incluyeron en su estudio específicamente al estado de Aguascalientes.

El maíz es una especie de tipo fotosintético C4, de gran plasticidad genética, por lo que está adaptada a crecer en regiones tropicales, subtropicales y templadas (Bellon et al., 2011; Carrillo-Trueba, 2009; Reveles-Torres et al., 2014; Tinoco-Rueda, Gómez-Díaz, & Monterroso-Rivas, 2011). Los valores críticos mínimos de temperatura y precipitación establecidos (INIFAP, 2008; Luna, 2008; Ortiz-Solorio, 1987) son 12 °C y 300 mm, respectivamente (Cuadro 1). Sin embargo, los mejores resultados del cultivo se logran cuando la PMA está en un rango de 700 a 1,100 mm anuales (INIFAP, 2005; Ruíz, 1998).

Por ejemplo, Ruíz (1998) menciona que, en los Valles Centrales de Oaxaca, los mejores rendimientos de maíz (>1,500 kg) se dan en los lugares donde se combina un buen régimen de lluvia ( $\geq 700$  mm), suelos de profundidad adecuada y buena retención de

humedad (definida por el tipo textural) y pendientes suaves. Ruíz (1998) menciona también que los menores rendimientos se obtuvieron en áreas con suelos someros ubicados en condición de lomerío e identificados como Litosoles que pertenece al Grupo Leptosoles de la Serie II de la WRBS antes descrita (Cuadro 2).

Por condición de humedad, para este mismo cultivo, se identifican cuatro periodos críticos: 1) la siembra, 2) germinación de la semilla, 3) las primeras tres semanas de desarrollo, y 4) el periodo comprendido entre 15 días antes y de 30 días después de la floración. Además, desde los 30 días después de la floración o cuando la hoja de la mazorca se seca, el cultivo no debería recibir más agua (INIFAP, 2005; Luna & Gutiérrez, 2000).

Por otro lado, el maíz prospera mejor en suelos franco-limosos, franco-arcillosos y franco-arcillo-limosos con buen drenaje, pH entre 5.5 y 7.5 y salinidad no mayor a 7 dS·m<sup>-1</sup>. Además, las raíces pueden tener una longitud de 2 m en suelos profundos; normalmente, el 100 % del agua absorbida proviene de una profundidad de 1 a 1.7 m (INIFAP, 2005; Luna & Gutiérrez, 2000).

Por último, es importante mencionar que los Phaeozem (pH) son suelos en los que está establecida la mayor superficie de secano en la UE (Cuadro 4), debido a su fertilidad natural -incluso más que los Chernozem y Kastañozem- aunque también se reporta que presentan ausencia de carbonatos y gran susceptibilidad a la lixiviación y erosión (IUSS

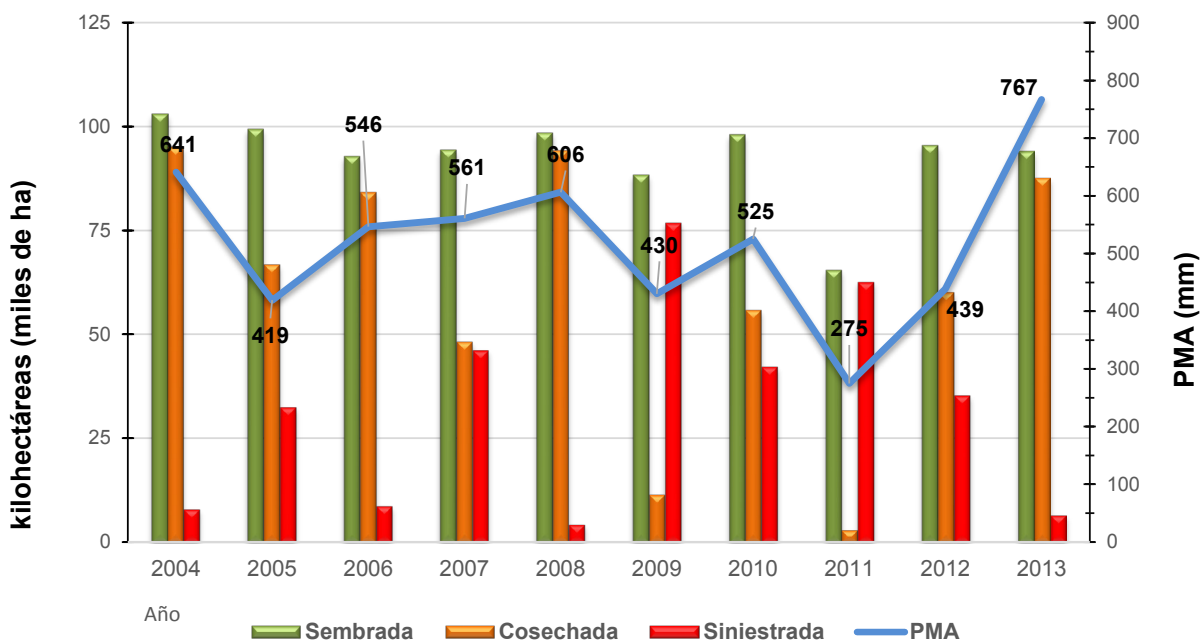


Figura 5. Superficie de secano anual sembrada, cosechada y siniestrada y su relación con la PMA del 2004 al 2013 en Aguascalientes.

