

La infraestructura hidroagrícola ante escenarios del cambio climático

• Mauro Iñiguez • Waldo Ojeda-Bustamante* •

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Autor de correspondencia

• Carlos Díaz-Delgado •

Universidad Autónoma del Estado de México

Resumen

Iñiguez, M., Ojeda-Bustamante, W., & Díaz-Delgado, C. (septiembre-octubre, 2015). La infraestructura hidroagrícola ante escenarios del cambio climático. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(5), 89-101.

La infraestructura hidroagrícola en grandes sistemas de riego consta de una serie compleja de obras civiles para cumplir con el servicio de riego. Por esta infraestructura se conduce el flujo de agua o gasto del sistema, variable hidráulica necesaria para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos. Las proyecciones climáticas de la mayoría de los modelos de circulación general océano-atmósfera indican ambientes más cálidos y secos en la mayor parte de México, con efectos significativos sobre la evapotranspiración de los cultivos, variable agronómica básica en la determinación de la capacidad de la infraestructura hidroagrícola. En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología para evaluar la evapotranspiración integrada de los cultivos, determinada para grandes áreas de riego, con un patrón diversificado de cultivos, con diferentes fechas de siembra y varios ciclos agrícolas, base para analizar los cambios consecuentes sobre la infraestructura en las condiciones proyectadas bajo escenarios de cambio climático y asumiendo dos acciones posibles de adaptación agrícola. Como caso de estudio se analiza la Asociación de Usuarios de Riego Santa Rosa, del Distrito de Riego 075, "Río Fuerte", Sinaloa, México. Los resultados obtenidos indican que para las medidas de adaptación al cambio climático analizadas para mediados de siglo y asumiendo el escenario de emisiones A1B, la capacidad de conducción del gasto de diseño de la infraestructura para grandes áreas de riego podría incrementarse en un 5%. De igual manera, para las pequeñas áreas de riego con o sin medidas de adaptación, el incremento en la capacidad de diseño será también de 5%. Respecto al volumen necesario anual, bajo el mismo escenario de emisiones A1B y de acuerdo con las medidas de adaptación estudiadas, habrá un aumento de 8.5%. Se concluye que la metodología desarrollada puede ser aplicable en cualquier distrito de riego de México para analizar el impacto del cambio climático en la infraestructura de riego.

Palabras clave: evapotranspiración, dimensionamiento de canales de riego, requerimientos hídricos, calentamiento global.

Abstract

Iñiguez, M., Ojeda-Bustamante, W., & Díaz-Delgado, C. (September-October, 2015). *Hydro-Agricultural Infrastructure under Climate Change Scenarios*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(5), 89-101.

Large irrigation systems consist of a complex series of infrastructure to supply irrigation services. The flow of water, or the system flow, running through this infrastructure is a hydraulic variable required to satisfy water demand for crops. The majority of general ocean-atmospheric circulation models indicate warmer and dryer environments in most of Mexico, with significant effects on evapotranspiration of crops, a basic agronomic variable for determining the capacity of hydro-agricultural infrastructure. The present work presents the development of a methodology to evaluate the integrated evapotranspiration of crops in large irrigation areas containing diversified crop patterns with different planting dates and agricultural cycles. This serves as a basis to analyze the resulting changes in infrastructure given projected climate change scenarios assuming two possible agricultural adaptation actions. The Santa Rosa Irrigation Users Association is analyzed as a case study, located in "Río Fuerte" Irrigation District 075, Sinaloa, Mexico. The results indicate an increase of 5% in the design flow capacity of large irrigation areas for the climate change adaptation measures analyzed for the middle of the century with an A1B emissions scenario. Likewise, an increase of 5% in the design capacity will also occur for small irrigation areas with and without adaptation measures. In terms of the annual volume requirement given the same A1B emissions scenario and the adaptation measurements studied, there would be an increase of 8.5%. It is concluded that the methodology developed can be applied to any irrigation district in Mexico to analyze the impact of climate change on irrigation infrastructure.

Keywords: Evapotranspiration, sizing irrigation canals, water requirements, global warming.

Recibido: 24/05/2013

Aceptado: 20/05/2015

Introducción

En México, las zonas de riego constituyen un componente esencial para alcanzar las metas nacionales en materia de seguridad alimentaria, generación de empleos, incremento del ingreso así como de mejoramiento del nivel de vida de los productores y habitantes en el medio rural. La infraestructura hidroagrícola en una zona de riego de grandes dimensiones está constituido de una serie de elementos, entre los más importantes están: a) obras de tomas de las presas de almacenamiento y derivadoras, b) red de canales de conducción-distribución y c) tomas en el sistema de distribución (desde tomas para canales hasta la toma granja para abastecer las parcelas agrícolas). Esta infraestructura es diseñada para satisfacer la demanda hídrica máxima de acuerdo con un plan de cultivos asumido y toda ella se caracteriza por una variable hidráulica llamada caudal o gasto.

El gasto es transitado por la infraestructura, respetando las leyes de la mecánica de fluidos y por lo tanto el diseño hidráulico, tanto de la red de conducción y distribución, y se realiza dimensionando las secciones transversales para conjuntar las estructuras en la red, tales como sifones invertidos, puentes, canales, túneles, etcétera. Es vital el conocimiento de la evapotranspiración de los cultivos de una zona de riego para lograr un uso eficiente de los recursos y dimensionar en forma óptima la red de canales (Spare, Wang, & Hagan, 1980). Los métodos más utilizados para determinar la capacidad del canal son los de Clement (1979) y Clemmens (1987), requiriendo ambos la estimación de la variable agronómica: evapotranspiración de los cultivos, para lo cual la Comisión Nacional del Agua (Conagua) tiene su propio método, el cual se ha utilizado con fines de diseño de canales en México (SRH, 1973). En dicho procedimiento, la variable hidráulica gasto es la más importante para realizar este tipo de estudios, desde la viabilidad ingenieril hasta la factibilidad económica. La infraestructura hidráulica del país es un elemento crítico en la estabilidad socioeconómica, pues contribuye

en el incremento de la productividad agrícola, tanto a mediano como a largo plazos, por lo que siempre hay que adaptar y adoptar nuevas tecnologías acordes con los avances científicos para realizar las nuevas planeaciones, ajustes a diseños y metodologías, en respuesta a cambios tecnológicos o ante nuevos patrones en las variables climáticas que alteran el comportamiento de la infraestructura hidroagrícola para cumplir con el servicio de riego de manera equitativa, oportuna y eficiente.

