

CAMBIO CLIMÁTICO, ENSALITRAMIENTO DE SUELOS Y PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN ÁREAS DE RIEGO

Climate Change, Soil Salinity and Crop Production in Irrigation Areas

Leonardo Pulido Madrigal^{1‡}

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso. 62550 Jiutepec, Morelos, México.

[‡] Autor responsable (lpulido@tlaloc.imta.mx)

RESUMEN

Se analizó el impacto del clima en los problemas de salinidad, drenaje y producción agrícola en el Distrito de Riego 038 río Mayo Sonora el cual presenta afectaciones por sales en 32% de su superficie. Con datos de clima y agronómicos generados entre 1970-2001, se elaboraron modelos de regresión lineal simple para estudiar la relación entre la superficie ensalitrada con la temperatura ambiente, superficie afectada por niveles freáticos superficiales, volumen de riego, salinidad del agua de riego, precipitación pluvial, producción agrícola y productividad del agua. Asimismo, se correlacionó el manto freático con la temperatura, volumen de riego y precipitación pluvial. La producción se correlacionó con la salinidad del suelo, temperatura ambiente, superficie afectada por niveles freáticos superficiales y volumen de riego. Además, por medio de modelos de regresión lineal múltiple se determinaron las relaciones tanto de la superficie ensalitrada como de la producción agrícola, con la temperatura, superficie afectada por niveles freáticos superficiales, volumen de riego, superficie cosechada y precipitación pluvial. Los resultados evidenciaron que el aumento de superficie ensalitrada está relacionado con el incremento de temperatura; mismo que se asoció con la disminución del volumen de cosechas y con el aumento de superficie con niveles freáticos. Se encontró que los volúmenes de riego impactan en el incremento de la superficie agrícola con niveles freáticos someros y con el aumento de superficie ensalitrada. Con el calentamiento global los problemas de salinidad del suelo se incrementaron entre 24.1 y 15.8% en los estratos de suelo a 30 y 60 cm de profundidad, respectivamente. Asimismo, se estimó un crecimiento del 21.9% de superficies con niveles freáticos superficiales. El impacto del calentamiento

global en el volumen de producción agrícola se estimó en una reducción del 18.9% del volumen de cosechas.

Palabras clave: distrito de riego; calentamiento global; drenaje; temperatura; precipitación pluvial; volumen de riego.

SUMMARY

The impact of climate on problems of salinity, drainage and crop production in Irrigation District 038 Rio Mayo, Sonora, affected by salts in 32% of its area, is analyzed. With climate and agronomic data generated between 1970 and 2001, simple linear regression models were developed to study the relationship of the salinized areas to temperature, area affected by superficial water table levels, irrigation water volume and salinity, rainfall, crop production and water productivity. In addition, water table level was correlated with temperature, irrigation water volume and rainfall. Crop production was correlated with soil salinity, environmental temperature, areas affected by superficial water table and volume of irrigation water. Moreover, multiple regression models determined the relationships of area affected by salinity and agricultural production to temperature, area affected by superficial water table levels, irrigation volume, area harvested and rainfall. The results showed that the increase in salinized area is related to an increase in temperature, leading to reduced yields and increased area with water table levels. It was found that there is an impact of irrigation volumes on the rising water table levels and the increase of salinity-affected areas. There was an increase of affected areas of 24.1 and 15.8% in 0-30 and 30-60 cm depths, respectively, because of global warming. Also, an increase of 21.9% in drainage affected areas was estimated. Because of

Como citar este artículo:

Pulido Madrigal, L. 2016. Cambio climático, ensalitrado de suelos y producción agrícola en áreas de riego. Terra Latinoamericana 34: 207-218.

Recibido: octubre de 2015. Aceptado: enero de 2016.

Publicado en Terra Latinoamericana 34: 207-218:

global warming a reduction of 18.9% of the agricultural production was estimated.

Index words: *irrigation district; global warming; drainage; temperature; rainfall; irrigation volume.*

INTRODUCCIÓN

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencia los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de glaciares, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007 citado por Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). Se estima que para el periodo 2061-2090 en el estado de Sonora la temperatura media aumentará entre 3.5 y 3.7 °C y la precipitación pluvial decaerá 21% (Montero *et al.*, 2010). Diversos estudios de impactos del cambio climático basados en respuestas biofísicas de los cultivos indican que podría provocar repercusiones adversas en la agricultura (Ojeda *et al.*, 2010).

El crecimiento de las plantas y su rendimiento dependen de la temperatura promedio y de las temperaturas extremas, y varían para cultivos con diferente ruta fotosintética. La amplitud óptima para los cultivos C₃ está entre 15 y 20 °C y para cultivos C₄, entre 25 y 30 °C; para cultivos CAM una temperatura nocturna de 10 a 20 °C es óptima. Para cultivos anuales, una temperatura más alta acelera el desarrollo acortando el periodo de crecimiento y reduciendo el rendimiento, si el acortamiento del periodo de desarrollo no está plenamente compensado por un rápido aumento de una temperatura más alta (Reilly, 1996; Luo, 2011).

El clima es el principal factor que afecta la tolerancia de los cultivos a las sales. La mayoría de los cultivos pueden tolerar altos niveles de estrés a la salinidad si el clima es frío y húmedo en comparación con uno cálido y seco (Rhoades, 1990).

Existe un problema de salinidad cuando las sales se acumulan en la zona radical a una concentración tal que ocasiona pérdidas en la producción agrícola (Maas, 1990; Grieve *et al.*, 2012). El rendimiento de los cultivos disminuye cuando el contenido de sales en la solución del suelo no permite que estos extraigan suficiente agua de la zona radical, provocando así un estado de escasez de agua en las plantas por un tiempo significativo (Ayers y Westcot, 1987).

Los suelos afectados por sales son componentes naturales de los paisajes áridos. Su presencia se debe a una limitada precipitación, es decir, la evaporación excede a la precipitación durante la mayor parte del año (Richards, 1974). En las regiones áridas el lavado y transporte de sales solubles al océano no es tan completo como ocurre en las regiones húmedas; por lo que normalmente en regiones áridas el lavado es de naturaleza local y las sales solubles no pueden ser transportadas lejos. Esto ocurre no solamente porque hay menos precipitaciones pluviales disponibles para lavar y transportar las sales, sino también a consecuencia de la elevada evaporación característica de un clima árido, que tiende además a concentrar las sales en los suelos y en el agua superficial (Richards, 1974). En términos generales, las causas potenciales o fuentes de excesos de sales incluyen agua de riego salina, inadecuado drenaje, sales del suelo nativas, y procesos continuos de inundación y evaporación (Rhoades, 1990).