Working Group WRB, 2014); de manera que los pH requieren prácticas regulares de manejo adecuadas como son incorporación de residuos de cosecha, laboreo mecánico acorde a la pendiente del terreno y control del pH, entre otros (Verhulst et al., 2011).

## Conclusiones

En la actualidad, las dos Clases de Secano definidas, C2 y C3, para la UE presentan características asociadas a un régimen pluviométrico, según el modelo HadGEM2-ES para un forzamiento radiativo 8.5, que podría constar de incrementos en una magnitud equivalente al 20 % de la PMA para el futuro cercano al 2039. Este incremento en la precipitación media anual, no necesariamente garantiza que se pueda manifestar un impacto positivo en la productividad del cultivo de maíz, ya que hay factores asociados a las condiciones edáficas y topográficas que determinan el éxito del mismo y las condiciones en las cuales se dan mejores rendimientos. Asimismo, los otros usos actuales del suelo, así como la distribución y tipo de tenencia, tanto la privada como la social deberían ser considerados. Ello representa un conflicto ante un cambio o ampliación hipotéticos de la frontera de la agricultura de secano.

## Referencias

- AgroDer. (2012). Producción de Maíz, México, 2010. Comparativo Estatal, modalidad de secano y riego. Recuperado Enero 1, 2015, de [http://www.agroder.com/Documentos/Publicaciones/Produccion\\_de\\_Maiz\\_en\\_Mexico-AgroDer\\_2012.pdf](http://www.agroder.com/Documentos/Publicaciones/Produccion_de_Maiz_en_Mexico-AgroDer_2012.pdf).
- Bellon, M. R., Hodson, D., & Hellin, J. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(33), 13432–13437. doi:10.1073/pnas.1103373108.
- Carrillo-Trueba, C. (2009). El origen del maíz. Naturaleza y cultura en Mesoamérica. *Ciencias*, 92-93, 4–13.
- Cavazos, T., Salinas, J. A., Martínez, B., Colorado, G., Grau, P. de, González, R. P., & Bravo, M. E. (2013). *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe Final del Proyecto*. Recuperado de <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., & Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 1051–1075. doi:10.5194/gmd-4-1051-2011.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O., & Gay, C. (2011). Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera*, 24(1), 125–140. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-62362011000100009&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-62362011000100009&script=sci_arttext&tlng=pt).
- Conde, C., Liverman, D., Flores, M., Ferrer, R., Araújo, R., Betancourt, E., & Gay, C. (1997). Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Climate Research*, 9, 17–23. doi:10.3354/cr009017.
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., & Romero-Centeno, R. (2010). Atlas climático digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Available online: <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml>.
- GOBAGS (Gobierno de Aguascalientes). (2011). *Desarrollo Económico. Programa Sectorial 2010 - 2016*. Recuperado de [http://www.aguascalientes.gob.mx/transparencia/informacion/PROGRAMAS/Sector\\_Desarrollo.pdf](http://www.aguascalientes.gob.mx/transparencia/informacion/PROGRAMAS/Sector_Desarrollo.pdf).
- Guzmán, E. S., De la Garza, M. T. C., González, J. P. F., & Hernández, J. M. (2014). Análisis de los costos de producción de maíz en la Región Bajío de Guanajuato. *Análisis Económico*, 29(70), 145–156. Recuperado de <http://www.analiseconomico.com.mx/pdf/7008.pdf>.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. doi:10.1002/joc.1276.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005). *Anuario Estadístico Aguascalientes. Edición 2005*. Recuperado de <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/ae05/info/ags/imapas.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). Conjuntos de datos vectoriales edafológicos de la Serie II, escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2012). *El sector alimentario en México 2012. Serie estadísticas sectoriales. Número 26*. Recuperado de [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/SAM/2012/sam2012.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/SAM/2012/sam2012.pdf).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). Conjunto de datos vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación del Estado de Aguascalientes en escala 1:50,000.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2005). *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. Recuperado de <http://www.inifapcirpac.gob.mx/PotencialProductivo/Jalisco/AltosNorte/RegionAltosNorteReqAgroecologicos.pdf>.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2008). *Requerimientos agroecológicos del maíz (Zea mays L.) ciclo primavera-verano bajo condiciones de secano en México*. Recuperado de <http://www.agromapas.inifap.gob.mx/potencialproductivo/requerimientos/requerimientomaizpvtemporal.html>.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2014). Red de Estaciones