Para completar la demanda de alimentos debido al crecimiento continuo de la población, la tendencia incremental de la producción histórica tendrá que continuar y, eventualmente, duplicarse, como lo mencionan Tubiello, Soussana y Howden (2007). Intensificación y diversidad son las dos tendencias principales de la agricultura para impulsar su desarrollo y reducir la pobreza (Dixon, Gulliver, & Gibbon, 2001). Sin embargo, en la agricultura, por ser una actividad muy sensible a la variabilidad climática, los cambios en los patrones climáticos tendrán impactos en los sistemas de producción agrícola y pueden limitar su desarrollo y sustentabilidad en varias regiones agrícolas vulnerables (Ojeda-Bustamante, Martínez, & Hernandez, 2008b).

Actualmente la comunidad científica mundial reconoce que el cambio climático es un hecho incontrovertible, con impactos directos sobre las actividades agrícolas, con efectos potenciales sobre los sistemas productivos agrícolas, producidos por un incremento en la variabilidad espacial y temporal de la temperatura y la precipitación (Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, Iñiguez, & Montero, 2011), con ocurrencia más frecuente de eventos severos que generan estrés de tipo abiótico y biótico sobre los agrosistemas, como sequías, lluvias torrenciales, ondas de calor y ciclones, entre otros impactos.

En 2000, el IPCC definió un conjunto de familias de escenarios de emisión de gases de efecto invernadero conocidos como escenarios SRES (IPCC, 2000). Se definieron cuatro argumentos o familias de escenarios de emisiones, particularmente A1, A2, B1 y B2. Estos escenarios des-

criben las maneras posibles en que la población mundial, los cambios en el uso de la tierra, las nuevas tecnologías, los recursos energéticos y la estructura económica y política pueden evolucionar durante las próximas décadas (Anandhi, 2007). Estas influencias futuras mundiales se representan en dos dimensiones: una representa las preocupaciones económicas medioambientales y la otra los modelos de desarrollo mundial o regional. Además, el argumento A1 tiene tres escenarios marcadores, en particular A1B, A1F1 y A1T, mientras que el resto sólo tiene un escenario cada uno. El **argumento A1** designa un crecimiento muy rápido con globalización creciente, un incremento de la riqueza mundial, con convergencia entre regiones y diferencias reducidas en los ingresos regionales per cápita. Además, supone el consumismo materialista, con rápido cambio tecnológico y bajo crecimiento de la población. Hay tres variantes en esta familia para las fuentes de energía: un equilibrio a través de todas las fuentes (A1B), uso intensivo de combustible fósil (A1F1) y uso de combustible no fósil (A1T). El **argumento A2** considera un mundo heterogéneo regido por el mercado con rápido crecimiento de la población, pero con un crecimiento económico menos rápido que A1. El tema subyacente es la confianza y preservación de las identidades locales. Por su parte, el **argumento B1** supone un mundo de desmaterialización y la introducción de tecnologías limpias. El énfasis está en las soluciones globales para lograr la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Con respecto al **argumento B2**, la población aumenta a una tasa inferior que en A2, pero a una tasa superior que en A1, con desarrollo guiado por caminos de sostenibilidad social, económica y medioambiental orientados al ámbito local. Es importante subrayar que estos escenarios de emisiones se basan en suposiciones de fuerzas impulsoras futuras, como el desarrollo demográfico, socioeconómico y tecnológico que pueden o no producirse.

Como parte de las proyecciones del cambio climático, los flujos térmicos y dinámicos de la atmósfera se modificarán debido a un incre-

mento en la acumulación atmosférica de varios gases que intervienen en el efecto invernadero, y cuyo origen es principalmente antropogénico (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, IPCC, por sus siglas en inglés, 2007). Así, las proyecciones de los Modelos de Circulación General Acoplados (MCGAs) para las seis variantes de emisiones indican un incremento global significativo de la temperatura y del bióxido de carbono (CO₂) durante el presente siglo. Los MCGAs proporcionan la información más creíble sobre proyecciones de cambio climático que pueden alimentar a modelos hidrológicos (Park *et al.*, 2009). Respecto a México, dichos modelos proyectan un decremento de la precipitación en la mayor parte de su territorio (Montero-Martínez, Lobato-Sánchez, Ojeda-Bustamante, Santana-Sepúlveda, & Prieto, 2013).

El cambio climático tendrá impactos en la oferta y demanda de agua para la agricultura (Yano, Aydin, & Haraguchi, 2007). Una serie de estudios sobre el impacto del cambio climático en la agricultura de riego han sido reportados en los últimos años. El impacto del cambio de patrones climáticos en la variabilidad de escurrimientos proyectados en presas de almacenamiento agrícolas ha sido reportado por Park *et al.* (2009). Se evalúa la operación del embalse de una presa con base en las entradas, volumen almacenado y demanda para usos agrícola sobre la red de distribución bajo el cambio climático (Parisa-Sadat, Bozorg-Haddad, Akbari-Alashti, & Mariño, 2015). El impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos sin considerar acciones de adaptación fue reportado por Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, Iñiguez y Montero (2011), concluyendo que la demanda hídrica de los cultivos se reducirá en 13% para el ciclo otoño-invierno, 6% para el ciclo primavera-verano e incrementará 7% en el ciclo de perennes para fines de siglo. Varias acciones de respuesta al cambio climático han sido sugeridas por Salinger, Sivakumar y Motha (2005), y Olesen *et al.* (2011), entre ellas, las más importantes son los cambios en los patrones de cultivos y en la temporada de siembra; sin embargo, dichas acciones tienen que ser analizadas

de forma local. Para México, Ojeda-Bustamante *et al.* (2011) recomiendan el uso de variedades de ciclo más largo y la compactación del periodo de siembra hacia los meses más fríos. Daccache y Lamaddalena (2010) reportaron un incremento en costos de instalación de los sistemas de riego de 20 a 27% para cumplir con las demandas de riego futuras.

