

Cambio climático y algunas estrategias agrícolas para fortalecer la seguridad alimentaria de México*

Climate change and some agricultural strategies to strengthen food security in Mexico

Antonio Turrent-Fernández^{1§}, José Isabel Cortés-Flores³, Alejandro Espinosa-Calderón¹, Cuauhtémoc Turrent-Thompson² y Hugo Mejía-Andrade¹

¹Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco, km 13.5 C. P. 56250. Coatlinchán, Texcoco, Estado de México. Tel: 01 800 088 2222 ext. 85363. (espinosa.alejandro@inifap.gob.mx). ²Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. Carretera Ensenada-Tijuana, 3918. Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, B C. Tel: 01 646 175 0500. (turrentc@cicese.mx). ³Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, km 36.5, 56230, Montecillo, México. Tel: 01 58045900, ext. 1216. (jicortes@colpos.mx). [§]Autor para correspondencia: turrent.antonio@inifap.gob.mx.

Resumen

En este ensayo se explora la posible seguridad con soberanía alimentaria de México en la primera mitad del siglo XXI, dado el cambio climático inminente. Las condiciones iniciales incluyen una población nacional en crecimiento, una dependencia alimentaria creciente, y un modelo de aprovechamiento de los recursos naturales históricamente extractivista, que ha conducido a su degradación significativa. Se da por hecho, que la tecnología agrícola de que dispone el campo será obsoleta dentro de la primera mitad del siglo debido al cambio climático, siendo la disponibilidad de agua para los cultivos y su tolerancia genética a la sequía y a temperaturas extremas las variables centrales de la producción de alimentos. Se resalta la fragilidad de la mitad de la tierra de labor en ladera al cambio climático, debido a su exposición a la erosión del suelo por falta de protección. Se discuten adaptaciones urgentes al manejo de los recursos para corregir la acumulación diferida de inversión protectora. Se analiza planes de investigación de plazo intermedio (5 a 10 años) y de plazo largo (20 a 40 años). El primero para desarrollar tecnologías de transición y el segundo para desarrollar tecnología adecuada a etapas avanzadas de cambio climático. Se observa la necesidad 1) de tecnologías

Abstract

This essay explores the possible security with food sovereignty of Mexico in the first half of the century XXI, given the impending climate change. The initial conditions include a national population growth, increasing food dependence, and a model of exploitation of natural resources extractive historically, which has led to its significant degradation. It is assumed, that agricultural technology available to the field will be obsolete within the first half of the century due to climate change, with the availability of water for crops and their genetic tolerance to drought and extreme temperatures core variables food production. The fragility of half the arable land in hillside climate change, due to its exposure to soil erosion due to lack of protection is highlighted. The urgent to resource management are discussed to correct deferred investment accumulation of protective adaptations. The research plans intermediate-term (5-10 years) and long term (20 to 40 years) is analyzed. The first to develop transition technologies and the second to develop appropriate advanced stages of climate change technology. The need is observed 1) multiobjective technologies as a MIAF for agricultural

* Recibido: junio de 2016
Aceptado: septiembre de 2016

multiobjetivo como el MIAF para el manejo agrícola de laderas; 2) la recirculación de los germoplasmas élite de cultivos anuales dentro y entre regiones; 3) la búsqueda en tiempo real y aprovechamiento del germoplasma nativo con adaptación genética a la sequía y a temperaturas extremas; y 4) el desarrollo de perennidad en el cultivo del maíz.

Palabras clave: cambio climático, seguridad con soberanía alimentaria, tecnologías adaptadas a tensiones ambientales extremas.

Introducción

México está perdiendo la carrera entre la producción de alimentos y el crecimiento de su población. Esto ha ocurrido dentro de la climatología histórica, que ha sido relativamente benigna, si se compara con la previsión del cambio climático a lo largo de este siglo (IPCC, 2013). En el período de 1995 a 2014, la tasa anual de crecimiento poblacional total de México fue +1.35% en 1994, reduciéndose progresivamente hasta +1.17% en 2014 (CONAPO, 2016). En el mismo período, las tasas anuales de incremento de la producción de cuatro granos básicos -calculadas por los autores a partir de SIAP (2016)- fueron inferiores a las del crecimiento poblacional total: +0.95% en maíz, +0.28% en trigo, -0.45% en frijol, y -3.6% en arroz.

En consecuencia, la dependencia del mercado regional para compensar el déficit alimentario preexistente, se ha agudizado. Empero, México cuenta con los recursos naturales, la tecnología agrícola y los recursos humanos necesarios para recuperar su autosuficiencia alimentaria, como lo sugieren Turrent *et al.* (2012). Aun así, es improbable que el futuro sea mejor en ausencia de cambios radicales en la política de apoyo a la agricultura, y de manera relevante, aunque no única, a la investigación agrícola. Otros cambios de los órdenes social, económico y de mercado, aunque igualmente relevantes, no serán abordados en este ensayo. La tasa anual de incremento poblacional total proyectada por CONAPO decrecerá desde +0.67% en 2030 hasta +0.48% en 2040.

Infelizmente, el obligado esfuerzo para recuperar la seguridad alimentaria habrá de realizarse en condiciones climáticas francamente adversas y con los recursos naturales suelo y biota significativamente degradados. Los desastres causados por la sequía, las precipitaciones torrenciales, las ondas cálidas y las heladas aumentarán sus frecuencias con

management slopes observed; 2) recirculation of elite germplasm of annual crops within and between regions; 3) real-time search and use of native germplasm with genetic adaptation to drought and extreme temperatures; and 4) the development of perennity in the cultivation of corn.

Keywords: climate change, food security with sovereignty, technologies adapted to extreme environmental stresses.

Introduction

Mexico is losing the race between food production and population growth. This has occurred within the historical climatology, which has been relatively benign, when compared with the forecast of climate change throughout this century (IPCC, 2013). In the period 1995-2014, the annual rate of total population growth in Mexico was +1.35% in 1994, gradually reducing to +1.17% in 2014 (CONAPO, 2016). In the same period, the annual rates of increase in the production of four basic grains -calculated by authors from SIAP (2016)- were lower than the total population growth: +0.95% in corn, wheat +0.28%, -0.45% in beans, and rice -3.6%.

In consequently, the dependence of the regional market to compensate for the existing food deficit has worsened. However, Mexico has natural resources, agricultural technology and human resources needed to restore food self-sufficiency, as suggested Turrent *et al.* (2012). Still, it is unlikely that the future will be better in the absence of radical changes in the policy of supporting agriculture and relevant way, but not only, for agricultural research. Other changes in social, economic and market orders, but equally important, will not be addressed in this essay. The annual projected by CONAPO total population growth rate will decrease from +0.67% in 2030 to +0.48% in 2040.

Unfortunately, the effort required to restore food security to take place in weather conditions frankly adverse with natural resources soil and biota and significantly degraded. Disasters caused by drought, heavy precipitation, heat waves and frost will increase their frequencies with respect to historical (Easterling *et al.*, 2000; Ahmed *et al.*, 2009). The slopes under cultivation and degraded by erosion are the most vulnerable to disasters.

respecto a las históricas (Easterling *et al.*, 2000; Ahmed *et al.*, 2009). Las laderas bajo cultivo ya degradadas por la erosión serán las más vulnerables a los desastres.