Después de más de 50 años de operación, el distrito de riego (DR) 038 río Mayo, Sonora, está considerado como uno de los que tienen mayores problemas de salinidad y drenaje en suelo a nivel nacional, ya que aproximadamente 32% de su superficie presenta afectaciones (De la Peña, 1993; Pulido *et al.*, 2009). En orden de importancia, las causas que dan origen al problema de salinidad y de manto freático superficial en este DR son: los métodos de riego ineficientes, el mantenimiento deficiente de la red de drenaje, las pérdidas de agua por conducción, la falta de capacitación de usuarios, las condiciones de topografía, la ubicación y condiciones de descarga de la red de drenaje, la calidad del agua de riego y la intemperización química de los materiales terrestres, es decir minerales que son constituyentes de rocas y suelos (Tanji, 1990; Pulido *et al.*, 2009).

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Estudiar la relación que tienen con la salinidad del suelo y con la producción agrícola, el calentamiento global a través de la temperatura ambiente, precipitación pluvial, niveles freáticos superficiales, volumen de agua de riego y salinidad del agua de riego en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, durante el periodo 1970-2001. 2) Determinar el impacto en términos de incrementos de superficie ensalitrada y de disminución del volumen de producción agrícola, de la temperatura ambiente, precipitación pluvial, niveles freáticos superficiales,

volumen de agua de riego y salinidad del agua de riego en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, durante el periodo 1970-2001.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y Condiciones Físicas del Área de Estudio

La presente investigación se llevó a cabo con datos de superficie ensalitrada, superficie con un nivel freático superficial, volumen de producción agrícola, superficie de cultivo, volumen de agua de riego, concentración de sales en agua de riego, temperatura ambiente y precipitación pluvial, obtenidos en el intervalo 1970-2001 en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, México. En este tiempo se realizaron en el DR 038 estudios de salinidad y drenaje, mismos que fueron suspendidos a partir de 2001. Los estudios muestran variaciones temporales y espaciales en las áreas afectadas por salinidad y niveles freáticos superficiales, por lo cual es necesario analizar la relación que tienen estas variables con la temperatura y precipitación pluvial así como con variables relacionadas con la salinidad del suelo; como son la salinidad del agua de riego y el volumen de riego. Además, en el periodo de tiempo señalado se requiere investigar la relación entre la producción agrícola con la salinidad del suelo, temperatura, precipitación pluvial, volumen de riego y salinidad del agua de riego.

El DR 038 río Mayo se localiza entre los paralelos 26° 21' y 28° 31'N y meridianos 108° 26' y 110° 05', con una altura media de 40 m. El DR queda comprendido en los municipios de Navojoa, Etchojoa y Huatabampo, en el sur del estado de Sonora; tiene una superficie bruta de 112 489 ha y de riego de 96 951 ha, la cual es regada por gravedad con agua de la presa Adolfo Ruiz Cortines, y con agua de bombeo de pozos. Su clima es estepario semiárido, con precipitación media anual de 388 mm, temperatura media anual de 21.4 °C, y evaporación media anual de 2222 mm (Reyes, 1994). El área que constituye la zona de riego se integra a la planicie costera del noroeste de la República Mexicana, con suelos sensiblemente planos con pendientes menores del 1%. Su altitud oscila entre 2 y 50 metros sobre el nivel medio del mar.

En el área del DR están identificadas 10 series de suelo (Reyes, 1994). Con excepción de la serie Camoa, todas las series presentan problemas de

salinidad; se observa en el subsuelo un estrato salino-sódico (50-90 cm), con salinidad (CE) > 4 dS m⁻¹ y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) mayor que 15%. Asimismo, con excepción de las series Navojoa y Camoa las restantes tienen también las características de presentar manto freático superficial. Los suelos en su mayoría presentan pH alto; el contenido de materia orgánica es menor al 1% (Reyes, 1994).

Obtención de Información sobre Salinidad, Drenaje, Clima, Hidrométrica y de Calidad del Agua de Riego

Los datos para llevar a cabo el presente análisis se obtuvieron tanto de las oficinas del DR, como de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego del Río Mayo (S. de R. L.), y se reunieron datos de estudios de salinidad y freatimetría realizados entre 1965 y 2001. Además, se tomaron datos de hidrometría sobre volúmenes de riego, superficies de siembra, rendimiento de cultivos y calidad del agua de riego. Igualmente, se tuvieron entrevistas con técnicos del DR y de la S. de R. L., las cuales permitieron profundizar en el conocimiento de los problemas de salinidad y drenaje. Se consultaron informes de proyectos de salinidad y drenaje llevados a cabo por personal técnico del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en este DR y en otros distritos del noroeste del país (IMTA, 1997; Pulido *et al.*, 2003, 2010).

Estudios de Salinidad y de Profundidad al Nivel Freático Practicados en el Distrito de Riego

Entre 1971-2001 se reportaron 11 estudios de salinidad que contienen mapas con la distribución espacial de las áreas afectadas por salinidad y sodio. Los estudios hasta 1985 consistieron en tomar muestras de suelo por estratos hasta una profundidad de entre 60 y 120 cm; para cada muestra de suelo se analizó en el laboratorio la salinidad (conductividad eléctrica, dS m⁻¹) y se obtuvo el PSI excepto en 1996 y 2001; en estos años se cartografió la salinidad en el estrato a 60 cm por medio de imágenes de satélite y un sensor electromagnético (Pulido *et al.*, 2001, 2010). En el presente trabajo se considera como suelo salino aquellos con una CE > 4 dS m⁻¹ (Richards, 1974).

Los estudios de profundidad del nivel freático superficial empezaron a realizarse en 1965; se llevaron a cabo 20 estudios hasta el año 2001. Entre 1965 y

1985 las mediciones se realizaron cada mes, en pozos distribuidos en el 46% del área del DR, donde hay más problemas de salinidad. En el lapso entre 1985 y 2001 las mediciones se hicieron en 15 de los 16 módulos de riego en que está dividido el DR. Con las monitorizaciones se elaboraron mapas mensuales de isobatas para las profundidades < 1m, 1-1.5 m, 1.5-2 m, 2-3 m y > 3 m, de acuerdo con la metodología señalada por De la Peña (1979).