Con la intensificación de las variables ambientales por efecto del cambio climático, el uso de información climática histórica puede ser ahora cuestionable en el diseño y operación de los sistemas hidroagrícolas (Ojeda *et al.*, 2008b). Se espera una mayor incertidumbre para diseñar una red hidroagrícola ante cambios en las condiciones ambientales y en el comportamiento de los cultivos, así como en las posibles respuestas de los agricultores para adaptarse al cambio climático. Por lo anterior, el diseño de sistemas de riego debe incorporar los posibles cambios en los patrones climáticos futuros y ante la falta de estudios es importante cuantificar para México su impacto en las variables de diseño para dimensionar la infraestructura de riego.

El objetivo del presente trabajo es cuantificar dichos impactos sobre la infraestructura hidroagrícola, con el argumento de implementar posibles acciones de adaptación aplicados a los cultivos, para ajustar el plan de riego de la zona de estudio con el uso de variedades de ciclo más largo y la compactación del periodo de siembra hacia los meses más fríos para mediados del siglo, bajo el escenario de emisiones A1B.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La presente propuesta alternativa de análisis y adaptaciones al diseño y operación de infraestructura hidroagrícola se muestra a través del desarrollo de un estudio de caso que reúne las características típicas de las zonas de riego agrícola. Esta zona de estudio corresponde al módulo Santa Rosa del distrito de riego 075 (DR-075, figura 1), localizado en el Valle del

Fuerte, al norte del estado de Sinaloa, México, a una latitud media de 25° 50' y longitud de 109° 5', con una altura promedio de 20 msnm.

Los suelos son planos, con una textura predominante franco arcillosa, con valores típicos de 50% para arcilla y 20% para arena, con bajo nivel de materia orgánica menor a 1%, una densidad aparente de 1.2 g cm⁻³, y una humedad aprovechable volumétrica de 15%. La zona se localiza en una zona árida al norte del estado de Sinaloa. El periodo de lluvias, principalmente de origen ciclónico, se concentra en los meses de septiembre y octubre. El módulo de riego "Santa Rosa" cuenta con una superficie física regable de 34 316 ha, tiene un factor de repetición de cultivos en el ciclo PV de hasta 27% en periodos de alta disponibilidad de agua; dicho módulo, por su extensión, es el más grande del DR-075. La programación para la distribución del agua se realiza en el módulo por demanda semanal y el procedimiento para la asignación del riego (entrega-recepción) también se efectúa con base en una programación de riegos semanal. La operación de la obra de cabeza (presa de almacenamiento) es responsabilidad de la autoridad federal, Conagua; la red mayor es responsabilidad de la Federación de Asociaciones Civiles de Usuarios de Riego (ACURs), conocida como SRL, y la responsabilidad en la administración, operación y conservación de la red menor está



Figura 1. Localización del DR-075, estado de Sinaloa, México.

a cargo de cada ACUR, que operan un módulo de riego. Según la clasificación de los métodos de distribución (Iñiguez, De León, Prado, & Rendón, 2007), la responsabilidad del control es compartida, usuario-autoridad (Conagua). La frecuencia del riego es programada en cada ACUR; el caudal parcelario entregado es limitado por la capacidad de toma granja, con una capacidad promedio de 120 l s^{-1} , y la duración del riego es programada entre el usuario y las ACUR. Con estas condiciones de funcionamiento, el módulo de riego en estudio reporta una eficiencia global de operación anual de 51.4%, valor que refleja el método de distribución del agua utilizado en el DR-075. Los usuarios tienen un periodo para solicitar el riego a la ACUR en la semana, el gasto y duración del riego, siendo servido en las siguientes 72 h de ser aceptada la solicitud del servicio de riego por la ACUR.

La red de distribución del módulo Santa Rosa es alimentada por el lateral "Canal Emilio Grivel", que inicia en el km 18+430 del canal principal Valle del Fuerte. Con respecto a la configuración de la red de canales, se destaca que existen 11 secciones de riego en que se divide hidráulicamente el módulo para proporcionar el servicio de riego.

En el DR 075 existe una cultura de sistematización de información agrícola e hidrométrica; se tiene una base de datos muy completa, con información de los últimos 13 años agrícolas en el módulo Santa Rosa, que ha sido generada al usarse el *Sprite*, Sistema de Pronóstico de Riego en Tiempo Real (Ojeda-Bustamante, González-Camacho, Sifuentes-Ibarra, Isidro, & Rendón-Pimentel, 2007).

Climatología de la zona de estudio

La climatología histórica utilizada corresponde a los valores promedio mensual del periodo 1961-1990 de la estación meteorológica "Los Mochis", localizada en el centro del distrito de riego, la cual dispone de las variables meteorológicas necesarias para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) en mm día^{-1} . En virtud de que la zona de estudio es semiárida, en este trabajo

la precipitación no se considera, pues el periodo de máxima demanda de riego se presenta en los periodos secos del año.

En este trabajo se seleccionó el escenario de emisión de gases de efecto invernadero SRES-A1B, por representar un escenario medio. Se usó el ensamble de 23 modelos de circulación general acoplados (MCGAs) de acuerdo con la metodología y base de datos indicada por Montero-Martínez *et al.* (2013), para las variables climáticas proyectadas de precipitación, temperatura mínima y máxima. Como proyecciones de mediados de siglo (2050) se promediaron los valores mensuales del periodo 2040-2060 para obtener las anomalías mensuales de la precipitación y temperatura.

Plan de cultivos

En el presente análisis se consideró el plan de riegos tipo de la zona, que incluye cultivos con fechas y superficies de siembra. Los cultivos más importantes en el DR-075 son maíz, sorgo, frijol, frutales, caña de azúcar, forrajes (principalmente alfalfa) y hortalizas (jitomate y papa). El plan de cultivos típico indica que 11.7% de la superficie tiene cultivos perennes, 88.3% son los cultivos de los ciclos anuales, de los cuales 80% son del ciclo otoño-invierno (OI) y 20% son segundo cultivos en el ciclo primavera-verano (PV).

