

Predicción y diversificación de cultivos para Nuevo León, México

Gustavo Andrés Ramírez-Gómez¹
Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena^{1§}
Carlos Alberto Ortiz-Solorio²
Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena²

¹Facultad de Agronomía-Universidad Autónoma de Nuevo León. Francisco I. Madero s/n, ex-hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. CP. 66050. (gustavormz440@gmail.com). ²Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillos, Estado México, México. CP. 56230. (ortiz@colpos.mx; castor@colpos.mx).

§Autor para correspondencia: edgar.gutierrezcs@uanl.edu.mx.

Resumen

Los factores involucrados en la predicción de zonas para la producción de alimentos están sujetos a variables culturales, socio-económicas, a la disponibilidad hídrica y a características particulares de su manejo y producción. La agricultura como actividad micro empresarial está sujeta a riesgos que obligan a mejorar mecanismos predictivos de variables climáticas y edáficas. El objetivo principal es generar modelos a partir de diversas bases de datos, y mapas temáticos a una misma escala de observación para ubicar zonas con potencial productivo de 16 cultivos con valor económico en el mercado nacional y estratégico para el estado de Nuevo León. Este estado se seleccionó por pertenecer a tres regiones fisiográficas con gran diversidad edafoclimática, lo que requiere de métodos probados tanto a nivel nacional (Ortiz, 2011) como internacional para su zonificación. Diferentes bases de datos como de aptitud en términos de eficiencias térmicas, período libre de heladas y clasificación, degradación y régimen hídrico de los suelos fueron utilizados. Los resultados muestran que con la información recabada y analizada se pueden ubicar y cuantificar las áreas sobre mapas para granos básicos, hortalizas y frutales en más de 50% de la superficie agrícola estatal y otros cultivos en áreas menores a 10%. La mejor zona agrícola se localiza en la zona centro norte del estado; sin embargo, el factor determinante para el crecimiento de los principales cultivos es el periodo libre de heladas. Se recomienda cultivar variedades tempranas de granos básicos y hortalizas para aprovechar los meses con mayores eficiencias.

Palabras clave: aptitud de cultivos, clasificación, degradación de suelos, eficiencia térmica, rendimiento.

Recibido: abril de 2020

Aceptado: julio de 2020

Introducción

Ante la creciente preocupación al cambio climático, incremento demográfico, limitaciones socioeconómicas y migratorias es necesario efectuar estudios predictivos de una región con respecto al rendimiento potencial agrícola; además, es de primordial importancia implementar estrategias y técnicas metodológicas que permitan ubicar áreas destinadas a la producción intensiva agrícola sostenible.

Más aún, se debe de contemplar no sólo los cultivos que sean económicamente viables con valor comercial en los mercados, sino también encontrar otros cultivos que se puedan incorporar para incrementar su diversidad y sostenibilidad agroecológica (Hansen, 2004; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). Johnson *et al.* (2016) indican que las proyecciones tempranas y fiables del rendimiento de los cultivos en grandes áreas permiten a autoridades y productores la planificación de exportaciones e importaciones en beneficio de las zonas rurales.

De acuerdo con Valin *et al.* (2014), la producción de alimentos está subordinada a variables dependientes e independientes que implican al comportamiento del mercado interno y externo de una región y a elementos socioeconómicos de la población. El factor meteorológico es el que más influye en la producción en sistemas de agricultura a cielo abierto (Cai *et al.*, 2016) y se estima que esté cambiando más debido al cambio climático. De hecho, las predicciones no son nada alentadoras, ya que se proyecta un incremento de 60% para el año 2050 en la producción agrícola y entre 20% y 30% en la pecuaria (Tilman *et al.*, 2011). En consecuencia, se requiere de estrategias e investigaciones en ciencia aplicada para incrementar la certeza sobre la producción de alimentos en el campo (FAO, 1978), como una primera alternativa y estudios preliminares de áreas potencialmente agrícolas que proyecten la sostenibilidad y diversificación de cultivos (van Ittersum *et al.*, 2013).

Los modelos de simulación de cultivos ofrecen resultados robustos para la estimación y predicción del rendimiento potencial (van Ittersum *et al.*, 2013) con la virtud de que se pueden proyectar y limitar áreas aptas y no aptas para la producción de alimento. Sin embargo, estas proyecciones de rendimientos están definidos únicamente por su capacidad biofísica y no por el estrés biótico y abiótico (de Wit, 1965). Por ello, la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 1978) propuso la zonificación agroecológica (ZAE), al ser una metodología que utiliza bases de datos climáticos e información de suelos para delimitar zonas, regiones o incluso todo el país con mayor con mayor potencial agronómico y socioeconómico.

En el caso del estado Nuevo León, como cualquier otra entidad federativa, es necesario localizar áreas potencialmente productivas con posibilidad de diversificación y sin limitaciones climáticas (heladas). Por lo cual, es necesario generar sistemas de modelación que garanticen información de tierras con posibilidad de pasar de un sistema de monocultivo (primavera-verano) como: papa, tomate y pastos (SIAP, 2018), a un sistema de rotación de cultivos en dos ciclos. Fraisse *et al.* (2006)- mencionan que el análisis de datos climáticos y edáficos ofrece una alternativa para grandes extensiones territoriales con influencia directa al potencial de los cultivos. Aunque se debe tener precaución en el manejo de la variación escalar (Grassini *et al.*, 2015) e interpolación geoespacial reflejada en la calidad digital de los mapas temáticos (Van Wart *et al.*, 2015) de cada región.