Acompañando también al cambio climático, las biotas amigas y enemigas de los cultivos cambiarán su distribución geográfica, desquiciando las interacciones evolutivas actuales huésped-enfermedad/plaga. La conjunción de estos eventos afectará negativamente la producción de alimentos en México, así como la de sus proveedores actuales, pudiéndose anticipar su encarecimiento al nivel global. La seguridad alimentaria de México, crecientemente dependiente de la importación de alimentos será insostenible bajo las nuevas condiciones de cambio climático.

Probablemente, gran parte de la tecnología actual para la producción de cultivos y los métodos desarrollados dentro de las frecuencias climáticas históricas serán obsoletas en menos de una generación. Es improbable, por ejemplo, que los actuales híbridos de maíz más productivos del Altiplano Central de México o del Bajío estén genéticamente acondicionados para a) tolerar dos meses sin lluvia y temperaturas máximas superiores a 45 a °C; y b) reanudar su desarrollo a la conclusión de estas tensiones. Las bases germoplásmicas élite de los cultivos modernos actuales de México y del mundo no fueron seleccionadas por su tolerancia a tensiones ambientales tan agudas.

Será necesario identificar esos caracteres en la base germoplásmica más amplia, incluyendo a los parientes silvestres y reintroducirlos a los germoplasmas élite, para desarrollar nuevas variedades que se adapten al cambio climático. También habrá que modificar radicalmente las estrategias de producción de los cultivos, e incluso su sustitución. La disponibilidad de agua para los cultivos, será variable central en la producción de alimentos. Por esto, es necesario que el país invierta en infraestructura hidráulica e interconexión eléctrica para el riego. En su región sur-sureste, el país cuenta con abundante reserva de agua dulce, de tierras de calidad agrícola -que ya son parte del agroecosistema- y clima benigno en el ciclo otoño-invierno.

También será necesario desarrollar cultivos con mayores tolerancias genéticas a las tensiones abióticas: sequía extrema, ondas cálidas y gélidas, hipoxia radicular y a tensiones bióticas. Se sabe que estos caracteres deseables son típicamente multigénicos y de baja heredabilidad y que probablemente existan dispersos en el reservorio de diversidad genética de los cultivos y de sus parientes

Also accompanying climate change, friendly and enemy crops biota change their geographical distribution, the current evolutionary unhinged host-disease/pest. The conjunction of these events will negatively affect food production in Mexico, as well as their current suppliers, being able to anticipate their rise to global level. Mexico's food security, increasingly dependent on food imports will be unsustainable under the new conditions of climate change.

Probably, much of the current technology for the production of crops and methods developed within the historic climatic frequencies will be obsolete in less than a generation. It is unlikely, for example, that the current most productive hybrid corn to Central Plateau of Mexico or the Bajío are genetically conditioned to a) tolerate two months without rain and 45 °C above maximum temperatures; and b) to resume its development to the conclusion of these tensions. The base germplasm elite of today's modern cultures of Mexico and the world were not selected for their tolerance to environmental stress as sharp.

It will be necessary to identify those characters in the broader germplasm base, including wild relatives and reintroducing them to the elite germplasm, to develop new varieties that are adapted to climate change. It will also change radically strategies crop production, and even replacement. The availability of water for crops, is variable central to food production. Therefore, it is necessary for the country to invest in water infrastructure for irrigation and electrical interconnection. In the south-southeast region, the country has abundant reserves of fresh water, agricultural land quality, which are already part of agroecosystem - and benign cycle autumn-winter weather.

Also it is necessary to develop crops with higher genetic tolerance to abiotic stress: extreme drought, heat waves and freezing, root hypoxia and biotic stresses. It is known that these desirable traits are typically multigenic and low heritability and that there are probably scattered in the reservoir of genetic diversity of crops and their wild relatives. The perennial character, as an alternative to the annual staple crops has been widely known for its promise to contribute to the sustainability of natural resources and the stability of production, particularly in marginal lands.

Compared to its annual counterpart, would be less aggressive to ecology because: a) its greater root mass reduces erosion and keeps more carbon in the soil (Glover *et al.*, 2007); b)

silvestres. El carácter perenne, como alternativa para los cultivos básicos anuales ha sido ampliamente destacado por su promesa de contribuir a la sostenibilidad de los recursos naturales y a la estabilidad de la producción, particularmente en las tierras marginales.

En comparación con su contraparte anual, sería menos agresivo para la ecología debido a que: a) su mayor masa radicular reduce la erosión y mantiene más carbón en el suelo (Glover *et al.*, 2007); b) intercepta, retiene y utiliza una mayor fracción de la precipitación (Tilman *et al.*, 2009), c) su período fotosintético es más largo (Dobleman *et al.*, 2009); d) su menor demanda de energía fósil (Glover *et al.*, 2010b); e) su mayor eficiencia en el uso de los fertilizantes (Randall *et al.*, 1997); y f) su mayor acumulación de carbono atmosférico y mejor hábitat para la vida silvestre (Pimentel *et al.*, 2012). Por esto, el carácter perennidad es prometedor para enfrentar el cambio climático. En algunos países del mundo, aunque no en México, la perennidad de los granos básicos es ya un objetivo de plazo largo para el arroz, el sorgo, el trigo y el maíz (FAO, 2014).

México debería adherirse a esta corriente científica para fortalecer su seguridad alimentaria. También, y de manera simultánea, México requiere abordar objetivos intermedios, alcanzables a menor plazo (5 a 10 años). En este ensayo se enuncia y discute: a) algunas adaptaciones a la infraestructura y funcionamiento del campo hasta ahora diferidos; b) objetivos intermedios de investigación aplicada para enfrentar al CC de la primera mitad del siglo; y c) objetivos de plazo largo, abordables con investigación estratégica para enfrentar las manifestaciones del CC en la segunda mitad del siglo.

Cambio climático, recursos naturales y efectos sobre la productividad de los cultivos

Cambio climático (CC). Hay amplio consenso en la comunidad científica mundial en que la acumulación creciente de gases termoactivos en la atmósfera (principalmente el CO₂) se asocia con el incremento observado en la temperatura atmosférica media mundial. Se proyecta que ese incremento variará según escenarios de emisión de gases termoactivos durante el siglo XXI. En el escenario benigno RCP2.6, el incremento medio de la temperatura atmosférica es de +1 °C, mientras que para el escenario más severo RCP8.5, se proyecta el incremento de +3.7 °C (IPCC Working Group I, 2013). Los modelos también predicen la agudización de extremos de temperatura y precipitación con respecto a lo históricamente observado entre regiones, años, estaciones y ciclos diarios (Easterling *et al.*, 2000; Ahmed *et al.*, 2009).

intercept, retain and use a larger fraction of precipitation (Tilman *et al.*, 2009), c) their photosynthetic period is longer (Dobleman *et al.*, 2009); d) the reduced demand for fossil energy (Glover *et al.*, 2010b); e) the most efficient use of fertilizers (Randall *et al.*, 1997); and f) the increased accumulation of atmospheric and better habitat for wildlife carbon (Pimentel *et al.*, 2012). Therefore, the perennial character is promising to tackle climate change. In some countries, though not in Mexico, the perennity of basic grains is already a long-term target for rice, sorghum, wheat and maize (FAO, 2014).

Mexico should adhere to the scientific mainstream to strengthen food security. Also, and simultaneously, Mexico needs to address intermediate, shorter-term achievable goals (5 to 10 years). This essay is stated and discussed: a) some adaptations to the infrastructure and operation of the field so far deferred; b) intermediate targets applied research to address the CC of the first half of the century; and c) long-term goals, affordable with strategic research to address the manifestations of CC in the second half of the century.