Con base en la información agrícola del comportamiento de los ciclos de los últimos 13 años del módulo Santa Rosa del DR-075, se tiene la distribución típica de la superficie establecida y su correspondiente superficie cosechada para los cuatro principales cultivos del ciclo otoño-invierno (Conagua, 2014).

Para el caso del maíz, el periodo de siembra se considera entre principios de octubre a finales de diciembre; el frijol, de finales de septiembre a mediados de noviembre; la papa, de finales de septiembre a finales de diciembre, y el jitomate de principios de septiembre a finales de diciembre. El cultivo de jitomate no presenta un periodo con toda la superficie establecida, pues este cultivo tiene un amplio periodo de

siembra, por lo que las primeras cosechas se presentan cuando todavía no termina el periodo de siembra. Para el caso de frijol, papa y maíz, la siembra termina antes de las primeras cosechas, existiendo un periodo donde la superficie establecida de dichos cultivos es de 100%. Se generaron las curvas de distribución de siembra y cosecha para los ciclos PV y perennes, como para el ciclo OI.

Para alcanzar el objetivo del presente trabajo y cuantificar los impactos sobre la infraestructura hidroagrícola ante escenarios de cambio climático, se propone como base de análisis una nueva metodología en la determinación de la variable agronómica, es decir, la evapotranspiración integral para grandes áreas de riego. Esta metodología se aplica a los grandes distritos de riego de México, para las condiciones actuales y para el periodo de comparación ante escenarios de cambio climático. Esta variable es la base de la propuesta alterna en la determinación del gasto necesario al inicio del tramo del canal de conducción.

Estimación de la evapotranspiración ponderada de una zona de riego (ET_{zr}) para condiciones actuales

La información necesaria para estimar la variable ET es: a) climatología histórica y b) un plan de riegos de la zona, que incluye cultivos propuestos con fechas, superficies de siembra y ciclos agrícolas.

Para superar esta limitante es posible expresar el tiempo transcurrido como unidades de desarrollo en términos de "tiempo fisiológico", en lugar de tiempo cronológico, usualmente en la forma de tiempo térmico. Así surge el concepto de grados-día ($^{\circ}D$), definido para un periodo específico, como los grados acumulados sobre un intervalo de temperaturas cardinales donde se desarrolla el cultivo. El concepto de grados-día-desarrollo ($^{\circ}D$) es una de las herramientas más usadas para predecir la fenología y desarrollo de los cultivos (Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, & Unland, 2006), al compararlo con otras opciones, como días después de

siembra o porcentaje de desarrollo fenológico. El concepto $^{\circ}D$ integra en forma indirecta, a través de la temperatura, la energía calorífica acumulada en las diferentes etapas de desarrollo fenológico de los cultivos. La estimación diaria de los ($^{\circ}D$) requiere del conocimiento de la temperatura media ambiental diaria (T_a) de acuerdo con las siguientes ecuaciones (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006):

$$\begin{aligned} ^{\circ}D &= T_a - T_{c-\text{mín}}, T_a < T_{c-\text{máx}} \\ ^{\circ}D &= T_{c-\text{máx}} - T_{c-\text{mín}}, T_a \geq T_{c-\text{máx}} \\ ^{\circ}D &= 0, T_a \leq T_{c-\text{mín}} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde $T_{c-\text{mín}}$ y $T_{c-\text{máx}}$ son las temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente, dentro del cual un cultivo se desarrolla y que varían para cada cultivo según la zona de estudio. Es posible expresar el coeficiente de cultivos en función de los días-grado acumulado de acuerdo con las ecuaciones indicadas por Ojeda-Bustamante *et al.* (2006). La propuesta para estimar ET_{zr} se desarrolla en cuatro pasos.

Paso 1

Se realiza la estimación de la evapotranspiración de referencia y se obtiene la evapotranspiración (ET_c) por cultivo y fecha de siembra (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006; Ojeda-Bustamante, Hernandez, & Sánchez, 2008a), se utiliza el concepto de acumulación de grados-día-desarrollo ($^{\circ}D$) como criterio alterno para expresar la duración de días del ciclo fenológico de los cultivos y así estimar el coeficiente del cultivo de acuerdo con las ecuaciones de Ojeda-Bustamante *et al.* (2006). En este caso se identifica una curva de la ET_c para cada una de varias fechas de siembra que integra el periodo de siembra en la zona de riego. Se obtienen los valores diarios ET_{c-i} usando la ecuación (1) y con los parámetros de los cultivos se estima el coeficiente de cultivo en función de los $^{\circ}D$. La evapotranspiración de un cultivo a partir de la fecha de siembra (FS), la

fecha de cosecha (FC) está dada por la ecuación (2):

$$ET_{c-i} = \sum_{i=FS}^{FC} K_{c-i} ET_{0-i} \quad (2)$$

Donde K_{c-i} y ET_{0-i} son el coeficiente de cultivo y la evapotranspiración de referencia, respectivamente, para el día i . La ecuación (1) se repite para cada uno de los cultivos de los ciclos perennes, otoño-invierno (OI) y segundos cultivos primavera-verano (PV). Al final de la determinación de la ET_{c-i} diaria y máxima diaria, se determina el área establecida por día y el valor del volumen diario máximo y el acumulado por cultivo para cada una de las fechas de siembra.