Temperatura, Precipitación Pluvial, Volumen de Agua de Riego Aplicado, Salinidad del Agua de Riego y Producción Agrícola

Se utilizaron datos promedio anuales publicados entre 1969-2001, de temperatura y precipitación pluvial de la estación meteorológica del Campo Agrícola Experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicada aproximadamente en el centro geográfico del DR 038, con coordenadas geográficas 27° 00' 40.26" N y 109° 30' 03.77" O. De igual forma, los datos de clima fueron obtenidos de IMTA (2000) y a través de la Red de Estaciones Meteorológicas de Sonora (www.agroson.org.mx).

El agua de riego proviene de dos fuentes. Una es el río Mayo controlado por medio de la presa Adolfo Ruiz Cortines, cuya capacidad máxima de almacenamiento es de 1385 hm³. La otra fuente es un acuífero del que se extrae agua a través de 129 pozos profundos de los cuales anualmente se extraen 150 hm³. El agua bombeada se mezcla con el agua de los canales para riego, con lo que se complementa el suministro de agua particularmente durante el verano y en los años de menor disponibilidad en la presa. La calidad química del agua de la presa, sin restricciones para uso agrícola considerando su salinidad, ya que en promedio su conductividad eléctrica es de 0.29 dS m⁻¹. El agua subterránea exhibe un contenido medio de sales disueltas del orden de 2.24 dS m⁻¹, que la clasifican con un grado de restricción de ligera a moderada para su aprovechamiento agrícola; es por ello que se diluye con el agua de la presa para reducir la concentración de sales (Ayers y Westcot, 1987; Beltrán *et al.*, 1999).

Análisis Estadístico de los Datos

Se correlacionaron mediante modelos de regresión lineal simple la superficie afectada por sales como

variable dependiente, y como variables independientes la temperatura ambiente, superficie afectada por niveles freáticos superficiales, volumen de riego, salinidad del agua de riego, precipitación pluvial y producción agrícola. Asimismo, se correlacionó el nivel freático superficial como variable dependiente y la temperatura, volumen de riego aplicado y precipitación pluvial como variables independientes. La producción se consideró como variable dependiente de la salinidad del suelo, de la temperatura ambiente promedio, superficie afectada por niveles freáticos superficiales y volumen de agua de riego.

Se llevaron a cabo regresiones lineales múltiples para determinar la relación entre las superficies ensalitradas con la temperatura ambiente, superficie afectada con niveles freáticos superficiales, volumen de agua de riego, y precipitación pluvial; también se correlacionó el volumen de producción agrícola con la temperatura, precipitación pluvial, superficie ensalitrada, superficie con un nivel freático superficial, volumen de riego aplicado y superficie cosechada. Las variaciones registradas de las variables referidas así como su impacto en el ensalitrado del suelo en el periodo 1972-2001 se analizaron en el presente trabajo. El análisis estadístico se hizo por medio del programa Excel 2010.

RESULTADOS

Variación Temporal de la Salinidad del Suelo, Manto Freático Superficial, Temperatura, Precipitación Pluvial, Volumen de Riego y Producción Agrícola

Entre los estratos de suelo analizados en cuanto a su salinidad: 0-30, 30-60 y 60-120 cm, considerando la superficie total, en promedio en el estrato 0-30 cm se analizaron 25 578 ha (23%) con variaciones de 18 949 ha (17%) y 32 275 ha (29%); en el estrato 30-60 cm en promedio se estimaron 31 458 ha (28%) con fluctuaciones entre 21 100 ha (19%) y 42 272 ha (38%), y en el estrato 60-90 cm se promediaron 50 563 ha (45%), con variaciones de 25 760 ha (23%) a 78 640 ha (70%). Los porcentajes están referidos a la superficie total (Figura 1). Los datos registrados en todos los estratos dan un promedio general de superficie ensalitrada equivalente al 32% del área total del DR. Los valores de superficie afectada más altos, superiores a 35 000 ha en los tres estratos, se registraron en el periodo 1975-1980, y en el año 1996.

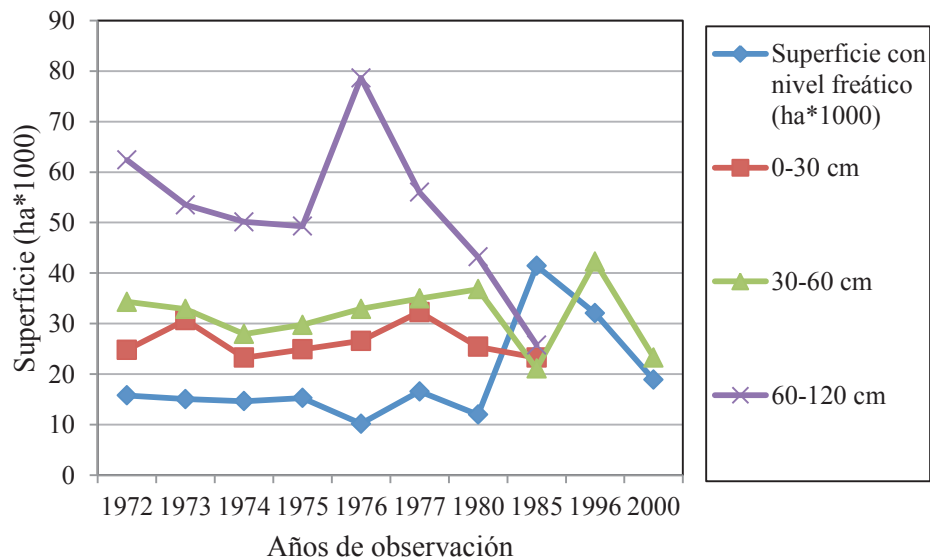


Figura 1. Variación media anual de la superficie ensalitrada en tres estratos de suelo y de la superficie con niveles freáticos superficiales, registrados durante el periodo 1972-2001 en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, México.

Cabe observar que en todos los estudios de salinidad se encontraron variaciones en los resultados. Es así que en el estrato de 0-30 cm se estimó una desviación estándar (DESV) de 3996 ha y un coeficiente de variación (CV) del 16%; en el estrato a 30-60 cm la DESV resultó de 6020 ha, con un CV del 19%; en el estrato 60-120 cm la DESV fue de 15 189 ha y el CV fue del 30%. Las afectaciones por salinidad en los 3 estratos presentan diferencias estadísticas significativas con 95% de confianza, ya que el valor de F calculado de 17.26 resultó mayor que el valor límite de F de 3.40. Estas variaciones probablemente se debieron a las diferentes condiciones de las variables temperatura, precipitación pluvial, volumen de agua de riego aplicado y superficie afectada por un nivel freático superficial, que se observaron en ambos años; por ejemplo en el año de 1976 se tuvo una temperatura más baja y una menor precipitación pluvial que en 1996.