Con base en lo anterior, los objetivos de la presente investigación fueron: 1) generar modelos a partir de diversas bases de datos, y mapas temáticos a una misma escala de observación; 2) identificar y localizar áreas potencialmente agrícolas con posibilidad de implementar la producción intensiva de alimentos durante todo el año agrícola; y 3) incentivar la diversidad y planeación de las zonas agrícolas destinadas a la producción de alimentos con interés económico.

Materiales y métodos

La secuencia metodológica e integración de modelos predictivos consiste en: 1) vectorización digital de las áreas agrícolas bajo la plataforma Google Earth Pro[®]; 2) uso de bases de datos climáticos, edáficos y requerimientos del cultivo; 3) interpolación de resultados sobre mapas temáticos; 4) extracción de polígonos de áreas agrícolas a través de álgebra de mapas; y 5) integración de bases de datos del rendimiento potencial con mapas temáticos de áreas agrícolas.

Ubicación

El presente estudio se realizó en el estado de Nuevo León, México, el cual se ubica entre las coordenadas 23° 10' 27" y 27° 46' 06" de latitud norte y 98° 26' 24" y 101° 13' 55" longitud oeste, con una superficie de 6 455 500 ha.

Delimitación de la zona de estudio

La digitalización del estado consistió en delimitar primero la entidad federativa y municipios de Nuevo León mediante máscaras vectoriales en formato shape file, tomando como referencia el estudio realizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Colegio de Postgraduados (CP) (2001-2002). Se identificaron zonas con potencial agrícola con interacción y visualización directa sobre la pantalla en la plataforma digital de Google Earth Pro[®].

Las imágenes satelitales con una altura de vuelo (altura ojo) de Google Earth Pro[®] de 2.19 km se fotointerpretaron para cartografiar a escala promedio de 1:50 000, además, se utilizaron métodos de interpretación asociativa considerando elementos tanto en campo como en gabinete para generar las facetas agrícolas (Ortíz-Solorio y Cuanalo de la Cerda, 1984).

Bases de datos y mapas temáticos

La base de datos con información climática del estado fue extraída del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) mediante las normales climatológicas de estaciones climáticas (1951-2010). 83 estaciones climáticas, ubicadas geoespacialmente, fueron consideradas dentro de la entidad, y 24 en los estados colindantes, como sigue: 10 en Coahuila, 5 en San Luis Potosí y 9 en Tamaulipas con un total de 107 estaciones, para su análisis (Figura 1).

Otra base de datos utilizada fue la plataforma de ECOCROP (2007) la cual está integrada con información climática y edáfica de los requerimientos y necesidades de los cultivos. En esta base se extrajeron datos de cultivos económicamente viables para la entidad federativa como: a) tipo y ciclo agrícola; b) necesidades de temperatura (máximas y mínimas) y precipitación anual; y c) requerimientos edáficos de: profundidad, textura, salinidad, pH y drenaje del perfil.

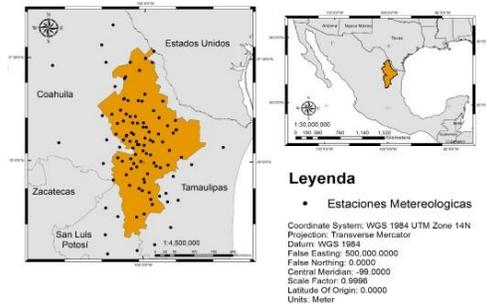


Figura 1. Distribución geoespacial de las estaciones meteorológicas.

En relación con el recurso edáfico, los mapas temáticos empleados fueron: a) los generados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática a escala 1:1 000 000 (INEGI, 2005) empleando la clasificación de suelos de la base referencial mundial (WRB, 2015); b) mapas de degradación dominante del suelo causada por el hombre en la República Mexicana a escala 1:250 000 (SEMARNAT-CP, 2001-2002); y c) los mapas de regímenes de humedad y temperatura del suelo del elaborado por de Sánchez *et al.* (2009).

Recorridos y verificación en campo de zonas agrícolas

Los recorridos de campo se efectuaron en transectos de norte a sur y de este a oeste sobre carreteras y se consideró el acceso directo a los puntos seleccionados, que fueron utilizados como puntos de verificación y corrección (Figura 2).

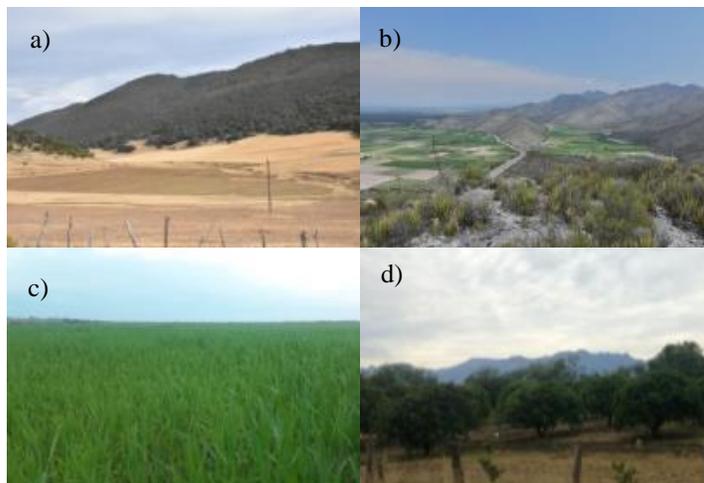


Figura 2. Recorridos en municipios (proyección en UTM). a) Galeana (2737650, 394916); b) Aramberri (2669386, 393500); c) Anáhuac (3015776, 386979); y d) Linares (2752594, 437753).