Climate change, natural resources and effects on crop productivity

Climate change (CC). There is broad consensus in the global scientific community that the increasing accumulation of greenhouse gases in the atmosphere (mainly CO₂) is associated with the observed increase in global average atmospheric temperature. This increase is projected to vary emission scenarios of greenhouse gases during the century XXI. In RCP2.6 benign scenario, the average increase in air temperature is + 1 °C, while for the most severe scenario RCP8.5, is projected increased +3.7 °C (IPCC Working Group I, 2013). The models also predict the intensification of extreme temperature and precipitation compared to the historically observed between regions, years, seasons and daily cycles (Easterling *et al.*, 2000; Ahmed *et al.*, 2009).

The literature review of Tubiello and Rosenzweig (2008) led to conclude that a moderate heating (up to 2 °C) in the early part of the century, could benefit agricultural production and pasture in temperate regions of the world while reducing agricultural production in semi-arid and tropical regions. Instead, the additional heating the second half of the century reduce production in all regions.

La revisión bibliográfica de Tubiello y Rosenzweig (2008) los llevó a concluir que un calentamiento moderado (hasta 2 °C) en la primera parte del siglo, podría beneficiar la producción agrícola y de pasturas en las regiones templadas del mundo y a la vez, reducir la producción agrícola en las regiones semiáridas y tropicales. En cambio, el calentamiento adicional de la segunda mitad del siglo reducirá la producción en todas las regiones. El calentamiento aumenta la tensión de vapor de agua, por lo que la precipitación media mundial se incrementará, si bien sujeta a la variabilidad atrás señalada.

El calentamiento atmosférico asociado a mayores contenidos de CO₂ y de vapor de agua, así como sus variaciones entre regiones, años, estaciones y días, tiene profundas implicaciones agronómicas en su mayoría negativas. Se afectan de manera significativa a) la fotosíntesis (Ort *et al.*, 2011); b) la fenología de los cultivos (Ainsworth y Ort, 2010); c) las tensiones abióticas (Jenks *et al.*, 2007) y bióticas (Zavala *et al.*, 2008); d) el régimen de humedad del suelo debido a la mayor demanda evapotranspirativa de la atmósfera, y a la dinámica cambiante de los escurrimientos superficiales e infiltración del agua de lluvia; e) la erosión hídrica; y f) los rendimientos de los cultivos.

Se ha realizado copiosa investigación en el mundo para diseñar estrategias de adaptación agrícola *ia*. 1) los estudios sobre la evolución de la susceptibilidad genética de las variedades mejoradas de maíz y de soya a la sequía y al calor extremo en EEUU (Roberts y Schlenker, 2010); 2) proyección del rendimiento de maíz bajo riego o temporal al nivel regional (Wang *et al.*, 2011; Tinoco-Rueda *et al.*, 2011); 3) riesgos de impacto sobre los rendimientos de los cultivos (Conde *et al.*, 2004); y 4) desarrollos conceptuales (Ainsworth y Ort, 2010). La mayoría de los países tercermundistas deficitarios en la producción de alimentos -México entre ellos- y donde vive el 75 por ciento de la población total, se ubica en la región semiárida y tropical del mundo, donde el efecto del calentamiento global será más severo que en los países de la región templada (Rosenzweig y Liverman, 1992). También hay consenso en que por su carácter de subdesarrollados, habrá menor capacidad para adoptar estrategias efectivas para aminorar los efectos agudos sobre la producción de alimentos (Morton, 2007; Hertel y Rosch, 2010).

Recursos suelo y agua dulce. El campo mexicano cuenta con poco más de 31 millones de hectáreas de tierras de labor, distribuidas de manera discreta a lo largo y ancho del país, que en sí, es de orografía accidentada. La mitad al norte del país tiene clima árido o semiárido, mientras el resto tiene

Warming increases the vapor pressure of water, so that the global rainfall will increase, although subject to the back marked variability.

The global warming associated with higher content of CO₂ and water vapor, and its variations between regions, years, seasons and days, it has profound implications agronomic mostly negative. They are affected significantly, a) photosynthesis (Ort *et al.*, 2011); b) the phenology of crops (Ainsworth and Ort, 2010); c) abiotic stresses (Jenks *et al.*, 2007) and biotic (Zavala *et al.*, 2008); d) the soil moisture regime due to increased evapotranspiration demand of the atmosphere, and to the changing dynamics of surface and infiltration of rainwater runoff; e) water erosion; and f) the crop yields.

It has made copious research in the world to design adaptation strategies for agricultural *ia*. 1) studies on the evolution of the genetic susceptibility of improved varieties corn and soybean to drought and extreme heat in the US (Roberts and Schlenker, 2010); 2) projected maize yield irrigated or temporary regional level (Wang *et al.*, 2011; Tinoco-Rueda *et al.*, 2011); 3) risk of impact on crop yields (Conde *et al.*, 2004); and 4) conceptual developments (Ainsworth and Ort, 2010). Most Third World countries deficient food production -Mexico Among them- and where 75 percent of the total population, is located in the semiarid and tropical region of the world where the effect of global warming will be more severe than in the countries of the temperate region (Rosenzweig and Liverman, 1992). There is also consensus that underdeveloped character there will be less able to adopt effective strategies to reduce the acute effects on food production (Morton, 2007; Hertel and Rosch, 2010).

Soil and freshwater resources. The Mexican countryside has just over 31 million hectares of arable land, discreetly distributed to across the country, which in itself is of rugged terrain. Half north of the country is arid or semiarid climate, while the rest is semiarid climates, subhumid or humid, warm temperate thermal regimes. For historical reasons, not all the land of existing work corresponds to quality agricultural land and vice versa, not all quality agricultural lands of the country are used as arable land. The 33 percent of the land of current work under temporary agricultural quality not being part of the agricultural provinces of marginal land and low productivity (Gonzalez *et al.*, 1991; Turrent *et al.*, 2014). Its soils are thin and when deep, have sharply limited availability of rainwater, which confers high risk of drought.

climas semiárido, subhúmedo o húmedo, con regímenes térmicos cálido a templado. Por razones históricas, no toda la tierra de labor actual corresponde a tierras de calidad agrícola y viceversa, no todas las tierras de calidad agrícola del país se aprovechan como tierra de labor. El 33 por ciento de la tierra de labor actual bajo temporal no tiene calidad agrícola, siendo parte de las provincias agronómicas de tierra marginal y de baja productividad (González *et al.*, 1991; Turrent *et al.*, 2014). Sus suelos son delgados y cuando profundos, tienen disponibilidad agudamente limitativa de agua de lluvia, lo que les confiere alto riesgo de sequía.

Además de la superficie de tierras de labor bajo temporal, el campo cuenta con 6.3 millones de hectáreas dotadas de infraestructura para riego (Montesillo, 2006). Históricamente, el uso de la tierra de labor de México (temporal y riego), ha sido mayormente "extractivista", habiéndose mermado significativamente su calidad agrícola. El país ha acumulado gran inversión diferida en el manejo y acondicionamiento de sus 31 millones de hectáreas de tierras de labor. En la actualidad, la mayor parte de las más de 13 millones de hectáreas de tierras de labor ubicadas en ladera, se maneja sin protección contra la erosión hídrica. Tampoco se ha protegido a los suelos agrícolas contra el descenso acelerado de su contenido de materia orgánica, ni se ha impulsado la rotación de cultivos.