La superficie anual promedio de afectación por un nivel freático superficial (< 1.5 m) fue de poco más de 6000 ha durante 1965, 1975 y 1980; en contraste en 1985 resultó cercana a 41 500 ha, siete veces mayor que en aquellos tres años anteriores (Figura 1). La superficie media anual afectada por un nivel freático superficial resultó de 20 225 ha para el periodo 1970-2001, con valores mínimos y máximos de 8400 ha (8%) en 1971 y 41 431 ha (37%) en 1985. Con los datos de superficie con nivel freático superficial de los 20 estudios consultados, se obtuvo una DESV de 10 016 ha y un

CV del 48%; y con los datos de superficies afectadas dentro del periodo de temperaturas más altas que comprenden los años 1992-2001, la DESV resultó de 24 628 ha y el CV del 24%.

Durante el periodo 1981-1999 se estimaron las mayores afectaciones históricas por niveles freáticos superficiales que se hayan inventariado en el DR; los meses con mayores problemas fueron febrero y marzo, que también fueron los meses en los que se aplicaron mayores volúmenes de agua para riego. En un análisis de regresión lineal simple con datos del periodo 1971-1996 se encontró una correlación entre la superficie ensalitrada como variable dependiente y la superficie con un nivel freático superficial como variable independiente; los estadísticos $R^2 = 0.89$ y un valor de F calculado de 48.02 significativo con $\alpha = 0.05$, muestran que los niveles freáticos superficiales explicaron en un 89% el ensalitrado del suelo en el estrato 0-30 cm de profundidad.

En el lapso de 1970-2001, la temperatura y la precipitación pluvial tuvieron valores medios de 18.4 °C y 415 mm, respectivamente. El promedio de la temperatura empezó a incrementarse a partir de 1992 cuando los promedios anuales superaron los 19 °C, y entre este año y 2001 el valor medio fue de 20.6 °C (Figura 2); el aumento de 2.2 °C es equivalente al 12.2%, esta elevación en la temperatura concuerda con el comportamiento registrado a nivel nacional con base en observaciones entre 1970-2008 (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). También entre 1992-2001

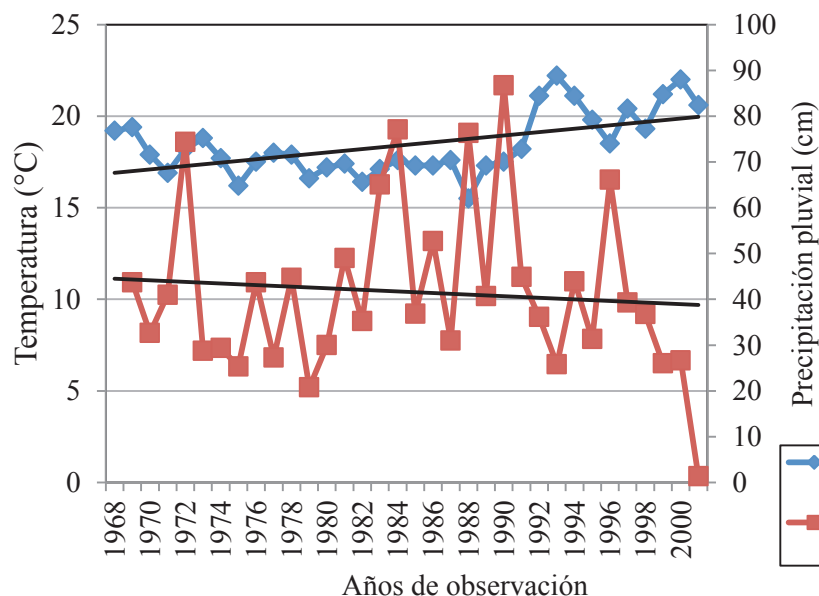


Figura 2. Variación media anual y tendencias de la temperatura y de la precipitación pluvial observadas durante el periodo 1968-2001 en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, México.

la precipitación pluvial disminuyó a un valor medio de 333 mm anuales, que se traduce en una reducción de 82 mm que equivalen al 19.6% del total anual con respecto al periodo 1968-1991.

En el periodo 1970-2001 el volumen promedio anual de agua de riego aplicado fue de 925.03 hm³, aumentó a 939.16 hm³ durante el periodo 1970-1991 y disminuyó a 901.53 hm³ en 1992-2001. Durante 1970-2001 la temperatura media anual fue de 18.4 °C y la precipitación pluvial media anual fue de 415 mm; en el lapso 1970-1991 la temperatura media anual fue de 17.4 °C mientras que la precipitación pluvial tuvo un promedio anual de 452 mm. Por último en el lapso 1992-2001 la temperatura media tuvo un valor de 20.6 °C y la precipitación pluvial media fue de 333 mm. Estos datos muestran que en el periodo 1970-1991, de menor temperatura que en el periodo 1970-2001 se tuvieron mayores precipitaciones pluviales y en el DR se dispuso de un mayor volumen de agua de riego comparado con el periodo 1992-2001. En este periodo la temperatura se incrementó 2.2 °C (12.1%), la precipitación pluvial se redujo 82 mm (19.8%) y el volumen de agua de riego bajó 30.2 hm³ (3.2%), con respecto a la etapa 1970-2001.

La superficie media anual cosechada entre 1983-2001 fue de 103 660 ha; entre los años 1983-1992 el promedio fue de 108 240 ha, y en el periodo que va de 1993-2001, en el cual se observó un incremento de la temperatura y una reducción de la precipitación

pluvial, la superficie cosechada fue de 99 080 ha; la disminución de 9159 ha significa 9.2%. La producción agrícola media anual en el periodo 1983-2001 fue de 578 708 Mg; en el periodo de 1983-1991 el promedio fue de 522 775 Mg; y en el periodo de 1992-2001, se obtuvo una media de 623 454 Mg.

Relación de la Temperatura con la Salinidad, Manto Freático Superficial, Volumen de Riego y Producción Agrícola

En el análisis de regresión lineal simple las variables dependientes fueron salinidad, nivel freático y producción agrícola; como variables independientes se analizaron temperatura, precipitación pluvial, volumen de riego, nivel freático y contenido de sales en el agua de riego (Cuadro 1). El efecto del aumento de la temperatura en el incremento de la superficie ensalitrada se observó en el estrato 0-30 cm que es un estrato superficial; considerando el periodo 1977-1996 en donde hay una consistencia entre el aumento de temperatura y de las áreas ensalitradas, la correlación resultó alta (modelo 1, $R^2 = 0.91$). El efecto se debió a que éste es un estrato que está más expuesto al ascenso capilar de sales por la elevación de niveles freáticos y como consecuencia de la evapotranspiración. De acuerdo con este modelo, en el estrato superficial con la elevación de la temperatura aumenta la superficie ensalitrada.