Diversificación de cultivos

La diversificación de cultivos en la zona bajo estudio consistió en seleccionar cultivos de diferentes especies con base en su eficiencia climática tanto para el ciclo de primavera-verano como para el ciclo otoño-invierno, estimando sus rendimientos máximos por unidad de superficie en regiones específicas del estado.

Rendimiento potencial

El rendimiento potencial de cada cultivo fue estimado con la metodología establecida de las zonas agroecológicas (GAEZ, 2006) basada en los trabajos de Wit (1965). También se utilizaron las modificaciones propuestas por Ortiz (2011), para estimar el peso fresco a partir del peso seco propuesto por el modelo agroecológico en hortalizas y frutales y la radiación fotosintéticamente activa en días muy claros, tasa de fotosíntesis bruta diaria en días cerrados y tasa de fotosíntesis bruta diaria en días despejados.

Índice y eficiencia térmica potencial de cultivos

Para estimar el índice y la eficiencia térmica de cada cultivo se empleó la metodología de Neild y Boshell (1976) para los principales cultivos en el estado de Nuevo León, a partir de temperaturas máximas y mínimas mensuales reportadas en las normales climáticas. Posteriormente, los índices fueron valorizadas mediante tablas de calificaciones que van desde el ‘cero’ como mínima hasta ‘cinco’ como valor máximo térmico mensual para cada cultivo y región en el estado.

Periodo libre de heladas

El periodo libre de heladas (PLH), que corresponde a días acumulativos secuenciales que no presentaron dicho evento durante todo el año empleando, fue determinado utilizando la metodología propuesta por Ortíz y Pájaro (1985). El PLH utiliza para su predicción información de temperatura mínima y media mensual promedio, la cual fue obtenida a partir de las normales climatológicas (SMN, 2018).

Sistema de clasificación de suelos con la base referencial mundial (WRB, 2015)

El sistema de clasificación de suelos se basa en criterios de diagnóstico para uno o varios horizontes y subhorizontes, que se presentan en los grupos de referencia de suelos, los cuales están reportados en los mapas temáticos de las cartas edafológicas producidas por INEGI (2005). Cada grupo de referencia, con varios horizontes de diagnóstico asignados jerárquicamente, fueron adaptados a valores cuantitativos de ‘-1’, ‘0’ y ‘1’ correspondientes a una aptitud baja, aptitud media y aptitud alta respectivamente, tanto para agricultura de secano como bajo riego.

Régimen de humedad de los suelos

La valorización de la eficiencia de los suelos por el tipo de régimen de humedad es considerada por la cantidad de agua y el tiempo que permanece consecutivamente húmeda la sección de control (Ortíz *et al.*, 2014). El mapa temático de régimen de humedad fue estimado con base al modelo de Newhall reportados por Sánchez *et al.* (2009). Este modelo utiliza la temperatura y precipitación de cada estación climática y el proceso de asignación fue siguiente: régimen arídico y ácuico: aptitud baja (valor de ‘-1’), debido a la ausencia o anegamiento de la sección de control, al régimen ústico, aptitud media (valor ‘0’) a causa de reportar condiciones favorables para el crecimiento de las plantas con limitantes hídricas y el régimen údicos: aptitud alta (valor ‘1’), al presentar humedad acumulada durante 90 días consecutivos en años normales o ser irrigados.

Resultados y discusión

Con la vectorización digital del estado sobre la plataforma de Google Earth Pro® se ubicó la distribución geoespacial de áreas exclusivamente agrícolas (17.03% de la superficie total, 1 099 372 has) empleada en la zonificación estatal. A continuación, se analizan cada una de las bases de datos edafoclimáticas que permitieron estimar el potencial productivo de la zona agrícola del estado de Nuevo León.

El municipio de Allende, NL se seleccionó para ejemplificar los resultados. Esta posee un área agrícola de 44 676 ha, donde se reportan temperatura anuales máximas, mínimas y medias de 28 °C, 13.2 °C y 20.5 °C respectivamente; con una precipitación media anual de 933 mm, una aptitud edáfica para el cultivo de la papa: Alta ubicado en la zona sur de la superficie agrícola (51%), media en el norte-centro (44%) y baja en la zona norte (5%). También se encontró que la zona puede tener una aptitud: alta para el sorgo en 100% del área. Los suelos que dominan en esta zona son Vertisols (72% del área agrícola) localizados en el norte y centro con la subunidad pélica, Leptosol (7%) y Phaeozems (21%) en el centro con la subunidad haplicas.

El régimen de humedad es údico que cubre 95% zona centro y sur, junto con el ústico con 5% en la zona norte. La zona tiene dos periodos libres de heladas entre los meses de febrero y noviembre en la zona sur con una superficie de 7% y de febrero a diciembre en la zona norte y centro con una superficie de 93%. Esta información se concentra en cada uno de los mapas de los cultivos para determinar la aptitud y el rendimiento en las zonas agrícola.

Índice y eficiencia térmica

En el Cuadro 1 se reporta las calificaciones para las temperaturas máximas y mínimas para el cultivo de papa, en donde 5 significa las condiciones óptimas para el desarrollo de este cultivo.