El 425 de la mejor tierra de labor de temporal y 57% de la tierra de menor calidad se ubican en laderas (Turrent, 1986), estando mayormente desprotegidas contra pérdidas por erosión hídrica. Después de la desaparición de la Dirección de Conservación de suelos de la SAGARPA a mediados de los años 1980, el esfuerzo del Estado por proteger las laderas cultivadas ha sido mínimo. La SAGARPA celebró en 2012 un convenio con el CIMMYT, para realizar el programa Mejoramiento Sustentable de la Agricultura Tradicional (MasAgro), que durará 10 años (Del Toro, 2012). Este programa involucra el cambio de paradigma de agricultura tradicional por el de agricultura de conservación, que incluye la protección contra la erosión. Sin embargo, este cambio ha sido analizado y cuestionado como solución para la agricultura sostenible de ladera, en pequeño (Turrent *et al.*, 2014).

El país recibe 1 530 km³ de agua en forma de precipitación media anual. La infraestructura hidráulica retiene 147 km³ (Anónimo, 1988); 410 km³ escurren al mar, casi sin aprovechamiento consuntivo y el resto, se infiltra y se evapotranspira. El 19% del escurrimiento medio anual nacional ocurre en el norte y el altiplano central, que

In addition to the amount of land under temporary work, the field has equipped 6.3 million hectares of irrigation infrastructure (Montesillo, 2006). Historically, the use of arable land of Mexico (rainfed and irrigated), has been largely "extractivist" having significantly decreased its agricultural quality. The country has accumulated large deferred investment management and conditioning of its 31 million hectares of arable land. At present, most of the more than 13 million hectares of arable land located on slopes is handled without protection against water erosion. Nor it has protected agricultural soil against accelerated its organic matter decline, or been driven crop rotation.

The 425 of the best arable land and 57% temporary land of lesser quality are located on slopes (Turrent 1986), being largely unprotected against loss by water erosion. After the disappearance of the Directorate of Soil Conservation of SAGARPA in the middle-1980s, the State's efforts to protect the cultivated hillsides has been minimal. The SAGARPA held in 2012 an agreement with CIMMYT, for Sustainable Improvement Traditional Agriculture program (MasAgro), which will last 10 years (Del Toro, 2012). This program involves changing paradigm of traditional agriculture by conservation agriculture, including protection against erosion. However, this change has been analyzed and questioned as a solution for sustainable hillside farming, small (Turrent *et al.*, 2014).

The country receives 1 530 km³ of water in the form of annual rainfall. The water infrastructure retains 147 km³ (Anónimo, 1988); 410 km³ drained to the sea, almost consumptive use and the rest, infiltrates and evapotranspires. The 19% of the national annual average runoff occurs in northern and central highlands, which make up half of the national territory, which has built most of the country's irrigation infrastructure. The 67% of the average sea surface runoff occurs in the southeast, which corresponds to a quarter of the national territory (Anónimo, 1988), and where the irrigation infrastructure is underdeveloped.

There is a significant "deferred conditioning" in the fraction of irrigated land. Most of the dams built in the last century lacks the necessary drainage works to protect the lands of their progressive salinization. The 10% of these agricultural land has developed salinity problems. Irrigation efficiency at national level is just 46 - average 36.6 percent in irrigation districts and units 56.5 in irrigation- (Arreguin-Cortes *et al.*, 2004). The low efficiency is due to several factors *ia*,

conforman la mitad del territorio nacional, en la que se ha construido la mayor parte de la infraestructura de riego del país. El 67% del escurrimiento superficial medio al mar, ocurre en el sureste, que corresponde a la cuarta parte del territorio nacional (Anónimo, 1988), y en donde la infraestructura hidroagrícola está subdesarrollada.

Hay un significativo “acondicionamiento diferido” en la fracción de tierras bajo riego. La mayor parte de las presas construidas durante el siglo pasado carece de las obras de drenaje necesarias para proteger a las tierras de su ensalitramiento progresivo. El 10% de esas tierras de labor ha desarrollado problemas de salinidad. La eficiencia del riego a nivel nacional es apenas 46 por ciento -promedio de 36.6 en los distritos de riego y 56.5 en las unidades de riego- (Arreguín-Cortés *et al.*, 2004). La baja eficiencia se debe a varios factores *ia*, las pérdidas de conducción desde la presa y de aplicación del agua en la parcela, la falta de inversión para acondicionar el riego al sistema presurizado.

Estrategias agrícolas para enfrentar el cambio climático

Adaptaciones en la infraestructura y el funcionamiento del campo

Aumentar la disponibilidad de agua para los cultivos. Hay consenso mundial de que la mejor adaptación al CC para los países que tienen reservas de agua dulce y de tierra de labor es el incremento en su superficie bajo riego (Morton, 2007). Esta máxima ha de hacerse extensiva a aumentar la eficiencia del agua de riego en la infraestructura hidroagrícola ya existente y también, a propiciar que el ciclo del agua de lluvia de las cuencas y microcuencas manejadas agrícolamente aproxime en lo posible a la eficiencia del ecosistema no perturbado. Es necesario invertir para corregir el “acondicionamiento diferido” en la infraestructura hidroagrícola existente y en su manejo, para elevar significativamente la eficiencia del agua de riego.

La funcionalidad de la mayor fracción de la infraestructura hidroagrícola de México es puesta en entredicho por la proyección de una menor precipitación en su mitad norte durante el presente siglo XXI, con su concomitante restricción de agua en las presas. También se predice que por el calentamiento de la atmósfera, los cultivos demandarán mayores láminas de riego, lo que podrá conducir al abandono de aquellas áreas de riego donde el recurso sea limitado y aprovechado ineficientemente. Incrementar de manera significativa la eficiencia del riego es la estrategia con máxima prioridad para proteger la funcionalidad de este recurso.

conduction losses from the dam and water application on the plot, the lack of investment to condition the pressurized irrigation system.

Agricultural strategies to address climate change

Adaptations in the infrastructure and operation of the field

Increase the availability of water for crops. There is global consensus that the best adaptation to climate change for countries that have reserves of fresh water and arable land is the increase in the area under irrigation (Morton, 2007). This maxim must be extended to increase the efficiency of irrigation water in the existing irrigation infrastructure and also to promote the cycle of rainwater basins and micro-managed agriculturally approach as possible to the efficiency of the ecosystem undisturbed. Investment is needed to correct the "deferred conditioning" in the existing irrigation infrastructure and management, to significantly increase the efficiency of irrigation water.

The functionality of the larger fraction of the irrigation infrastructure of Mexico is challenged by the projection of lower precipitation in the northern half during this century, with its concomitant restriction of water in dams. It also predicts that by warming, crops demand higher irrigation levels, which may lead to the abandonment of irrigation areas where the resource is limited and inefficiently exploited. Significantly increase irrigation efficiency is the top priority strategy to protect the functionality of this resource.

Additionally, Mexico has in its south-east, significant reserves of fresh water, agricultural land quality region, belonging to agroecosystems and mild weather in the autumn-winter (Turrent *et al.*, 2004a) agricultural cycle. In it 67% of the total runoff occurs, almost unused for irrigation (Anónimo, 1988). The authors of this study estimate that the use of 60% of those runoffs, applied in 2/3 of the arable land currently underutilized agricultural quality, double the total area under irrigation in the country.