Sin embargo, en los estratos subsuperficiales a 30-60, 60-90 y 0-120 cm (modelos 2-4), los valores de salinidad más altos (registrados en 1976) se cuantificaron cuando las temperaturas fueron más bajas (1970-1991); con excepción de 1996, ubicado dentro del periodo de incremento de temperatura (1992-2001) causado por el calentamiento global, en el cual se registró una superficie afectada de 42 272 ha. En los estratos subsuperficiales la correlación entre la temperatura y la superficie ensalitrada se reflejó en una reducción del área ensalitrada (modelos 2-4; $R^2 = 0.70$, 0.81 y 0.71 , respectivamente).

Asimismo, la magnitud en los valores de los coeficientes de determinación calculados muestran que la temperatura no es la única variable que influye en el ensalitramiento; por lo cual se analizaron otras variables que pueden influir en el ensalitramiento del suelo como son: los niveles freáticos superficiales, la precipitación pluvial, el volumen de agua de riego y la concentración de sales en el agua de riego (De la Peña, 1979, 1982; Ayers y Westcot, 1987; Pulido *et al.*, 2001, 2009).

La influencia de niveles freáticos en el incremento de superficie ensalitrada se observó en el periodo 1971-1996, en el estrato 0-30 cm (modelo 5, $r^2 = 0.89$); dentro de este lapso, en 1985, se cuantificaron las mayores afectaciones por niveles freáticos superficiales (Figura 1), igualmente, se cuantificaron las más altas superficies ensalitradas (años 1976, 1977 y 1996), que coincidieron con parte de la época con temperaturas más altas. Estos resultados confirman lo establecido por varios autores, en cuanto a que los niveles freáticos superficiales tienen relación con el ensalitramiento de los suelos (De la Peña, 1979; Ayers y Westcot, 1987; Rhoades, 1990). El incremento de superficie con manto freático se relacionó con la elevación de la temperatura, específicamente en el periodo 1971-1980 cuando la temperatura media anual varió de 16.2 a 18.8 °C (modelo 6; $R^2 = 0.67$).

Pero en el periodo de mayor aumento en la temperatura (1991-2001) con variaciones de 18.2 a 22.2 °C, se distinguió una disminución de las superficies con niveles freáticos (modelo 7; $R^2 = 0.77$ y Figura 1); ya que la superficie más afectada se registró en 1985, con 41 431 ha y en este año la temperatura media anual fue de 17.3 °C. A partir de 1985 se delimitó una disminución de las áreas afectadas por un nivel freático superficial, que en el año 2000 fue de 7700 ha, con una temperatura de 22 °C. La explicación es que

con temperaturas altas la evapotranspiración aumenta, influyendo en la profundización de niveles freáticos que se manifiestan en menores superficies afectadas.

Se estableció una relación entre la superficie ensalitrada y los volúmenes de agua de riego aplicados considerando los estratos 0-30 (modelo 8, $R^2 = 0.85$, periodo 1971-2001) y 30-60 cm (modelo 9, $R^2 = 0.91$, periodo 1971-2001). El incremento en la aplicación de volúmenes de riego se reflejó en mayores superficies ensalitradas analizando datos dentro del periodo 1970-1991. En esta fase se registraron en promedio mayores precipitaciones pluviales. Comparativamente, entre 1970-1992 se utilizaron para riego 939.16 hm³, mientras que en el periodo 1993-2001 se aplicaron 901.5 hm³; la diferencia fue de 37.63 hm³ y es equivalentes al 4.2%. Los volúmenes de riego influyen en el desarrollo de superficies con niveles freáticos superficiales (modelo 11, $R^2 = 0.69$); por lo que el agua de riego es una de las principales causas de un nivel freático superficial. Además, el agua de riego contiene sales disueltas que contribuyen al ensalitramiento del suelo. Al respecto, durante el ciclo agrícola 1998-1999 la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) varió de 640 hasta 1229 mg l⁻¹; en este periodo se evaluó el impacto del contenido de sales del agua de riego en el suelo, y se observó que se elevaron los valores de CE, de 7.5 a 10 dS m⁻¹ y de PSI de 8.8 a 12.1% (Beltrán *et al.*, 1999).

Las lluvias generan humedad en el suelo que disuelve las sales y éstas ascienden a la superficie por capilaridad, por lo que el estrato 0-30 cm de profundidad es el que resultó más afectado. La presencia de áreas ensalitradas en este estrato se explica por el efecto del agua de las lluvias que disuelven las sales y aportan humedad al manto freático; y éste por efecto de la temperatura y evaporación asciende a la superficie del suelo y deja sales en el estrato superficial (modelo 10, $R^2 = 0.54$). Entre 1992-2001 cuando las precipitaciones pluviales fueron más bajas, en promedio de 333 mm, y la temperatura media fue de 20.6 °C, el promedio de las superficies ensalitradas fue de 32 789 ha. Mientras que en el periodo 1970-1990 la precipitación pluvial promedio fue de 452 mm, la temperatura media de 17.4 °C, y la superficie media ensalitrada resultó de 25 578 ha; el incremento llegó al 28%. Las condiciones de una temperatura alta y una precipitación pluvial baja, como las registradas en el periodo 1992-2001, propiciaron el incremento de salinidad del suelo en el estrato 0-30 cm de profundidad.

El volumen medio de producción agrícola en el periodo 1983-2001 fue de 578 708 Mg. Al dividir este periodo en dos grupos tomando como punto de inflexión el año de 1992 que es cuando se observó un marcado incremento en la temperatura, coincidente con la tendencia observada a nivel mundial y con los registros reportados para México (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012), se encontró que en el primer grupo que incluye 1983-1992 la producción agrícola media fue de 522 180 Mg, y en el segundo grupo que comprende 1993-2001, la producción media sumó 635 236 Mg.