Cuadro 1. Calificación de temperaturas máximas y mínimas mensuales (Neild y Boshell, 1976) para cultivo de papa (cinco meses), en el municipio de Allende, NL, con base en los requerimientos óptimos establecidos por ECOCROP.

Papa (cinco meses)					
Temperatura máxima (°C)		Calificación	Temperatura mínima (°C)		
	33	0		19	
31	32.9	1	18		18.9
29	30.9	2	17		17.9
27	28.9	4	16		16.9
24	25	(óptima) 5 (máxima)	14	15	15.9
22	23.9	4	13		13.9
19	21.9	3	12		12.9
16	18.9	2	9		11.9
13	15.9	1		8.9	
	12.9	0		<8.9	

En el Cuadro 2 se indica el procedimiento para el cálculo del Índice térmico mensual y de la eficiencia térmica potencial para todo el ciclo del cultivo de papa de cinco meses. Por ejemplificar, en el mes de enero se reportó una temperatura máxima y una mínima mensual promedio de 20.6 °C y 5.1 °C respectivamente, dichos valores se ubican entre los intervalos de <21.9 °C y <8.9 °C (Cuadro 1), que corresponden a calificación acumulada de 3 (3 + 0).

Cuadro 2. Índice mensual y eficiencia térmica del cultivo de papa (estación Allende, NL).

Papa/mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Tmáx	20.6	23.2	27.8	31.7	35.1	37.6	38.3	38.1	35.3	30.9	25.7	21.8
Tmín	5.1	7	10.3	13.9	17.5	20.2	20.6	20.5	18.5	14.5	9.5	5.7
C(Tmáx)	3	4	4	1	0	0	0	0	0	2	5	3
C(Tmín)	0	0	2	4	2	0	0	0	1	5	2	0
IT	3	4]	6	5	2	0	0	0	1	[7	7	3

Tmáx= temperatura máxima; Tmín= temperatura mínima; C (Tmáx)= calificación de Tmáx; C (Tmín)= calificación de Tmín; IT= índice térmico (meses con máximos valores). ET= eficiencia térmica.

El valor estimado máximo acumulado del índice térmico parte de la sumatoria de calificadores individuales de temperatura máxima y mínima mensual, llegando hasta un total de 10 (Cuadro 1). La sumatoria mensual consecutiva teórica es de 50 y correspondiente a cinco meses del ciclo agrícola, en este caso de la papa. La Ecuación 1 ejemplifica la eficiencia térmica para el cultivo de la papa para todo el ciclo, donde la sumatoria de los índices térmicos mensuales continuos (7+7+3+3+4) es dividido por la calificación máxima teórica multiplicada por el número de meses (10 × 5) del cultivo, y su resultado a su vez es multiplicado por 100 para obtener el porcentaje del ciclo agrícola. $ET_{papa} = \frac{7+7+3+3+4}{5 \times 10} \times 100 = \frac{24}{50} \times 100 = 48$; donde: ET_{papa} = eficiencia térmica para el cultivo de papa de cinco meses.

La diversificación de cultivos para el municipio de Allende, NL se muestra en los Cuadros 3 y 4. Las rotaciones que se pueden hacer en este municipio en el mismo ciclo agrícola sin interferencia en su manejo agronómico son: el cultivo de papa para el ciclo otoño-invierno y sorgo en primavera-verano, debido a que el sorgo tiene una aptitud alta (77.54%) y se puede cultivar sin ningún riesgo los meses entre mayo y agosto (siembra-cosecha).

Cuadro 3. Índice y eficiencia térmica para el cultivo de sorgo con un ciclo de cuatro meses.

	Sorgo de cuatro meses												
C(T máx)	0	1	2	3	5	4	4	4	4	5	3	1	0
C(T mín)	0	0	0	0	2	4	4	4	4	2	0	0	0
IT= C(Tmáx)+C(Tmín)	0	1	2	3	[7	8	8	8]	7	3	1	0	

Cuadro 4. Rotación papa-sorgo para el área de influencia de la estación Allende por mes.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Papa]				[Sorgo]		[Papa		

En el Cuadro 5 se indican las eficiencias térmicas estimadas para cada cultivo en todo el estado de Nuevo León. Los cultivos de frijol de 2 meses, cebolla de 3 meses y toronja obtienen los valores de aptitud más altos en 51%, 51% y 41% respectivamente del área agrícola. Además, en este cuadro se reporta el porcentaje del área estatal que deben establecerse durante los meses con mayor eficiencia térmica. En ese sentido, el cultivo de papa de cinco meses puede cubrir 82.2% de la superficie durante los meses de octubre, noviembre y diciembre; mientras que el cultivo de sorgo puede cubrir hasta el 80.4% si se siembra en el mes de mayo. En la Figura 3 localiza cartográficamente las superficies agrícolas con mayor potencial agrícolas en la rotación papa-sorgo.

Cuadro 5. Porcentaje de área agrícola estatal respecto a la aptitud de los cultivos.

Granos	Baja	Media	Alta	Hortalizas	Baja	Media	Alta	Frutales	Baja	Media	Alta
Arroz	27	50	23	Brócoli	49	51	0.2	Toronja	32	27	41
Frijol (2)	22	27	51	Cebolla (3)	22	27	51				
Frijol (9)	49	51		Cebolla (6)	46	49	4				
Maíz	44	27	30	Habanero	29	71	0.2				
Sorgo	14	69	17	Papa (3)	43	42	15				
Soya	39	27	34	Papa (5)	49	51					
Trigo	20	71		Pepino	49	51	0.1				
				Tomate	48	48	4				

Los números dentro de los paréntesis representan el ciclo del cultivo en meses.