In point of time, there are options to enhance the availability of water for crops *ia*, a) protect the soil against water erosion; b) increasing infiltration of rainwater; c) perform works for "rainwater harvesting"; and d) protect the contents of soil organic matter. Such actions would recognize agricultural typological differences of Mexico. For its limitation on land

Adicionalmente, México tiene en su región sur-sureste, reservas significativas de agua dulce, de tierras de calidad agrícola, ya pertenecientes al agroecosistema y de clima benigno en el ciclo agrícola otoño-invierno (Turrent *et al.*, 2004a). En ella ocurre 67% del escurrimiento total, casi sin uso para el riego (Anónimo, 1988). Los autores de este ensayo estiman que el aprovechamiento de 60% de esos escurrimientos, aplicado en 2/3 de la tierra de labor de calidad agrícola actualmente subaprovechada, duplicaría la superficie total bajo riego del país.

En el apartado de temporal, hay opciones para reforzar la disponibilidad de agua para los cultivos *ia*, a) proteger al suelo contra la erosión hídrica; b) incrementar la infiltración del agua de lluvia, c) realizar obras para “cosechar agua de lluvia”; y d) proteger el contenido de materia orgánica del suelo. Tales acciones habrían de reconocer las diferencias tipológicas agrícolas de México. Por su limitación en el recurso tierra, la agricultura campesina requiere tecnologías multiobjetivo, que incorporen por lo menos a) el incremento significativo del ingreso familiar; b) la protección contra la erosión del suelo; c) la diversificación perenne-anual de cultivos y rotación de anuales; y d) su acceso a los servicios para la producción y mercadeo.

Por su trascendencia social y por su atraso relativo, la agricultura campesina habría de recibir la máxima prioridad. La tecnología milpa intercalada en árboles frutales es un ejemplo que satisface aquellos objetivos (Cortés *et al.*, 2007). Por su escala de operación, la tipología empresarial requiere tecnologías intensas en capital y no en mano de obra, siendo la Agricultura de Conservación un paradigma adecuado (Kassam *et al.*, 2009).

Proteger y aprovechar la diversidad fitogenética. La rica diversidad fitogenética (cultivos, y sus parientes silvestres) con que cuenta México es una poderosa herramienta de adaptación al CC y como tal, habría de protegerse y aprovecharse. Esta diversidad está asociada con la seguridad alimentaria y con la riqueza pluricultural de su cocina. Los tipos convencionales de conservación de germoplasma *in situ* y *ex situ* aunque necesarios, podrían no ser suficiente para la adaptación al CC en México. Se requiere apoyar, mejorar y estimular a la agricultura campesina que, con sus prácticas de mejoramiento genético autóctono (MGA) (Turrent y Serratos, 2004b) ha identificado y aprovechado el polimorfismo evolutivo útil de las especies domesticadas en México. La agricultura campesina cultiva cada año entre 10 y 10 genotipos diferentes de maíz, en casi 4.5 millones de hectáreas. Esta superficie incluye todas las condiciones agroclimáticas del país. Equivale a un mega

resources, peasant agriculture requires multiobjective technologies, incorporating at least a) the significant increase in household income; b) protection against soil erosion; c) the perennial-annual crop diversification and annual turnover; and d) access to services for production and marketing.

For its social significance and its relative backwardness, peasant agriculture should receive the highest priority. Intercropping fruit trees and cornfield technology is an example that meets those objectives (Cortés *et al.*, 2007). By its scale of operations, business type requires intensive technologies in capital rather than labor, with Conservation Agriculture appropriate paradigm (Kassam *et al.*, 2009).

Protect and exploit plant genetic diversity. The rich plant genetic diversity (crops and their wild relatives) that Mexico has is a powerful tool for adaptation to CC and as such should be protected and exploited. This diversity is associated with food security and the multicultural richness of its cuisine. Conventional types of germplasm conservation *in situ* and *ex situ* although necessary, may not be sufficient for adaptation to CC in Mexico. It requires support, improve and stimulate peasant agriculture with practices of indigenous genetic improvement (MGA) (Turrent and Serratos, 2004b) has identified and exploited the useful evolutionary polymorphism of species domesticated in Mexico. Peasant agriculture grows every year between 10 and 10 different genotypes of maize, nearly 4.5 million hectares. This area includes all agroclimatic conditions in the country. Equivalent to a mega genetic experiment "in parallel" in which recombination of 50 000 genes possessed the maize genome, which can only happen in Mexico occurs.

This is because the character of maize domestication center and uninterrupted process MGA made since prehistoric times by its 62 ethnic groups. Currently, this mega experiment is executed and observed by more than 2 million farmers experts in practices that make the MGA. There are probably genotypes (some unborn) combining in its genome to optimal alleles to address climate change in Mexico, which are expressed in extreme conditions. High priority is supporting this system, but above all, it is to preserve the agroecosystem occupied by native corn and agricultural farming activity in dynamic and steady progress. Finally, high priority is to protect the genetic integrity of native corn against contamination of transgenic DNA, the ban on planting in the open, the only possible protective action (Álvarez and Piñeyro, 2014).

experimento genético “en paralelo” en el cual ocurre la recombinación de 50 000 genes que posee el genoma de maíz, que sólo puede ocurrir en México.

Esto es así por su carácter de centro de domesticación del maíz y al ininterrumpido proceso de MGA realizado desde tiempos prehistóricos por sus 62 grupos étnicos. Actualmente, este mega experimento es ejecutado y observado por más de 2 millones de productores expertos en las prácticas que conforman al MGA. Probablemente existan genotipos (algunos no natos) que combinen en su genoma a los alelos óptimos para enfrentar el cambio climático en México, que se expresen en condiciones extremas. Es de alta prioridad apoyar a este sistema, pero sobre todo, lo es preservar el agroecosistema ocupado por el maíz nativo y la actividad campesina agrícola, en dinámico y constante avance. Finalmente, es altamente prioritario proteger la integridad genética del maíz nativo contra la contaminación de ADN transgénico, siendo la prohibición de su siembra a cielo abierto, la única acción protectora posible (Álvarez y Piñeyro, 2014).

Adaptaciones a la investigación agrícola en plazos corto e intermedio

Estas adaptaciones no requieren de nuevo conocimiento científico; corresponden al ámbito de la investigación aplicada “cuesta abajo”. Los alcances previstos son de utilidad transicional; sin embargo, su mérito es que pueden ser abordados de inmediato y resueltos en plazo corto o intermedio.

Ajustes a los programas de fitomejoramiento. La generación y liberación de variedades mejoradas de granos básicos en México se ha apoyado hasta ahora, en el desarrollo progresivo de germoplasmas élite, cuyas diversidades genéticas son subconjuntos de la biodiversidad total de cada una de las especies. En las variedades mejoradas que se obtienen a partir de aquellas, se favorece aún más la uniformidad sobre la diversidad genética, para superar agrónomicamente a las variedades que se han de sustituir. Esto ha funcionado bien en las condiciones agroclimáticas históricas relativamente favorables, para las cuales esas variedades fueron desarrolladas. Sin embargo, el CC impondrá esfuerzos ambientales para los que no estarán adaptadas. Es necesario hacer los ajustes metodológicos al fitomejoramiento actual, que deberá aprovechar la diversidad entre y dentro de los germoplasmas élite de cada especie.