Se correlacionaron la producción agrícola como variable dependiente y la temperatura como variable independiente, con datos de 1987-1991 y se encontró que cuando la temperatura fue más estable (primer periodo), con un valor medio de 17.2 °C, ésta no impactó negativamente en la producción. En ese primer grupo de observaciones la producción aumentó al elevarse la temperatura sin superar los 18.2 °C (modelo 12, $R^2 = 0.86$). Sin embargo, en el periodo 1994-2001 con una temperatura media anual de 20.4 °C, se encontró un impacto negativo de ésta en la producción agrícola, por cuanto se distinguió una disminución en el volumen de cosechas (modelo 13, $R^2 = 0.71$). Una explicación de esta reducción en la producción es debida a que la mayor parte de cultivos producidos en el DR 038 río Mayo tienen fotosíntesis tipo C_3 , cuya temperatura óptima está entre 15 y 20 °C, como el trigo, frijol, papa y tomate (Reilly, 1996; Luo, 2011). Otra explicación es que durante 1993-2001 la superficie de siembra fue de 98 084 ha, menor que la superficie cultivada entre 1983-2001 de 103 660 ha; también la baja en el volumen de producción se debió a una menor disponibilidad de agua de riego.

Con base en el modelo 13 se estimó el impacto de la temperatura en la producción. Con una temperatura media anual de 19.2 °C entre 1985-2001, la producción estimada fue de 751 256 Mg; si la temperatura media anual en el periodo 1992-2001 tuvo el valor de 20.6 °C entonces la producción estimada con el modelo 13 sería de 656 076 Mg. La diferencia o pérdida de cosecha se estimó en 95 180 Mg equivalente al 14.5%. La diferencia de temperatura entre los dos periodos que se analizaron fue de 1.4 °C, por lo que se estimó una pérdida de cosecha de 67 986 Mg equivalentes al 10.4% por cada grado centígrado de aumento, a partir de los 19.2 °C.

Se estimó el impacto en la producción en la superficie afectada por niveles freáticos superficiales, en el periodo de mayor temperatura, que coincidió con las más altas afectaciones por niveles freáticos (modelo 14, $R^2 = 0.93$). Con base en el modelo 14 y considerando una superficie media afectada de 27 989 ha en el periodo 1985-2001, la producción estimada con el modelo 14 fue de 653 201 Mg. Si la superficie media anual afectada con un nivel freático superficial entre 1970-2001 fue de 20 225 ha, entonces la producción estimada con el modelo 14 fue de 724 630 Mg; la diferencia de producción representó una pérdida de 71 429 Mg equivalente al 10.9%.

Con datos de salinidad del agua de riego (Beltrán *et al.*, 1999) y de producción de los años 1998-2000 se elaboró el modelo 15 ($R^2 = 0.61$); con base en éste se estimó una pérdida de cosecha del 25.3% por el incremento de la salinidad del agua de riego de 0.67 a 1.4 dS m^{-1} . Beltrán *et al.* (1999) verificaron en el trigo un decremento en la producción de grano de 1 Mg ha^{-1} , al aumentar de 0.67 a 1.4 dS m^{-1} la concentración de sales en el agua de riego.

En general, del análisis estadístico realizado mediante los modelos de regresión lineal simple del Cuadro 1, se concluye que éstos explican parcialmente la relación de la salinidad, los niveles freáticos superficiales y la producción agrícola, con variables climáticas y agronómicas; es así que se elaboraron modelos de regresión lineal múltiple. En estos modelos se analizó la salinidad como variable dependiente de la temperatura, superficie afectada con niveles freáticos, volumen de riego aplicado y precipitación pluvial. Se analizó la superficie afectada con niveles freáticos superficiales como variable dependiente, y como variables independientes la temperatura, volumen de riego aplicado y precipitación pluvial. También se analizó la relación de la producción agrícola con la temperatura, salinidad, niveles freáticos superficiales, volumen de riego y precipitación pluvial (Cuadro 2).

Con el modelo número 16 (Cuadro 2) se estimó el impacto de las variables independientes temperatura, superficie con un nivel freático superficial, volúmenes de riego aplicados y precipitación pluvial, en el aumento de la salinidad en el estrato 0-30 cm como variable dependiente. Para realizar una predicción se asumieron las siguientes condiciones: una temperatura de 20.6 °C que es el promedio anual registrado en el periodo 1992-2001; una superficie con un nivel

Cuadro 1. Modelos de regresión lineal simple que relacionan salinidad, temperatura, superficie con niveles freáticos superficiales, producción agrícola.

Periodo	Estrato	Modelo	Modelo de regresión	R ²	Fc	Ft
	cm					
1977-1996	0-30	1	CE = 13670(T) - 210123	0.91	19.86	18.51
1971-2001	30-60	2	CE = -2731.5(T) + 80478	0.70	14.38	5.98
1971-2001	60-90	3	CE = -10153.9(T) + 234369	0.81	26.33	5.98
1971-2001	0-120	4	CE = -4314.8(T) + 115014	0.71	17.13	5.59
1977-1996	0-30	5	CE = 0.814(MF) + 14322	0.89	48.02	5.99
1971-1980	---	6	MF = 3533.1(T) - 49906	0.67	8.27	7.70
1985-2001	---	7	MF = -6524(T) + 149315	0.77	13.72	7.70
1971-2001	0-30	8	CE = 82.93 (VOL.) - 34597.63	0.85	17.84	10.12
1971-2001	30-60	9	CE = 47.98 (VOL.) - 14111.3	0.91	44.83	7.70
1971-2001	0-30	10	CE = 204.34(PP) + 20518	0.54	8.34	5.59
1970-2001	---	11	MF = 45.039(VOL.) - 23561	0.69	34.87	4.54
1987-1991	---	12	PROD = 66.7488(T) - 607.7286	0.86	18.95	10.12
1994-2001	---	13	PROD = -68.0967(T) + 2058.7	0.71	10.04	7.70
1985-2001	---	14	PROD = -0.0092(MF) + 910.70	0.93	27.12	18.51
1996-2000	---	15	PROD = -386.60(CEar) + 1035.82	0.90	38.18	7.70

CE = superficie ensalitrada (ha); T = temperatura (°C); MF = superficie con niveles freáticos <1.5 m (ha); PP = precipitación pluvial (cm); VOL = volumen de agua utilizado para riego (hm³); PROD = producción (Mg × 1000); CEar = conductividad eléctrica del agua de riego (dS m⁻¹); Fc = valor de F calculado con 95% de confianza; Ft = valor de F crítico; α = 0.05 de significancia. El estrato solo aplica para superficie ensalitrada.

freático superficial < 1.5 m de profundidad de 24 628 ha que es el nivel medio anual del periodo 1997-2001; un volumen de riego de 901.53 hm³ promedio anual del periodo 1993-2001 y una precipitación pluvial media anual de 333 mm registrada en el periodo 1992-2001. Como resultado se obtuvo una superficie ensalitrada de 31 739 ha, que restada a la superficie media ensalitrada de 25 578 ha en el estrato 0-30 cm del periodo 1971-2001 da un incremento de 6161 ha, equivalente al 24.1%.