Paso 2

Se genera una curva única que integra la evapotranspiración por cultivo bajo diferentes fechas de siembra. Las curvas ET_{c-i} del cultivo se ponderan considerando la superficie sembrada por fecha de siembra (FS) y se obtiene la evapotranspiración ponderada potencial de un cultivo (ET_{1c}), que integra los valores diarios ET_{c-i} para las fechas de siembra del cultivo para un ciclo agrícola. La evapotranspiración de un cultivo (ET_{1c}) para un día i está dada por las contribuciones de la evapotranspiración del cultivo para una fecha de siembra j estimada para el día i , ponderada por su superficie sembrada de acuerdo con f_{c-j} ; este valor se determina con la ecuación (3):

$$ET_{1c-i} = \sum_{j=1}^{NS} f_{c-i,j} ET_{c-i,j} \quad (3)$$

Donde j define el cultivo para la fecha de siembra j dada; esto es, para cada día i intervienen varias siembras (NS) para el cultivo bajo análisis; i es el día en el periodo de desarrollo del cultivo bajo análisis que cubre desde el día de la fecha de la primera siembra (PS) hasta el día de la última cosecha (UC) de los NS de los cultivos. NS es el número total de siembras para el cultivo analizado; $f_{c-i,j}$ es el factor de peso para

la superficie sembrada respecto del total para la fecha de siembra j , dada por la ecuación (4):

$$f_{c-i,j} = \frac{S_{c-i,j}}{S_{t(1c)-i}} \quad (4)$$

$S_{c-i,j}$ es la superficie establecida para el cultivo analizado con fecha de siembra j . $S_{t(1c)-i}$ es la suma de las superficies establecidas de las diferentes fechas de siembra en el día i del cultivo analizado, donde $S_{t(1c)-i} = \sum_{j=1}^{NS} S_{c-i,j}$. Al final en la determinación de ET_{1c-i} diario y con base en los cálculos, se determinan los valores del área establecida diaria y con el volumen respectivo.

Paso 3

Se integra la evapotranspiración por ciclo agrícola PV, OI y perennes, considerando la superficie por cultivo del plan de riegos de la zona. Por ejemplo, para un día i , la evapotranspiración integrada de los cultivos del ciclo OI puede estimarse con la ecuación (5):

$$ET_{ciclo-i} = \sum_{k=1}^{NC} f_{i,k} ET_{1c-i,k} \quad (5)$$

Donde $k = 1$ a n_k ; NC es el número de cultivos por trabajar de cada ciclo OI, PV y perennes; i es definido para el día y k por el cultivo; $f_{i,k}$ es el factor de ponderación del cultivo i para un ciclo dado de acuerdo con la siguiente relación:

$$f_{i,k} = \frac{S_{c-i,k}}{S_{t-i}} \quad (6)$$

$S_{c-i,k}$ es la superficie establecida del cultivo k en el ciclo analizado para el día i ; S_{t-i} es la superficie total del ciclo analizado en el día i , $S_{t-i} = \sum_{k=1}^{NC} S_{c-i,k}$. Al final se obtiene el valor de la evapotranspiración integrada para el ciclo analizado. Con el valor de $ET_{ciclo-i}$ se determina el área establecida y volumen diario.

Paso 4

Finalmente se obtiene una curva general integrada diaria de los ciclos, encontrándose la variable evapotranspiración ponderada de una zona de riego (ET_{zr}). El valor de la ET_{zr} para un día i es la suma de la $ET_{ciclo-i}$ de cada ciclo; si se tienen tres ciclos agrícolas ($N_{ca} = 3$):

$$ET_{zr-i} = \sum_{r=1}^{N_{ca}=3} f_{zr-i,r} ET_{ciclo-i,r} \quad (7)$$

Donde N_{ca} es el número de ciclos por analizar en el presente caso de análisis OI o PV, PER, en el día i ; $f_{zr-i,r}$ es el factor de ponderación del ciclo r para el día i de acuerdo con la siguiente relación:

$$f_{zr-i,r} = \frac{S_{i,r}}{S_{zr-i}} \quad (8)$$

$S_{i,r}$ es la superficie establecida del ciclo r para el día i ; S_{zr-i} es la superficie total establecida en el año agrícola analizado para el día i $S_{zr-i} = \sum_{r=1}^{N_{ca}} S_{i,r}$. N_{ca} es el número de ciclos presentes en el año agrícola. Al final de este paso se obtiene un valor diario integrado ET_{zr-i} de la evapotranspiración de una zona de riego, asimismo se determina el área establecida y volumen diario.

El valor máximo de ET_{zr} de la curva general integral es el que se toma como el valor de la variable evapotranspiración ponderada de una zona de riego. La ET_{zr} diaria se relaciona con el área establecida diaria y el volumen requerido diario por el sistema.

Con la ecuación (9) se relacionan la eficiencia global y la evapotranspiración: variables para la determinación del gasto necesario al inicio del tramo del canal de conducción:

$$Q_d = 115.74 \frac{(ET_{zr} * \text{área})}{E_g} \quad (9)$$

Donde Q_d es el gasto de diseño ($l s^{-1}$); ET_{zr} , evapotranspiración ponderada; m , día $^{-1}$; E_g ,

eficiencia global para diseño; 115.74 es el coeficiente de transformación a $l s^{-1} ha^{-1}$, área en hectáreas. Por ser grandes áreas, se considera que el servicio de riego está operando las 24 horas del día.

Con fines de diseño y capacidad de conducción del canal se utilizan valores de eficiencias de conducción y aplicación reportadas por la SRH (1973). La eficiencia global η para diseño se estima como producto de las eficiencias de conducción y aplicación, $\eta_{Conducción} * \eta_{aplicación}$. Como ejemplo para los canales de tierra se reporta una eficiencia global de $\eta = 49\%$. Cabe resaltar que la eficiencia de aplicación actualmente varía según la tecnología aplicada y puede alcanzar de manera potencial un valor de $\eta = 90\%$. La eficiencia de aplicación parcelaria reportada por SRH (1973) se considera de $\eta = 70\%$ para riego por gravedad tecnificado.

Estimación de la evapotranspiración ponderada de una zona de riego (ET_{zr})

Para las condiciones de escenarios de cambio climático se tomó la recomendación que Ojeda-Bustamante *et al.* (2011) hacen para México, esto es: uso de variedades de ciclo más largo y compactación del periodo de siembra hacia los meses más fríos. La información necesaria para estimar la variable ET es la siguiente: climatología para mediados del siglo bajo el escenario A1B; plan de riegos de la zona que incluyen los mismos cultivos propuestos, pero de ciclo largo, con fechas de siembra y superficies compactada, con las mismas áreas en los ciclos agrícolas. El procedimiento para estimar la variable ET_{zr} es el mismo que para condiciones actuales.