Adaptations agricultural research in short and intermediate terms

These adjustments do not require new scientific knowledge; they fall within the scope of applied research "downhill". The scope provided are transitional utility; however, its merit is that it can be addressed immediately and resolved in the short or intermediate term.

Adjustments to breeding programs. The generation and release of improved varieties basic grains in Mexico has relied so far in the progressive development of elite germplasm, whose genetic diversities are subsets of the total biodiversity of each of the species. In improved varieties obtained from those, it further enhances the uniformity of genetic diversity to overcome agronomically varieties that must be replaced. This has worked well in the relatively favorable historical agro-climatic conditions for which those varieties were developed. However, the CC impose environmental efforts for not be adapted. It is necessary to methodological adjustments to the current plant breeding, which should benefit from the diversity between and within each species elite germplasm.

In these settings will be weighted differently to historically *ia*, a) the genetic diversity of cultivars front uniformity; b) performance under extreme conditions restricting vs performance in benign conditions; c) environments selection-alternation environmental-assessment in the process of plant breeding, where the gametic selection, the response of germplasm and their genetic diversity and environmental genetic interaction, make robust varieties and attributes necessary to cushion the CC. A procedure could be to recycle the elite germplasm each crop in various agro-climatic regions and within each other to get in the shortest possible time, improved genetic material that can tolerate moderate environmental stresses CC. The use of more radical and costly for advanced conditions CC of the second half of the century adaptations most likely be necessary.

Adjustments to the agronomic management programs. Should be considered *ia*, a) reintroducing more tolerant of environmental stresses earlier crops of CC; b) new cropping patterns; and c) changes in agricultural paradigms. These actions will complement the investment

En estos ajustes habrá que ponderar de manera diferente a la histórica *ia*, a) la diversidad genética de cultivares frente su uniformidad; b) el desempeño en condiciones limitativas extremas vs el desempeño en condiciones benignas; y c) los ambientes de selección-alternancia ambiental-evaluación en el proceso de fitomejoramiento, donde la selección gamética, la respuesta del germoplasma y su diversidad genética, así como la interacción genético ambiental, permitan desarrollar variedades robustas y con atributos necesarios para amortiguar el CC. Un procedimiento podría ser el de reciclar los germoplasmas élite de cada cultivo en varias regiones agroclimáticas, dentro y entre si, para obtener en el menor plazo posible, materiales genéticos mejorados que toleren las tensiones ambientales moderadas del CC. Muy probablemente será necesario el recurso de adaptaciones más radicales y costosas para las condiciones avanzadas del CC de la segunda mitad del siglo.

Ajustes a los programas de manejo agronómico. Habrá que considerar *ia*, a) la reintroducción de cultivos más tolerantes a las tensiones ambientales tempranas del CC; b) nuevos patrones de cultivo; y c) cambios en paradigmas agrícolas. Estas acciones habrán de complementar la inversión para corregir el acondicionamiento hasta ahora diferido en riego y en temporal, previamente citado en este ensayo, y para acondicionar las reservas de tierras de labor y de agua dulce del país. Por su importancia social, la agricultura en pequeño de laderas es de la mayor importancia para la seguridad alimentaria de México. Aquella se dedica principalmente a la siembra de granos básicos bajo monocultivo, estando desprotegida de la erosión hídrica.

Según Turrent y colaboradores (2014, pág. 1534), de casi 6 millones de hectáreas (mdha) cultivadas con maíz de temporal en México, 1.4 mdha son laderas con suelos profundos y más de 2.3 mdha son laderas con suelos someros. Obviamente, este recurso de la Nación debe ser protegido contra la erosión, mientras se le maneja de manera sostenible para la producción de alimentos en el CC. El INIFAP y el COLPOS están desarrollando una tecnología multiobjetivo para el manejo agrícola sustentable de laderas bajo temporal benigno, destinado a las pequeñas unidades de producción. Por su diseño, esta tecnología protege el suelo contra la erosión, disminuye el escurrimiento del agua de lluvia, protege la materia orgánica del suelo, incrementa de manera significativa el ingreso familiar y la fijación de carbono atmosférico. Todos éstos son atributos centrales para enfrentar el CC. Esta tecnología, conocida como milpa intercalada en árboles frutales (MIAF) (Cortés *et al.*, 2007) ha de ser adicionalmente adaptada a la diversidad agroclimática total del país.

to correct conditioning so far delayed on irrigation and temporary, previously cited in this essay, and to condition the reserves of arable land and freshwater in the country. For its social importance, of agriculture in small hillside it is of utmost importance for food security in Mexico. That is mainly engaged in planting basic grains under monoculture, being unprotected from water erosion.

According Turrent *et al.* (2014), nearly 6 million hectares (mdha) cultivated with rainfed maize in Mexico, 1.4 mdha are slopes with deep soils and more than 2.3 mdha are slopes with shallow soils. Obviously, this resource of the Nation must be protected against erosion, while being managed sustainably for food production in the CC. The INIFAP and COLPOS are developing a multi-objective technology for sustainable agricultural management slopes foster benign, intended for small production units. By design, this technology protects the soil from erosion, reduces rainwater runoff, protect soil organic matter, and significantly increase household income and fixation of atmospheric carbon. All these attributes are central to face the CC. This technology, known as interleaved cornfields in fruit trees (MIAF) (Cortés *et al.*, 2007) must be further adapted to the total agro-climatic diversity.

Adaptations to long-term agricultural technology

The list of new technological knowledge required, is a complex task because it involves scientific knowledge not yet available. Your solution will be expensive and long-term (25-50 years) (Cox *et al.*, 2006) and requires a significant concentration of specialized human resources and infrastructure. This path of development of knowledge, treading unexplored scientific territory, is typical strategic research "uphill". We discuss two examples of corn, one on genetic tolerance to environmental stress and another on the character of perennity.

Murray (2014) continued for 9 generations seeking perennity, without success fully. The combination of summers and winters prevented the survival of their materials, while both wild relatives themselves behaved as perennials. Murray and Jessup (2014) also report progress on the genetics pioneers of the sustainability of the wild relatives of maize made by Westerbergh and Doebley, two QTL (Quantitative Trait locii) involved in the development of the rhizomes of *Z. diploperennis*. Finally, Murray and Jessup (2014) authors point out that

Adaptaciones a la tecnología agrícola a plazo largo

El listado de nuevos conocimientos tecnológicos requeridos, conforma una tarea compleja porque involucra conocimientos científicos todavía no disponibles. Su solución será cara y de plazo largo (25 a 50 años) (Cox *et al.*, 2006) y requiere una concentración significativa de recursos humanos y de infraestructura especializados. Este camino de desarrollo del conocimiento, que pisa territorio científico poco explorado, es investigación estratégica típica “cuesta arriba”. Analizaremos dos ejemplos sobre el maíz, uno sobre tolerancia genética a tensiones ambientales y otro sobre el carácter de perennidad.

Murray (2014) continuó durante 9 generaciones la búsqueda de perennidad, sin lograrlo con plenitud. La combinación de veranos e inviernos crudos impidieron la sobrevivencia de sus materiales, mientras ambos parientes silvestres sí se comportaron como perennes. Murray y Jessup (2014) también reportan avances pioneros sobre la genética de la perennidad de los parientes silvestres del maíz logrados por Westerbergh y Doebley: dos QTL (quantitative trait locii) que participan en el desarrollo de los rizomas de *Z. diploperennis*. Finalmente, los autores Murray y Jessup (2014) señalan que las condiciones para perennidad del maíz incluyen 1) no senescer al final del ciclo; 2) acumular energía en estructuras resistentes a la degradación fuera del ciclo verde; 3) capacidad de removilizar la energía acumulada al inicio del ciclo verde; 4) tener capacidad para alternar entre los desarrollos vegetativo y reproductivo; 5) resistencia a enfermedades; y 6) eficiencia en el aprovechamiento de nutrientes y del agua.