- Meteorológicas. Recuperado de <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2003). *Intergovernmental Panel on Climate Change Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. (K. T. and F. W. Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara & IPCC, Eds.). Recuperado de the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC ©.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. (R. K. Pachauri & A. Reisinger, Eds.) *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza. Recuperado de [http://ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/contents.html](http://ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *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*. (R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC. Recuperado de [http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf).
- IUSS Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014. World Soil Resources Reports*. Rome: FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf>.
- Jean-François B., N. Berrahmouni, A. Grainger, D. Maniatis, D. Mollicone, R. Moore, Ch. Patriarca. (2017). The extent of forest in dryland biomes. *Science* 356(may): 635-638. doi: 10.1126/science.aam6527
- Jones, C. D., Hughes, J. K., Bellouin, N., Hardiman, S. C., Jones, G. S., Knight, J., & Zerroukat, M. (2011). The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development Discussions*, 4(1), 689–763. doi:10.5194/gmdd-4-689-2011.
- López-Santos, A., & Martínez-Santiago, S. (2015). Use of two indicators for the socio-environmental risk analysis of Northern Mexico under three climate change scenarios. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(4), 331–345. doi:10.1007/s11869-014-0286-3.
- López-Santos, A., Pinto Espinoza, J., Ramírez López, E. M., & Martínez Prado, M. A. (2013). Modeling the potential impact of climate change in northern Mexico using two environmental indicators. *Atmósfera*, 26(4), 479–498.
- Luna, F. M. (2008). *El cultivo del maíz en Zacatecas* (Primera Ed.). Zacatecas, México: Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Luna, F. M., & Gutiérrez, S. J. R. (2000). Investigación fisiotécnica de maíz de temporal en la Región Alta del norte de México. *Revista Fitotécnica Mexicana*, 23(2), 195-209.
- Magaña, V. (2013). *Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático*. México, D.F. Recuperado de [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012\\_estudio\\_cc\\_vyagef3.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012_estudio_cc_vyagef3.pdf).
- Monterroso, A. I., Conde, C., Rosales, G., Gómez, J. D., & Gay, C. (2011). Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios in México. *Atmosfera*, 24(1), 53–67.
- Ortiz-Solorio, C. A. (1987). *Elementos agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana* (Tercera Ed.). Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo.
- Reed, M. S., & Stringer, L. C. (2015). *Impulse Report. Climate change and desertification: Anticipating, assessing & adapting to future change in drylands*. Cancún, México. Recuperado de [http://www.unccd.int/en/programmes/Science/Conferences/Documents/3sc\\_unccd\\_impulse-report.pdf](http://www.unccd.int/en/programmes/Science/Conferences/Documents/3sc_unccd_impulse-report.pdf).
- Revels-Torres, L. R., Luna, M. F., Mejía, A. G., Hernández, J. M., & García, S. H. (2014). Razas actuales de maíz de secano en el estado de Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(7), 1155 – 1168. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/2631/263131533002.pdf>.
- Ruiz, J. V. (1998). Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los valles centrales de Oaxaca. I. Determinación del potencial productivo. *Terra Latinoamericana*, 16(3), 269–275. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57316310>.
- Sánchez, I. C., Esquivel, G. A., Velasquez, M. A. V., Inzunza, M. A. I., Muñoz, A. V., & Bueno, P. H. (2014). Climate based risk assessment for maize producing areas in rainfed agriculture in Mexico. *Journal of Water Resource and Protection*, 6(13), 1228–1237. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.613112>.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Sistema Agroalimentaria y Pesquera (SAGARPA-SIAP). (2014). El Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). Periodo 1980-2013. *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación - Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Recuperado Enero 1, 2014, de <http://www.siap.gob.mx/optestadisticasiacon2012/parcialsiacn-zip/>.
- Secretaría de Desarrollo Social-Instituto Nacional de Ecología (SEDESOL-INE). (1998). *Ordenamiento Ecológico del Territorio. Memoria Técnica y Metodológica*.
- Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (SEMARNAT-INECC). (2012). *México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Mexico, D.F. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/685.pdf>.
- Tinoco-Rueda, J. A., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2011). Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 161-168. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321257006>.

- United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). (2013). *Aspectos económicos de la desertificación, la degradación de las tierras y la sequía: Metodologías y análisis para la toma de decisiones. 2da conferencia científica de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación - CNULD*. United Nations Convention to Combat Desertification.
- Verhulst, N., Nelissen, V., Jespers, N., Haven, H., Sayre, K. D., Raes, D., Govaerts, B. (2011). Soil water content, maize yield and its stability as affected by tillage and crop residue management in rainfed semi-arid highlands. *Plant and Soil*, 344(1), 73-85.
- Xix-Ake, G. R. (2010). *Estado Actual y Futuro de la Cartografía de Suelos en México*. Recuperado de [http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/LatinAmerica\\_AtlasMeeting2010/08Sep/9\\_Mexico.pdf](http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/LatinAmerica_AtlasMeeting2010/08Sep/9_Mexico.pdf)