Con base en el modelo número 17 (Cuadro 2) que se elaboró para el estrato 30-60 cm de profundidad, del cual se obtuvo una R² = 0.95 y una significancia estadística del 95%, se estimó la salinidad del suelo utilizando una temperatura de 20.6 °C, una superficie de 24 628 ha con nivel freático superficial, un volumen de riego de 901.53 hm³ y una precipitación pluvial de 333 mm. La superficie ensalitrada resultante fue de 36 435 ha, superior a las 31 458 ha de superficie media ensalitrada estimada para el periodo 1971-2001; el incremento de superficie ensalitrada representa 15.8%.

El modelo número 18 se desarrolló con datos del estrato 60-90 cm de profundidad. En este modelo

se sustituyeron: una temperatura de 20.6 °C, una superficie con nivel freático superficial de 24 628 ha, un volumen de riego de 1255 hm³ y una precipitación pluvial de 391 mm; el resultado es una superficie ensalitrada de 26 782 ha que es menor en 23 781 ha equivalentes al 47%, con respecto a la superficie media estimada de 50 563 ha del estrato a 60-90 cm para el periodo 1971-2001.

De las estimaciones en cuanto a superficie ensalitrada desarrolladas con los modelos 16-18, se concluye que con el calentamiento global en los estratos a 0-30 y 30-60 cm de profundidad se incrementaría la superficie ensalitrada. El estrato de suelo más afectado es el de 0-30 cm, seguido del estrato a 30-60 cm de profundidad; en ambos es donde se concentra el sistema radicular de la mayoría de los cultivos establecidos en este DR. Contrariamente, en el estrato de 60-90 cm se reducirían las afectaciones por sales. Ello se explica por el incremento de temperatura y disminución de precipitación pluvial; esta última responsable de un menor volumen de agua de riego. El incremento de temperatura favorece el aumento de la evapotranspiración que influye en el ascenso capilar de humedad y de sales hacia la superficie del

Cuadro 2. Modelos de regresión lineal múltiple que relacionan la salinidad con la temperatura, niveles freáticos, volumen de agua de riego, producción agrícola, precipitación pluvial y superficie cosechada.

Periodo	Estrato	Modelo	Modelo de regresión	R ²	Fc	Ft
	cm					
1973-1980	0-30	16	CE = 42014.117-969.0305*T+0.7997*MF-18.2083*VOL+19.2406*PP	0.91	11.09	6.38
1971-2001	30-60	17	CE = 65291.175-1267.718*T+0.7369*MF-27.1452*VOL+10.7613*PP	0.94	12.93	9.12
1971-2001	60-90	18	CE = 193917.95-8459.89*T-1.6561*MF+42.1542*VOL-12.7343*PP	0.88	8.90	5.19
1971-1977	---	19	MF = -19821.3076+3566.9902*T-38.8211*VOL+17.9834*PP	0.98	27.88	19.20
1993-2001	---	20	PROD = 1066.5374+57.8349*T-0.3071*PP+2.3622*VOL-0.0375*SUP	0.93	11.68	9.12
1985-2001	---	21	PROD = 728.5121+0.0014*CE-0.0079*MF	0.98	61.52	19.0

CE = superficie ensalitrada (ha); T = temperatura (°C); MF = superficie con niveles freáticos <1.5 m (ha); PP = precipitación pluvial (cm); VOL = volumen de agua utilizado para riego (hm³); PROD = producción (Mg × 1000); SUP = superficie cosechada (ha); Fc = valor de F calculado con 95% de confianza; Ft = valor de F crítico; α = 0.05 de significancia. El estrato solo aplica para superficie ensalitrada.

suelo; es también responsable del desarrollo de niveles freáticos superficiales. Estos resultados concuerdan con lo establecido por Richards (1974), Rhoades (1990) y Suarez y Jurinak (1990).

Se correlacionó la superficie con un nivel freático superficial como variable dependiente, y la temperatura, volumen de agua de riego y precipitación pluvial, como variables independientes (modelo número 19). En este sentido asumiendo una temperatura de 20.6 °C, un volumen de agua de riego de 901.53 hm³ y una precipitación pluvial de 333 mm, se estimó una superficie con un nivel freático superficial de 24 650 ha. Esta superficie es más alta que la superficie media afectada por un nivel freático superficial en el periodo 1970-2001, de 20 225 ha; por lo tanto, se estimó un aumento de superficie afectada de 4425 ha que significa 21.9%. Este incremento se supone sería causado por el calentamiento global que se está manifestando en el planeta, especialmente a partir de la década de los setenta del siglo XX (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012).

El cambio climático podría provocar repercusiones adversas en la agricultura (Ojeda *et al.*, 2010). En este sentido se desarrolló el modelo número 20 donde el volumen de producción agrícola es la variable dependiente, y la temperatura, precipitación pluvial, volumen de agua de riego y superficie cultivada son las variables independientes. Es así que se sustituyeron en el modelo 20 una temperatura de 20.5 °C, precipitación pluvial de 382 mm, volumen de riego de 910.61 hm³ y una superficie cultivada de 99 610 ha; la operación dio por resultado un volumen de producción de 551 322 Mg de productos agrícolas. El impacto

negativo, como es el caso, se obtuvo restando la cifra anterior de 635 236 Mg que es la producción media anual del periodo 1993-2001, de lo cual resultó una pérdida de 83 914 Mg equivalentes al 15.2%.

Para la mayoría de los cultivos que se produjeron durante el periodo 1970-2001 en el DR 038, los niveles altos de sales causaron decrementos en su rendimiento debido a las diferencias en cuanto a la tolerancia a las sales, de acuerdo con lo establecido por Ayers y Westcot (1987), Maas (1990) y Grieve *et al.* (2012). Es por ello que se desarrolló el modelo 21, en el cual el volumen de producción agrícola es la variable dependiente y la superficie ensalitrada y la superficie con un nivel freático superficial son las variables independientes. En el modelo 21 se sustituyeron una superficie ensalitrada de 42 272 ha que es la más alta reportada en el periodo 1985-2001 y una superficie con un nivel freático superficial de 32 070 ha que se registró en 1997, de lo cual resultó un volumen de producción de 534 338 Mg; esta cantidad restada del volumen de producción medio anual de 635 236 Mg estimadas en el periodo 1993-2001, dio una disminución de 100 898 Mg equivalentes al 18.9%.