El modelo extractivista de aprovechamiento de la tierra de labor de México, en lo particular en la tierra de labor en ladera, podría ser significativamente mitigado por una tecnología de maíz perenne y por otros cultivos básicos perennes. Es necesario que la investigación agrícola de México se sume a los esfuerzos internacionales. Tanto el maíz nativo como sus parientes silvestres son nativos de México, y el maíz es y será por muchos años, nuestro alimento principal.

Conclusiones

Para recuperar su seguridad con soberanía alimentaria a lo largo del siglo XXI, México habrá de enfrentar la trilogía: incremento poblacional, cambio climático, y recursos

the conditions for sustainability of corn include 1) not senesce the end of the cycle; 2) accumulate energy in structures resistant to degradation outside the green cycle; 3) ability to remobilize accumulated at the beginning of green energy cycle; 4) be able to switch between vegetative and reproductive development; 5) disease resistance; and 6) efficiency in the use of nutrients and water.

The extractive model of land use labor of Mexico, in particular arable land in hillside, could be significantly mitigated by technology perennial perennial corn and other staple crops. It is necessary for agricultural research in Mexico will join international efforts. Both the native corn as their wild relatives are native to Mexico and corn is and will be for many years, our main food.

Conclusions

To regain its sovereignty food security throughout the century XXI, Mexico will have to face the trilogy: population growth, climate change, and degraded natural resources. Successfully accomplish this task is only possible if the country gives priority to the field and develop new agricultural technologies urgency to face the new challenges of sustainable food production.

Much of the agricultural technologies developed so far in Mexico, will be obsolete before the imminent changes in higher frequencies of droughts and extreme temperatures. The availability of water for crops and their genetic tolerance to biotic stresses and abiotic extreme are the key variables. You need to incorporate reserves of arable land and fresh water available to the country in food production.

It is urgent to formulate and implement a plan for the sustainable use of resources and development of agricultural knowledge medium (5 to 15 years) and long (20 to 40 years) terms. The first to develop transition technologies to produce food and second, to produce in acute manifestations of climate change. The latter involves scientific knowledge still barely available.

End of the English version



naturales degradados. Lograr con éxito esta tarea solo será posible si el país concede prioridad al campo y desarrolla con urgencia nuevas tecnologías agrícolas para enfrentar los nuevos retos de la producción sustentable de alimentos.

Gran parte de las tecnologías agrícolas desarrolladas hasta ahora en México, serán obsoletas ante los cambios inminentes de mayores frecuencias de sequías y de temperaturas extremas. La disponibilidad de agua para los cultivos y su tolerancia genética a las tensiones bióticas y abióticas extremas serán las variables clave. Es necesario incorporar las reservas de tierra de labor y de agua dulce con que cuenta el país, a la producción de alimentos.

Es urgente formular e instrumentar un plan de aprovechamiento sustentable de recursos y de desarrollo de conocimiento agrícola a plazos mediano (5 a 15 años) y largo (20 a 40 años). El primero para desarrollar tecnologías de transición para producir alimentos y el segundo, para producirlos en las manifestaciones agudas del cambio climático. Este último involucra conocimiento científico aun escasamente disponible.

Literatura citada

- Ahmed S. A.; Diffnbaugh, N. S. and Hertel, T. W. 2009. Climate volatility deepens poverty vulnerability in Developing Countries. *Environmental Research Letters*. 4(3):034004.
- Ainsworth, E. A. and Ort, D. R. 2010. How do we improve Crop production in a warming world? *Plant Phys*. 154(2):526-530.
- Álvarez-Buylla, E. R. y Piñeyro-Nelson, A. 2013. El maíz en peligro ante los transgénicos: un análisis integral sobre el caso de México. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad. 568 p.
- Anónimo. 1988. Agua y sociedad: una historia de las obras hidráulicas en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). México, D. F. 299 p.
- Arreguín-Cortés, F. I.; Martínez-Austria, P. F. y Trueba-López, V. 2004. El agua en México, una visión institucional. *In*: Jiménez, E. L. y Marín, E. I. (Eds.). El agua en México vista desde la academia. Academia Mexicana de Ciencias. México, D. F. 251-270 pp.
- Botello, C.; Wade, L.; Cox, S.; Pogna, N.; Brazzini, A. and Chaptain, J. (Eds.) 2013. Perennial crops for food security. Proceedings of the FAO expert workshop. Rome, Italy. 410 p.
- CONAPO. 2016. Proyecciones de la población nacional 2010-2050. <http://www.conapo.gob.mx/es/conapo/proyecciones>.
- Conde, C.; Ferrer, R. M.; Gay, C. y Araujo, R. 2004. Impactos del cambio climático en la agricultura en México. *In*: cambio climático, una visión desde México. Martínez J. y Fernández, E. (Comps.). Instituto Nacional de Ecología (INE). México, D. F. 227-238 pp.
- Cortés-Flores, J. I.; Turrent-Fernández, A.; Díaz-Vargas, P.; Claro-Cortés, P.; Hernández-Romero, E.; Aceves-Ruiz, E. y Mendoza-Robles, R. 2007. La milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), una tecnología multiobjetivo para las pequeñas unidades de producción. *In*: desarrollo agropecuario, forestal y pesquero. Calva, J. (Coord.). Editorial M. A. Porrúa. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Cámara de Diputados, México, D. F. 100-116 pp.
- Cox, T. S.; Glover, J. D.; Van Tassel, D. L.; Cox, C. M. and DeHaan, L. R. 2006. Prospects for developing perennial grain crops. *Biosc*. 56:649-659.
- Cox, T. S.; Van Tassel, D. L.; Cox, C. M. and De Haan, L. R. 2010. Progress in breeding perennial grains. *Crop Pasture Sci*. 61:513-521.
- Dehaan, L. R.; Wang, S.; Larson, S. R.; Cattani, D. J.; Zhang, X. and Viinanen, T. 2014. *In*: Botello, C.; Wade, L.; Stan, C. N. P.; Bozzini, A. and Choptiany, J. (Eds.). Perennial crops for food security. Proceedings of the FAO Expert Workshop held on august 20-30, 2013. Rome Italy. 72-89 pp.
- Del Toro Morales, J. A. 2012. Memoria documental del programa modernización sustentable de la agricultura tradicional 2010 - 2012. Dirección General de Producción y Desarrollo Tecnológico. Sagarpa. México, D. F. <http://www.sagarpa.gob.mx/irc/memorias20documentales/>.
- Dobleman, F. G. and Long, S. P. 2009. More productive than maize: how does *Micanthus* do it? *Plant Physiol*. 150:2104-2115.
- Easterling, D. R.; Meehl, G. A. C.; Parmesan, S. A.; Changnon, T.; Carl, R. and Mearns, L. O. 2000. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Sci*. 289(5487):2068-2074.
- FAO. 2013. Perennial crops for food security. Proceedings of the FAO experts workshop. 28-30. Rome, Italy.
- Glover, J. D.; Cox, C. M. and Reganold, J. P. 2007. Future farming: a return to roots? *Scientific American*. 67-73.
- Glover, J. D.; Reganold, J. P.; Bell, L. W.; Borevitz, J.; Brummer, E. C.; Buckler, E. S.; Cox, C. M.; Cox, T. D. S.; Crews, T. E.; Culman, S. W.; De Haan, L. R.; Eriksson, D.; Gill, B. S.; Holland, J.; Hu, F.; Hulke, B. S.; Ibrahim, A. M. H.; Jackson, W.; Jones, S. S.; Murray, S. C.; Paterson, A. H.; Pluschuk, E.; Sacks, S.; Snapp, Tao, E. J.; Van Tassel, D. L.; Wade, L. J.; Wyse, D. L. and Xu, Y. 2010a. Increased food and ecosystem security via perennial grains. *Science* 328:1638-1639.
- Glover, J. D.; Culman, S. W.; Dupont, S. T.; Browsersard, W.; Young, L. and Mangan, M. E. 2010b. Harvested perennial grasslands provide ecological benchmarks for sustainability. *Agric. Ecosyst. Environ*. 137:3-12.
- González, A. I.; Turrent, F. A. y Avelaño, S. R. 1991. Las provincias agronómicas de la tierra de labor bajo temporal en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). México, D. F. 133 p.
- Jenks, M. A.; Hasegawa, P. M. and Mohan, J. S. 2007. Advances in molecular breeding toward drought and salt tolerant crops. Springer, Dordrecht. The Netherlands.
- Hertel, T. W. and Rosch, S. R. 2010. Climate change, agriculture, and Poverty. *Appl. Econ. Perspect Pol*. 1-31 pp.
- IPCC Working Group I. 2013. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change 2013. Stocker, T. I.; Qin, D.; Plattner, G. K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Buschung, J.; Navels, A.; Xia, Y.; Bex, V. and Migley, P. M. (Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, N.Y. USA.