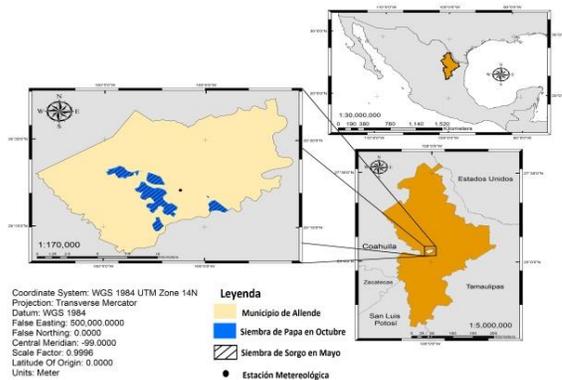


Figura 3. Zona estatal con áreas proyectadas para la diversificación y rotación de papa-sorgo.

Diversificación agrícola

Las eficiencias y fechas de siembra de cultivos anuales generan las combinaciones de los grupos de granos básicos y hortalizas proyectados como rotaciones de cultivos para incrementar la diversificación agrícola con reducción en incidencia de plagas, enfermedades o malezas difíciles de controlar con agroquímicos Ball *et al.* (2005). Así como, la conservación de los recursos hídricos y minimización de problemas de salinidad (Turner, 2004) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Rotaciones de cultivos en el estado.

Rotación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Brócoli-tom					13.9				29.2	48.1	14.1	
brócoli-papa(3)					2.5				29.2	48.1		
Brócoli-hab			49.3						29.2	48.1		
Ceb(3)-maíz			26.1						18.7	0.2		
Ceb(3)-sorgo				19.6					18.7	0.2		
Ceb(5)-sorgo				19.6						78.6		
Ceb(5)-maíz				73.8						78.6		
Frijol(2)-maíz			26.1	73.8						62.8		
Hab-trigo			49.3						5.3	3.6		
Papa(3)-trigo							65.4	16.1				53.8
Papa(5)-trigo					2.1							53.8
Sorgo-frijol(2)				19.6					17.4	62.8		
Tom-trigo						24.4	21.2	40.4				53.8
Trigo-frijol(2)							6.3	13.5	17.4			53.8

Ceb= cebolla; Hab= chile habanero; Tom= tomate; los corchetes representan el ciclo en meses.

Rendimiento biofísico

El rendimiento biofísico de los cultivos permite determinar el máximo potencial que se puede alcanzar en una zona, al considerar una previsión de la capacidad a desarrollar por los cultivos con registro de su producción (de Wit, 1965). En el estado de Nuevo León, los granos básicos, hortícola y frutal que alcanzan el mayor rendimiento son: maíz (10 t ha^{-1}) localizado en la zona centro, norte y noreste, cebolla de 6 meses (65 t ha^{-1}) ubicada en la zona sur y toronja (45 t ha^{-1}) en la zona sur y centro-este (35 t ha^{-1}) del estado. De acuerdo con la GAEZ (2006), el máximo potencial promedio del maíz es de 11.8 t ha^{-1} , la cebolla 10.1 t ha^{-1} ; no obstante, el rendimiento para la toronja no lo reporta.

En cambio el resto de rendimientos con un máximo y mínimo son: en granos básicos como arroz entre 6 y 8 t ha^{-1} , frijol de 2 meses entre 1 a 2 t ha^{-1} , frijol (nueve meses) entre 5 a 7 t ha^{-1} , sorgo entre 4 a 5 t ha^{-1} , soya entre 4 a 6 t ha^{-1} , trigo entre 6 a 9 t ha^{-1} ; mientras que, las hortalizas como el brócoli se cuantifica entre 14 y 19 t ha^{-1} , cebolla (tres meses) entre 16 a 23 t ha^{-1} , chile habanero entre 32 a 36 t ha^{-1} , papa (tres meses) entre 20 a 30 t ha^{-1} , papa (cinco meses) entre 42 a 48 t ha^{-1} , pepino entre 32 a 40 t ha^{-1} y tomate entre (15 a 23) t ha^{-1} .

Periodo libre de heladas (PLH)

El PLH varía en el estado; por ejemplo, en la zona centro-norte se presenta la mayor superficie agrícola (59%) libre de heladas; mientras que en la zona sur es donde ocurren la mayor incidencia de heladas, acortando los periodos libres durante los periodos de febrero-diciembre; febrero-noviembre; marzo-noviembre y abril-octubre (con 20%, 1%, 9% y 10% respectivamente), como se puede apreciar en la Figura 4. Estas zonas estarían limitadas para los cultivos tropicales (Ortíz y Pájaro, 1985; Duman y Wisniewski, 2014).

Sistema de clasificación del suelo

Los grupos de referencia con aptitud alta de las áreas agrícolas que se presentan en el estado son: Cambisols (0.8%) ubicado en el centro-sureste, Kastanozems (0.9%) en la zona centro-este y de manera aislada en el noroeste, Luvisols (0.7%) en la zona centro-sureste, Phaeozems (5.2%) en el centro y sur, Vertisols (22.7%) en el centro-este y norte. Subunidades Pelico (7%) en el centro-sureste. (WRB, 2015). Además, los suelos con la aptitud media corresponden al Calcisols con 26% y por último 43% con aptitud baja a Leptosols (26.2%), Regosol (10.2%) y Solonchak (6.9%), junto a subunidades que tienen 67% de aptitud media a Calcaric (13.1%), Calcic (40%), Chromic (4%), Eutric (0.03%), Haplic (5%), Luvic (5%) y por último de aptitud baja con el 5% a horizonte Gypsic (4.3%), Ortic (0.4%).