CONCLUSIONES

- En el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, los efectos del calentamiento global manifestados por medio del incremento en la temperatura, disminución de la precipitación pluvial, disminución en la disponibilidad de agua de riego, y el aumento en la concentración de sales en el agua de riego, incidieron en incrementos en las superficies afectadas por sales.

- Con el calentamiento global los problemas de salinidad del suelo se incrementaron 24.1 y 15.8% en los estratos de suelo a 30 y 60 cm de profundidad, respectivamente, en el periodo 1970-2001 analizado. Asimismo, se estimó un desarrollo de mayores superficies con niveles freáticos superficiales, del orden de 21.9% en el mismo periodo. El impacto del calentamiento global en el volumen de producción agrícola se estimó en una reducción del 15.2% de la producción agrícola.

- Se recomienda realizar estudios similares en otros distritos de riego y utilizar periodos de tiempo mayores, para lo cual es necesario generar datos a través de mediciones in-situ de las variables que se analizaron en el presente estudio.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de las autoridades del Distrito de Riego 038 río Mayo y de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego del río Mayo, por las facilidades otorgadas para revisar sus archivos documentales. También a los Ings. José Manuel Delgado y Jorge Infante Reyes, técnicos respectivos el año 2001 de las instituciones señaladas, por su apoyo durante la etapa de acopio de datos y revisión de documentos.

LITERATURA CITADA

- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO, Riego y Drenaje. Núm. 29, rev.1. Roma, Italia.
- Beltrán, F. M. de J., C. F. Cabrera, B. J. M. Lam y Z. A. Lozano. 1999. Efecto del uso conjunto del agua subterránea y superficial en la productividad de los suelos del Valle del Mayo. Informe 1998. INIFAP, Campo Agrícola Experimental Valle del Mayo. Navojua, Sonora, México.
- De la Peña, I. 1979. Principios y solución de drenaje parcelario. Boletín Técnico No. 9, SARH. Ciudad Obregón, Sonora, México.
- De la Peña, I. 1982. Salinidad de los suelos agrícolas. Su origen, clasificación, prevención y recuperación. Boletín Técnico No. 10, SARH. México, D. F.
- De la Peña, I. 1993. Problemas de salinidad y drenaje en México. Documento de circulación interna. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional en el Noroeste, Subgerencia de Riego y Drenaje. Cd. Obregón, Sonora, México.
- Grieve, C. M., S. R. Grattan, and E. V. Maas. 2012. Plant salt tolerance. pp: 405-459. In: W. W. Wallender and K. K. Tanji (eds.). Agricultural Salinity Assessment and Management. Reston, VA, USA.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1997. Proyecto ejecutivo de drenaje parcelario para recuperar 5,000 ha en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. Eric II: Extractor rápido de información climatológica, 1929-1998. Comisión Nacional del Agua; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; IMTA. Jiutepec, Morelos, México.
- Luo, Q. 2011. Temperature thresholds and crop production: A review. *Clim. Change* 109: 583-598.
- Maas, E. V. 1990. Crop salt tolerance. pp. 262-326. In: W. W. Wallender and K. K. Tanji (eds.). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE Manuals and reports on engineering Practice No. 71. Reston, VA, USA.
- Martínez A., P. F. y C. Patiño Gómez. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tec. Cien. Agua* 3: 5-20.
- Montero M., M., J. Martínez Jiménez, N. I. Castillo Pérez y B. E. Espinoza Tamarindo. 2010. Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI: Precipitación y temperatura máxima y mínima. pp. 39-63. In: P. Martínez Austria y C. Patiño Gómez (eds.). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. Capítulo 3. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Ojeda B., W., M. Iñiguez Covarrubias y J. M. González Camacho. 2010. Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático. pp. 115-142. In: P. Martínez Austria y C. Patiño Gómez (eds.). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. Capítulo 5. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Pulido M., L., J. González Meraz, C. Fuentes Ruiz, M. Villarreal Pulido, R. Armendáriz Rubio y J. L. L. Medina Ruiz. 2001. Informe final del proyecto: Desarrollo y aplicación de una metodología para formular un plan director para el manejo y control de la salinidad en un distrito de riego. IMTA, CNA, Jiutepec, Morelos, México.
- Pulido M., L., C. L. Wiegand, J. González Meraz, B. D. Robles Rubio, X. Cisneros Estrada y O. Lemus Ramírez. 2003. La salinidad del suelo y su efecto en el rendimiento de los cultivos estudiados con imágenes de satélite en tres distritos de riego. *Ing. Hidrául. Méx.* 18: 83-97.
- Pulido M., L., J. González Meraz y M. Villarreal Pulido. 2009. Metodología para el diagnóstico, manejo y control de la salinidad, aplicada en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México. *Ing. Hidrául. Méx.* 24: 55-72.
- Pulido M., L., J. González Meraz, C. L. Wiegand, J. Infante Reyes y J. M. Delgado. 2010. Monitoreo de la salinidad mediante sensores remotos. *Terra Latinoamericana* 28: 15-26.
- Reilly, J., W. Baethgen, F. E. Chege, S. C. van de Geijn, Lin Erda, A. Iglesias, G. Kenny, D. Patterson, J. Rogasik, R. Rötter, C. Rosenzweig, W. Sombroek, and J. Westbrook. 1996. Agriculture in a changing climate: Impacts and Adaptation. pp. 427-467. In: R. T. Watson, M. C. Zinyowera, and R. H. Moss (eds.). *Climate change 1995: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific technical analyses*. Chapter 13. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK.
- Reyes, Q. C. 1994. Estudio agrológico semidetallado del Distrito de Riego 038 Río Mayo. Comisión Nacional del Agua. Distrito de Riego 038 Río Mayo. Navojua, Sonora, México.

- Rhoades, J. D. 1990. Overview: Diagnosis of salinity problems and selection of control practices. pp. 18-41. *In*: K. K. Tanji (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE Manu. Rep. Eng. Practices 71. New York, NY, USA
- Richards, L. A. 1974. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México.
- Suarez, D. and J. J. Jurinak. 1990. The chemistry of salt-affected soils and waters. pp. 57-88. *In*: W. W. Wallender and K. K. Tanji (eds.). Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE Manuals and reports on engineering Practice No. 71. Reston, VA, USA.
- Tanji, K. K. 1990. Nature and extent of agricultural salinity. pp. 1-17. *In*: K. K. Tanji (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE Manu. Rep. Eng. Practices 71. New York, NY, USA.