Por la gran cantidad de cálculos involucrados, los algoritmos para estimar la evapotranspiración de los cultivos de una zona de riego de acuerdo con la metodología propuesta fueron programados en lenguaje de programación Java. En virtud de que la precipitación durante el periodo de máxima demanda es prácticamente nula en los distritos de riego de México, se asume en este trabajo que la evapotranspiración es equivalente a los requerimientos de riego de

los cultivos. Para el caso en donde la precipitación sea importante en el periodo de máxima demanda de los cultivos, ésta debe ser restada de la evapotranspiración diaria.

Resultados y discusión

Estimación de la evapotranspiración ponderada de una zona de riego (ET_{zr}) para condiciones actuales

Como resultado de la aplicación de la ecuación (1), punto de partida de la metodología, en la figura 2 se muestra la curva de ET_c para el cultivo del maíz con fecha de siembra del 16/12/2004 (siembra número 8) del ciclo OI; el valor máximo de ET_c es de 6.2 mm día⁻¹. La superficie establecida considerada para esta fecha de siembra fue de 1 135.5 ha y el volumen máximo demandado es de 70 719.6 m³ día⁻¹; los valores son para el día Juliano 113, con fecha del 22/04/2005.

En la figura 3 se muestra como ejemplo la curva única ET_{cl} -hectáreas para el cultivo del maíz del ciclo OI e integra la evapotranspiración de las diferentes fechas de siembra y se ponderan considerando la superficie sembrada por fecha de siembra, tal como lo indica la ecuación (2). Los valores para el volumen máximo requerido para maíz del ciclo OI del año agrícola en el módulo Santa Rosa del DR 075 se presentan

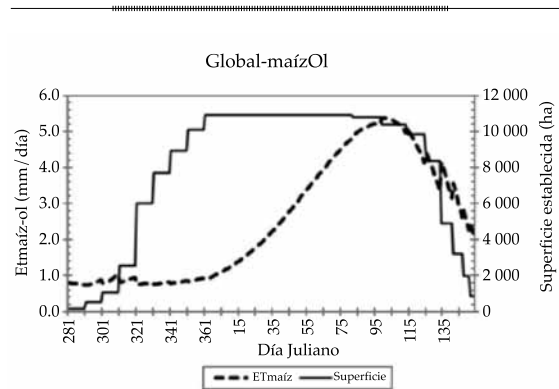


Figura 3. Curva ET_{cl} -hectáreas (maíz).

en el día Juliano 99, con fecha del 09/04/2005; el volumen máximo es de 557 134.56 m³ día⁻¹, la ET_{cl} de 5.3 mm día⁻¹ y una superficie constituida de 10 383.36 hectáreas.

Para la siguiente etapa de la metodología se integra la evapotranspiración por ciclo agrícola, considerando la superficie por cultivo del ciclo PV, OI y perennes, tal como se indica en la ecuación (4). En la figura 4 (que corresponde al paso 3) se muestra la curva que integra ET_{1c-i} del ciclo OI. Se destacan los valores para el ciclo OI con el volumen requerido para el día Juliano 87 con fecha 28/03/2005, con un volumen máximo demandado de 672 200.7 m³ día⁻¹; $ET_{1c-i} = 4.9$ mm día⁻¹ y una superficie de 13 710.8 hectáreas.

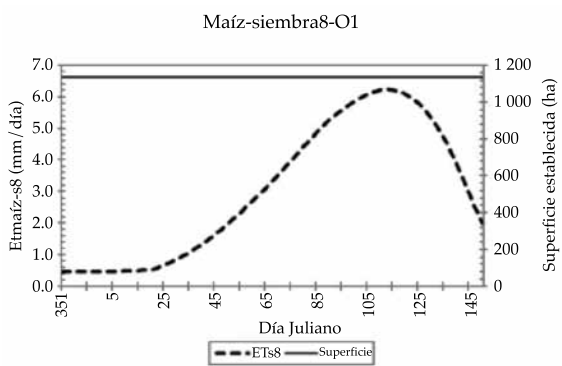


Figura 2. Relación ET_c -hectáreas una siembra.

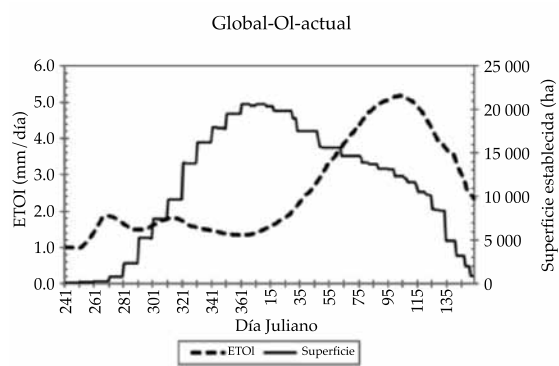


Figura 4. Curva $ET_{ciclo-OI}$ -hectáreas.

OJO AUTOR, EN LA FIGURA 3, ¿ES CORRECTO EL CONSECUATIVO EN EL EJE DE LAS X, QUE PASA DE 361 A 15, 35, 55, ETC.?

OJO AUTOR, EN LA FIGURA 2, ¿EMPIEZA CON 351 EL EJE DE LAS X?

OJO AUTOR, EN LA FIGURA 4, ¿ES CORRECTO EL CONSECUATIVO EN EL EJE DE LAS X, QUE PASA DE 361 A 15, 35, 55, ETC.?

La etapa final de la propuesta consiste en obtener la curva general integrada de los tres ciclos PV, OI y perennes para el año de estudio, encontrándose la variable evapotranspiración ponderada de una zona de riego (ecuaciones (7) y (8)). El valor pico se presenta el día Juliano 105 con fecha 15/04/2005, día 231, con un volumen máximo de 918 487.63 m³ día⁻¹; $ET_{zr} = 4.08$ mm día⁻¹ y una superficie de 22 517.93 ha. Se muestran los resultados para todo el año en la figura 5.

La determinación del gasto se establece con la ecuación (9), el gasto necesario por conducir en la red. Por ser grandes áreas se considera que las horas del servicio de riego son las 24 horas del día; las eficiencias globales son las recomendadas por SRH (1973). Para la superficie establecida obtenida como resultado de 22 517.93 ha y una eficiencia global de $\eta = 0.49$ y $ET_{zr} = 4.08$ mm día⁻¹ se obtiene un gasto de 21.70 m³ seg⁻¹. Al multiplicar la superficie establecida por día y la ET_{zr} día, considerando la eficiencia global a 100%, se obtiene la curva que integra el volumen diario demandado en todo el año. Con la figura 6 se muestra el volumen demandado-día; el valor máximo es de 918 487.63 m³ día⁻¹.