Régimen de humedad del suelo

El régimen de humedad (Figura 4), es importante para conocer el número de meses que la humedad se conserva en el suelo (Ortíz *et al.*, 2014) y los problemas que se pueden para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos durante el ciclo de producción. En la zona de estudio se tiene una ‘aptitud baja y media’ en las zonas norte, centro y sur del estado cuando se presenta un régimen de humedad arídico y ustíco (46 y 43% respectivamente) y “aptitud alta” (11%) en la zona centro del estado cuando ocurre un régimen údico.

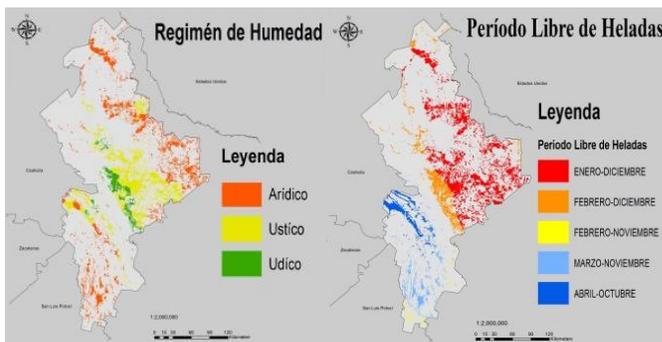


Figura 4. Régimen de humedad del suelo y periodos libres de heladas.

Rendimiento potencial de cultivos

El rendimiento potencial y ubicación sobre el mapa temático en la Figura 5. Los cultivos con potencial fueron: a) granos básicos como frijol (2 y 9 meses) y sorgo se proponen en 51%, 51% y 69% del área, con un rendimiento potencial estimado entre 2, 4 y 4 t ha⁻¹ respectivamente; b) hortalizas como: chile habanero con 63% del área agrícola y un rendimiento estimado de 21 t ha⁻¹ y c) con frutales como Toronja propuesta en 41% del área, con rendimiento estimado de 35 t ha⁻¹.

Entre los años 2006-2015 se tuvo un rendimiento promedio del chile habanero de 37.3 t ha⁻¹ (municipios de Hualahuises, General Terán y Cadereyta Jiménez), en frijol de 0.8 t ha⁻¹ (por referir algunos municipios de Cadereyta Jiménez, Linares y Rayones); el sorgo con 3.3 t ha⁻¹ (por nombrar algunos municipios de Anáhuac, China, Doctor González, General Bravo y Salinas Victoria); y la toronja con 13.2 t ha⁻¹ (por mencionar algunos municipios General Terán, Linares y Montemorelos).