- Kassam, A.; Friedrich, T.; Shaxson, F. and Pretty, J. 2009. The spread of conservation agriculture: justification, sustainability and uptake. *Int. J. Agric. Sust.* 7(4):292-320.
- Montesillo, C. J. L. 2006. Precio del agua para riego en México en un contexto de eficiencia social. *Ingeniería Hidráulica en México.* 21(4):125-133.
- Morton, J. F. 2007. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *PNAS.* 104(50):19680-19685.
- Murray, S. C. and Jessup, R. W. 2014. Breeding and genetics of perennial maize: progress, opportunities and challenges. *In: Botello, C.; Wade, L.; Cox, S.; Pogna, N.; Bozzini, A. and Choptiany, J. (Eds.). Perennial crops for food security. Proceedings of the FAO Expert Workshop held on august 20-30, 2013. Rome Italy.* 103-111 pp.
- Ort, D. R.; Zhu, X. and Melis, A. 2011. Optimizing antenna size to maximize photosynthetic efficiency. *Plant Physiol.* 155:79-85.
- Paterson, A. H.; Cox, T. S.; Kong, W. and Navarro, M. 2014. Viewpoint: multiple-harvest sorghums toward improved food security. *In: Botello, C.; Wade, L.; Cox, S.; Pogna, N.; Bozzini, A. and Choptiany, J. (Eds.). Perennial crops for food security. Proceedings of the FAO Expert Workshop held on august. Rome Italy.* 90-102 pp.
- Pimentel, D.; Cerasale, D.; Stanley, R. C.; Perlman, R.; Newman, E. M.; Brent, L. C.; Mullan, A. and Thai-I, Ch. D. 2012. Annual vs perennial grain production. *Agric. Ecosys. Environ.* 161:1-9.
- Randall, G. M.; Huggins, D. R.; Ruselle, M. P.; Fucks, D. J.; Nelson, W. W. and Anders, J. L. 1997. Nitrate losses through subsurface tile drainage in conservation research programs, alfalfa and row crops systems. *J. Environ. Qual.* 26:1240-1247.
- Roberts, M. J. and Scenker, W. 2010. Is agricultural production becoming more or less sensitive to extreme heath? Evidence from US corn and soybean yields. *NBER Working Paper No.16308.*
- Rosenzweig, C. and Liverman, D. 1992. Predicted effects of climate change on agriculture: A comparison of temperate and tropical regions. *In: global climate change: implications, challenges, and mitigation measures, ed. Majumdar, S. K.* 342-361. The Pennsylvania Academy Sciences.
- Tilman, D. R.; Scolow, J.; Foley, A.; Hill, J.; Larson, E.; Lynd, L.; Pacala, S.; Reilly, J.; Searchinger, T.; Somerville, C. and Williams, R. 2009. Beneficial, biofuels-the food energy, and environmental trilemma. *Science.* 325(5938): 270-271.
- Tinoco-Rueda, J. A.; Gómez-Díaz, J. D. y Monterroso, R. A. I. 2011. Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoam.* 29(2):161-168.
- Tubiello, F. N. and Rosenzweig, C. 2008. Developing climate change impact metrics for agriculture. *The Integrated Assessment Journal* 8(1):165-184.
- Turrent, F. A. 1986. Estimación del potencial productivo actual de maíz y de frijol en la República Mexicana. *Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Chapingo, Estado de México.* 165 p.
- Turrent, F. A.; Camas, G. R.; López, L. A.; Cantú, A.; Ramírez, S. M.; Medina, M. J. y Palafox, C. A. 2004a. Producción de maíz bajo riego en el Sur-Sureste de México: II. Desempeño financiero y primera aproximación tecnológica. *Agric. Téc. Méx* 30(2):205-221.
- Turrent, A. and Serratos, J. A. 2004b. Context and background on maize and its wild relatives in Mexico. *In: the effects of transgenic maize in Mexico.* www.cec.org/storage/53/4534_maize-biodiversity-chapter1_en.pdf.
- Turrent, F. A. 2005. Plan estratégico para expandir la producción de granos a niveles superiores a la demanda. *In: Calva, J. L. (Ed.). Desarrollo agropecuario, forestal y pesquero. Agenda para el Desarrollo.* 9:179-198.
- Turrent, F. A.; Timothy, A. W. y Garvey, E. 2012a. Factibilidad de alcanzar el potencial productivo de maíz en México. *Mexican rural development research reports. Woodrow wilson international center for scholars.* 36 p. <http://www.ase.tufts.edu/gdae/pubs/wp/12-03turrentmexmaize.pdf>.
- Zavala, J. A.; Casteel, C. L.; De Lucía, E. H. and Berenbaum, M. R. 2008. Anthropogenic increase in carbon dioxide compromises plant defense against invasive insects. *Proceedings of the national academy of sciences.* 105(13):5129-5133.
- Zhang, Y.; Li, Y.; Jiang, L.; Tian, C.; Li, J. and Xiao, Z. 2011. Potential of perennial crop on environmental sustainability of agriculture. *Procedia Environ. Sci.* 10:1141-1147.
- Zhang, S.; Wang, W.; Zhang, J.; Zhang, T.; Huang, W.; Xu, P.; Tao, D.; Fu, B. and Hu, F. 2014. The progression of perennial rice breeding and genetics research in China. *In: Botello, C.; Wade, L.; Cox, S.; Pogna, N.; Bozzini, A. and Choptiany, J. (Eds.). Perennial crops for food security. Proceedings of the FAO Expert Workshop held on august. Rome Italy.* 27-38 pp.