Estimación de la evapotranspiración ponderada de una zona de riego (ET_{zr})

Para una segunda opción bajo condiciones de escenarios de cambio climático, el procedi-

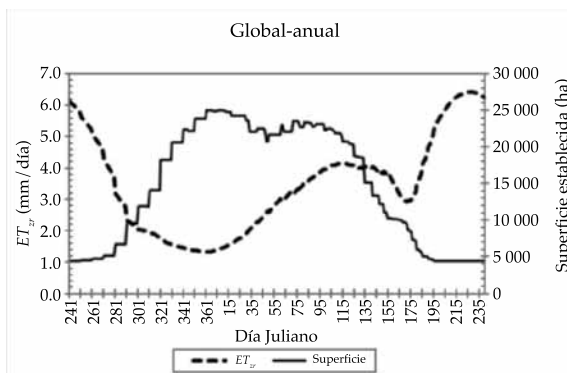


Figura 5. Curva ET_{zr} -hectáreas.

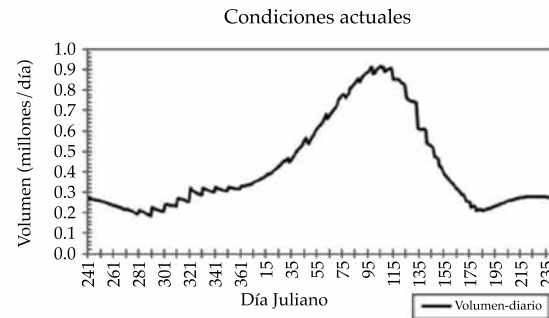


Figura 6. Volumen demandado-día.

miento para estimar la variable ET es el mismo que para “condiciones actuales” y la propuesta analizada corresponde a una estrategia de adaptación de compactación de fechas de siembra y el uso de cultivos de ciclo largo; la definición se realiza con adecuaciones al plan de riegos de la zona, que incluye cultivos propuestos con fechas, superficies de siembra y ciclos agrícolas.

Se presenta sólo el resultado del paso 4, que representa las estimaciones en forma ponderada. Así, se obtiene la curva general integrada de los tres ciclos PV, OI y perennes para el año agrícola, encontrándose la variable evapotranspiración ponderada de una zona de riego, tal como se muestra en la figura 7.

El resultado final de la propuesta ha consistido en obtener la variable evapotranspiración ponderada de una zona de riego. De las ecuaciones (7) y (8) se obtiene $ET_{zr} = 4.1$ mm día⁻¹ y una superficie de 23 419 ha. Al multiplicar día a día la superficie por la ET_{zr} y con eficiencia global de 100% (datos de la figura 7), se obtiene la curva que integra el volumen diario demandado en todo el año, siendo el valor pico el día Juliano 96, con fecha 06/04/2051, con un volumen máximo de 961 740.67 m³ día⁻¹. Para la superficie obtenida como resultado de 23 419 ha, una eficiencia global de $\eta = 0.49$ y la $ET_{zr} = 4.1$ mm día⁻¹, con el uso de la ecuación (9) se obtiene un gasto de 22.72 m³ seg⁻¹.

OJO AUTOR, EN LA FIGURA 6, ¿ES CORRECTO EL CONSECUATIVO EN EL EJE DE LAS X, QUE PASA DE 361 A 15, 35, 55, ETC.?

OJO AU FIGURA RRECTO TIVO EN X, QUE 15, 35, 55

OJO AUTOR, EN LA FIGURA 5, ¿ES CORRECTO EL CONSECUATIVO EN EL EJE DE LAS X, QUE PASA DE 361 A 15, 35, 55, ETC.?

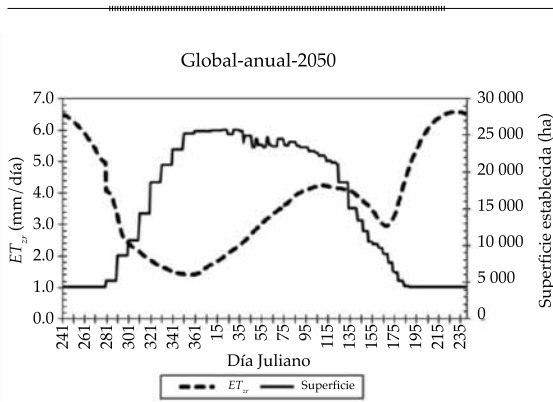


Figura 7. Variación ET_{zr} -superficie diaria, periodo 2050.

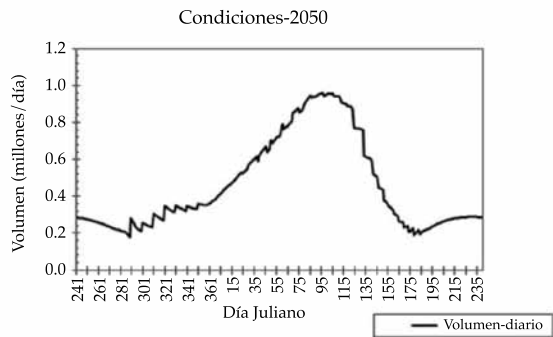


Figura 8. Volúmenes diarios para el periodo 2050.

Consecuencias concluyentes

De los resultados obtenidos para las condiciones actuales y bajo el escenario del cambio climático para las condiciones futuras respecto a la variación en porcentajes del gasto máximo necesario diario es de 5.08% de incremento, al pasar del gasto al inicio de la red de $21.70 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ a $22.72 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$, diferencia de $1.0 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$, gasto adicional a ser conducido por la infraestructura hidráulica. Esto es para las condiciones presentadas. La variación en porcentajes del volumen total anual necesario para las condiciones del Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México, es de 8.2%, en incremento, al pasar de un volumen de $154\,544\,085 \text{ m}^3$ a $167\,117\,884 \text{ m}^3$;

esto es, 12.58 millones de m^3 volumen necesario adicional en disponibilidad al inicio del ciclo agrícola.