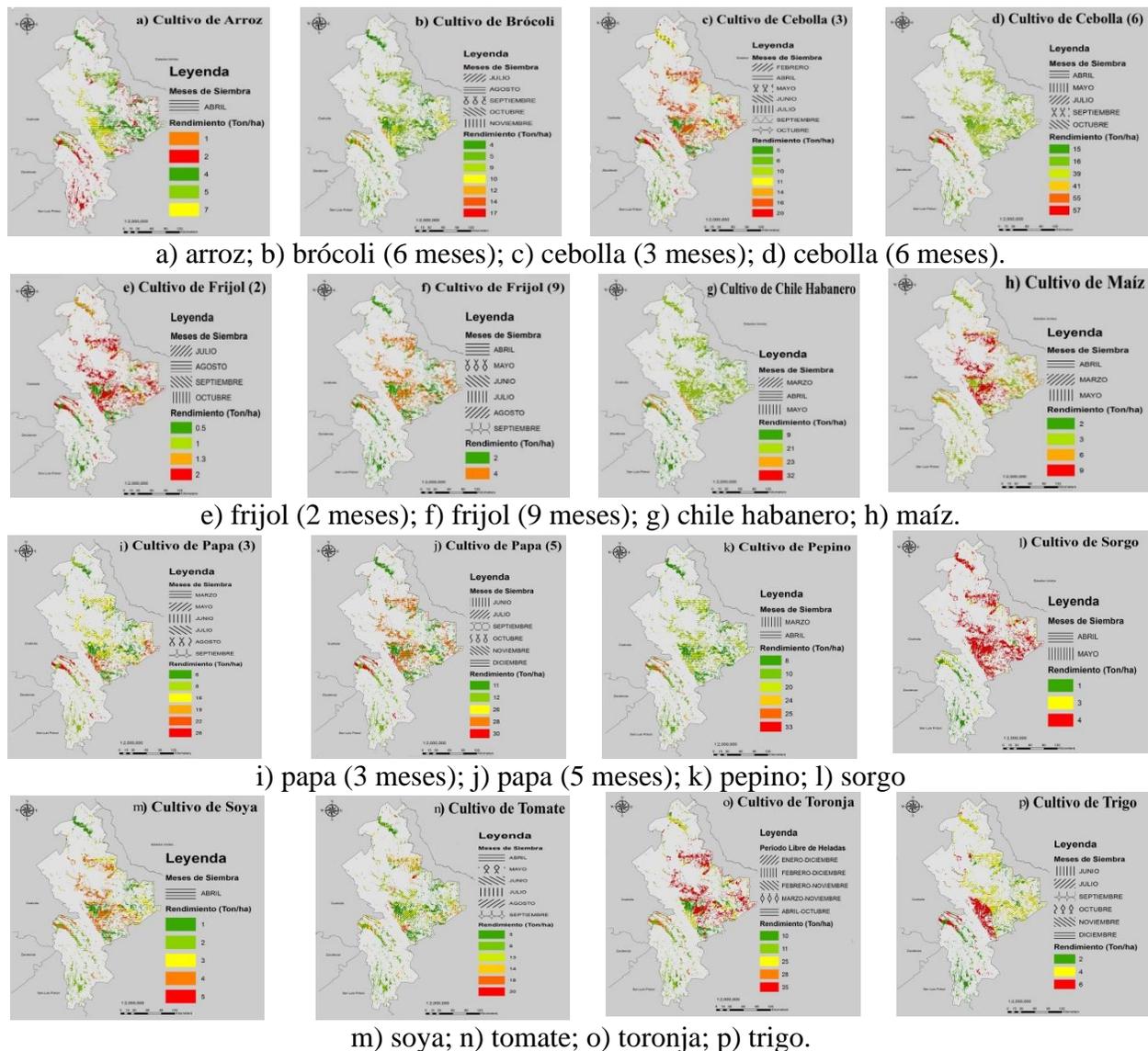


Figura 5. Rendimiento potencial ($t\ ha^{-1}$) en zonas agrícolas: a) arroz; b) brócoli (6 meses); c) cebolla (3 meses); d) cebolla (6 meses); e) frijol (2 meses); f) frijol (9 meses); g) chile habanero; h) maíz; i) papa (3 meses); j) papa (5 meses); k) pepino; l) sorgo; m) soya; n) tomate; o) toronja; p) trigo.

Para el caso de la toronja se incrementaría hasta $35\ t\ ha^{-1}$ si se utilizara la información generada en este estudio en las zonas norte y noreste del estado (Agualeguas, Salinas Victoria y China, por mencionar algunos municipios). En el caso de los granos básicos para el ciclo 2018 la superficie sembrada abarcó el 13% en conjunto del área agrícola en los municipios de: China, Doctor Arroyo, Linares, General Terán y Galeana, (SEDGRO, 2018; SIAP, 2018). Sin embargo, las predicciones realizadas ubican a la zona norte y centro con los mejores rendimientos por nombrar algunos municipios son: Anáhuac, Cadereyta Jiménez y General Bravo, junto con zonas aisladas en la zona sureste (General Zaragoza).

El rendimiento potencial estimado en porciento de áreas agrícolas estatal para los cultivos básicos de grano fueron: a) arroz con rendimientos de 1, 2, 4, 5 y 7 t ha⁻¹ en superficies de 0.01%, 27%, 31%, 24% y 18% respectivamente; b) frijol (dos meses) con 0.5, 1, 1.3 y 2 t ha⁻¹ en 27%, 0.02%, 22% y 51% respectivamente; c) frijol (nueve meses) con 2 y 4 t ha⁻¹ en 49% y 51% respectivamente; d) maíz con 2, 3, 6 y 9 t ha⁻¹ en 0.03 %, 43%, 27% y 30% respectivamente; e) sorgo con 1, 3 y 4 t ha⁻¹ en 17%, 14% y 69% respectivamente; f) soya desde 1, hasta 5 t ha⁻¹ desde 0.3% hasta 39%; g) trigo con 2, 4 y 6 t ha⁻¹ en 29%, 49% y 22% respectivamente.

Por otra parte las hortalizas y frutales se estimaron en: a) brócoli con rendimientos de 4, 5, 9, 10, 12, 14 y 17 t ha⁻¹ en un área de 33%, 16%, 33%, 12%, 6%, 0.01% y 0.2% respectivamente; b) cebolla (tres meses) con 5, 6, 10, 11, 14, 16 y 20 t ha⁻¹ en 14%, 13%, 0.002%, 18%, 3%, 45% y 6% respectivamente; c) cebolla (seis meses) con 16, 39, 41, 55 y 57 t ha⁻¹ en áreas de 46%, 46%, 3%, 0.6% y 4% respectivamente; d) chile habanero con 9, 21, 23 y 32 t ha⁻¹ en 29%, 63%, 8% y 0.2% respectivamente; e) papa (tres meses) con 6, 8, 16, 19, 22 y 26 t ha⁻¹ en 27%, 16%, 38%, 4%, 10% y 5% respectivamente; f) pepino con 8, 10, 20, 24, 25 y 33 t ha⁻¹ en 33%, 16%, 46%, 1%, 4% y 0.02% respectivamente; g) tomate con 5, 6, 14, 18 y 20 t ha⁻¹ en 22%, 26%, 27%, 21%, 3% y 1% respectivamente; y h) toronja con 10, 11, 25, 28 y 35 t ha⁻¹ en 16%, 16%, 22%, 5% y 41% respectivamente (Figura 5).

Conclusiones

La combinación entre bases de datos climáticos y mapas temáticos edáficos puede reducir la incertidumbre para localizar áreas con altos rendimiento de cultivos y proponer zonas potencialmente agrícolas. Asimismo, se pueden establecer fechas de siembra a nivel mensual, que conlleven a la máxima capacidad climática y recomendar rotaciones de cultivos que permitan generar una agricultura intensiva y diversificada aprovechando las ventanas comerciales.

En cultivos de variedades tempranas como cebolla de tres meses, frijol de dos meses y papa de tres meses a pesar de un bajo rendimiento comparado con los ciclos tardíos, estas pueden tener mayor eficiencia. También los periodos de heladas limitan la producción de cultivos tropicales como el caso de la toronja; no obstante, la predicción incrementa las zonas con menor riesgo de heladas en la zona norte y noreste del estado.

El estado presenta mayor capacidad para la producción de granos básicos al poseer mayor superficie y eficiencia en su rendimiento; sin embargo, existen cultivos con superficies menores a 10% del área agrícola con altos rendimientos.

Literatura citada

- Ball, B. C.; Bingham, I.; Rees, R. M.; Watson, C. A. & Litterick, A. 2005. The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions. *Canadian Journal of Soil Science*. 85(5):557-577. <https://doi.org/10.4141/S04-078>.
- Cai, R.; Feng, S.; Oppenheimer, M. and Pytlikova, M. 2016. Climate variability and international migration: The importance of the agricultural linkage. *Journal of Environmental Economics and Management*. 79:135-151. ISSN: 0095-0696. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2016.06.005>.

- de Wit, C. T. 1965. Photosynthesis of Leaf Canopies. *Agricultural Research Report*. 663(2):1-64. PUDOC, Wageningen University. <https://edepot.wur.nl/187115>.
- Duman, J. G., & Wisniewski, M. J. 2014. The use of antifreeze proteins for frost protection in sensitive crop plants. *Environmental and Experimental Botany*. 106:60-69. ISSN 0098-8472. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.01.001>.
- ECOCROP. 2007. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/home>.
- FAO. 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Base referencial mundial del recurso suelo: Sistema internacional de clasificación de suelos para nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informe sobre recursos mundiales de suelos.
- FAO. 1978. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Report on the Agro-ecological Zones Project: Results for Southwest Asia.
- Fraisse, C. W.; Breuer, N. E.; Zierden, D.; Bellow, J. G.; Paz, J.; Cabrera, V. E. and O'Brien, J. J. 2006. AgClimate: A climate forecast information system for agricultural risk management in the southeastern USA. *Computers and Electronics in Agriculture*. 53(1):13-27.
- GAEZ (ver 3.0). 2016. Global Agro-ecological Zones. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 37-47 pp. www.fao.org.
- Grassini, P., van Bussel, L. G. J., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Cassman, K. G. 2015. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*. 177:49-63. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>.
- Hansen, J. 2004. Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*. 125(1-2):143-157. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.02.006>, ISSN: 0168-1923.
- INEGI. 2005. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Base de datos geográficos, Diccionario de datos edafológicos escala 1: 1000 000 (Vectorial). 1-7.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Johnson, M. D.; Hsieh, W. W.; Cannon, A. J.; Davidson, A. & Bédard, F. 2016. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies by remotely sensed vegetation indices and machine learning methods. *Agricultural and Forest Meteorology*. 74-84. pp.
- Neild, R. E. and Boshell, F. 1976. An agroclimatic procedure and survey of the pineapple production potential of Colombia. *Agricultural Meteorology*. 81-92 pp.
- Ortiz, S. C. A. y de la Cerda, H. E. C. 1978. Metodología del levantamiento fisiográfico: un sistema de clasificación de tierras. Posgrado de Edafología. Colegio de Postgraduados. 85 pp.
- Ortiz, S. C. A. y Pájaro, H. D. 1988. Estimación del período libre de heladas para la República Mexicana. *Revista de Geografía Agrícola*. 17:109-118.
- Ortiz, S. C. A. 2011. Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la república mexicana. Texcoco, Estado de México. 70-79 pp.
- Ortiz, S. C.; Gutiérrez, C. Ma. C y Gutiérrez, C. E. 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos. (12° Ed. Traducción al español). USDA-NRCS. 31-33 pp.
- Sánchez-Guzmán, P.; Gutiérrez-Castorena, E. V.; Ortiz-Solorio, C. A. y Gutiérrez-Castorena, Ma. C. 2009. Soil moisture regimes of Mexico using Newhall model, *Soil Geography: New Horizons*. 38 p.

- SEDAGRO (Secretaría de Desarrollo Agropecuario). 2018. Boletín agropecuario.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), CP (Colegio de Postgraduados). 2001-2002. Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el Hombre en la República Mexicana escala 1:250 00, Memoria Nacional. 76 p.
- SIAP. 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/gobmx-publicaciones-siap/pag/2018/Nuevo-Leon-InfografiaAgroalimentaria-2018>.
- SMN. 2018. Servicio Meteorológico Nacional de México (Normales Climatológicas por Estado).
- Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J. and Befort, B. L. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 108(50):20260-20264.
- Turner, N. C. 2004. Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. *Annals of Applied Biology*. 144(2):139-147.
- Valin, H.; Sands, R. D.; van der Mensbrugghe, D.; Nelson, G. C.; Ahammad, H.; Blanc, E. and Willenbockel, D. 2014. The future of food demand: understanding differences in global economic models. *Agricultural Economics*. 45(1):51-67.
- Van Ittersum, M. K.; Cassman, K. G.; Grassini, P.; Wolf, J.; Tittonell, P. and Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance. *Field Crops Research*. 143:4-17.
- Van Wart, J.; Grassini, P.; Yang, H.; Claessens, L.; Jarvis, A. and Cassman, K. G. 2015. Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 209-210 49-58. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2015.02.020>.
- WRB. 2015. IUSS Working Group. Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Informes sobre recursos mundiales de suelos 106*. FAO, Roma.