Para el caso de las secciones al final de las ramificaciones o al final de la red de conducción, la capacidad del canal se diseña para satisfacer el máxima gasto para áreas pequeñas, según SRH (1973). Esto es, para áreas menores de 1 000 ha, la demanda máxima de diseño de la capacidad del canal, es necesario considerar un mono cultivo y que su ET_{c-i} sea el máximo del plan de riego. Para el caso de estudio, son los cultivos perenes los que resultan con máximo ET_{c-i} . En el cuadro 1 se presentan los resultados para los cultivos perennes del plan de riego de la aplicación de la ecuación (2), para el periodo actual y para el escenario del cambio climático para las condiciones futuras, 2050.

Es importante señalar que para los cultivos perennes no hay cambio en la recomendación de adaptación al cambio climático. Por ser precisamente perenes, el aumento de ET_{c-i} en porcentaje en el caso del cultivo de la alfalfa es de 5.03%, que se toma como referencia para el cálculo del gasto y volumen.

Las zonas de riego son diseñadas con información histórica de un patrón de cultivos de la región, climatología histórica, requerimientos hídricos pico, y régimen de humedad de los suelos. Los resultados del estudio indican que el dimensionamiento de diseño de la infraestructura puede incrementarse debido a un cambio en los patrones climáticos y en las posibles acciones de adaptación. Sin embargo, el análisis anterior se realizó asumiendo el escenario de emisiones A1B y que no hay modificaciones futuras en el plan de cultivos. El incremento en la capacidad de diseño de canales puede ser diferente de lo estimado en este trabajo, en función del escenario de emisiones usado o de las acciones de adaptación al cambio climático a implantar en el futuro por los productores, además de las analizadas en este trabajo, como reconversión de cultivos, tecnificación de riego parcelario, revestimiento o entubamiento de canales, por mencionar algunas, que no fueron objeto del presente trabajo. En consecuencia, es

OTOR, EN LAS
AS 7 Y 8, ¿ES CO-
D EL CONSECU-
N EL JEJE DE LAS
PASA DE 361 A
5, ETC.?

Cuadro 1. Resultado para los cultivos perennes del distrito de riego 075 en “condiciones actuales” y para el año 2050.

| Escenarios | Actual | | | | Escenario 2050 | | | | Diferencia 2050-2000 |
|------------|-------------|--------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------------|
| | Juliano día | ET _{c-i} (mm/d) | Superficie (Ha) | Volumen (m ³ /día) | Juliano día | ET _{c-i} (mm/d) | Superficie (Ha) | Volumen (m ³ /día) | % |
| Alfalfa | 144 | 6.707 | 500 | 33 535 | 156 | 7.064 | 500 | 35 320 | 1.053 |
| Mango | 149 | 6.405 | 300 | 19 215 | 156 | 6.435 | 300 | 19 305 | 1.005 |
| Caña | 226 | 6.585 | 1 000 | 65 850 | 231 | 6.779 | 1 000 | 67 790 | 1.029 |

necesario analizar las posibles repercusiones del cambio climático en las demandas de los cultivos, para acoplar la capacidad de conducción de la infraestructura actual a las nuevas demandas de riego de acuerdo con las respuestas de los agricultores y patrones climáticos.

Conclusiones

Con la intensificación del cambio climático, el uso de información climática histórica puede ser ahora cuestionable en diseño y operación de los sistemas de riego. Sin embargo, estimar el impacto del cambio climático en los sistemas agrícolas es una tarea difícil, por las dificultades en la predicción de los escenarios climáticos futuros y las acciones que los agricultores adopten o el gobierno promueva en el futuro. De acuerdo con los resultados, se concluye que la infraestructura de riego, con relación a la capacidad del gasto de diseño, sugiere tener en cuenta tres consideraciones para el diseño de la infraestructura hidroagrícola bajo escenarios de cambio climático:

- Para áreas al final de las ramificaciones o al final de la red de canales, la capacidad del canal, bajo las condiciones con y sin adaptación, que serán afectadas al menos con un 5% de la capacidad de conducción del gasto.
- Para el inicio de la sección o total del canal para alimentar las áreas mayores, bajo la condiciones de adaptación, que serán afectadas con 5% o más de la capacidad del gasto de diseño.

- En relación con el volumen anual utilizado bajo el mismo plan de cultivos con las condiciones de adaptación se verá afectado con un aumento de 8.5%.

Referencias

- Allen, G. R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Estudio FAO Riego y drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (298 pp.). Serie cuadernos técnicos. Roma: FAO.
- Anandhi, A. (2007). *Impact Assessment of Climate Change on Hydrometeorology of Indian River Basin for IPCC SRES Scenarios*. Ph.D. Dissertation. Bangalore, India: Indian Institute of Science.
- Clement, R. (1979). *Computation of flow in Irrigation Systems Operating 'On Demand'*. Traducción al inglés del US Bureau of Reclamation. Le Tholonet: La Société du canal de Provence et d'Aménagement de la Region Provencale (December, 13, 1965).
- Clemmens, A. J. (1987). *Delivery System Schedules and Required Capacities, Planning, Operation, Rehabilitation and Automation of Irrigation Water Delivery Systems*. Symposium Proceedings, ASCE, New York.
- Conagua (2014). *Estadística histórica de producción agrícola de los Distritos de Riego*. México, DF: Comisión Nacional de Agua, Gerencia de Distritos de Riego.
- Daccache, A., & Lamaddalena, N. (2010). *Climate Change Impacts on Pressurized Irrigation Systems. Proceeding of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, 163, 97-105.
- Dixon, J., Gulliver, A., & Gibbon, D. (2001). *Farming Systems and Poverty* (412 pp.) Rome/Washington, DC: FAO/World Bank.
- Iñiguez, C. M., De León, M. B., Prado, H. J. V., & Rendón, P. L. *Ingeniería Hidráulica en México*, (2007). Análisis y comparación de tres métodos para determinar la capacidad de conducción de canales, aplicados en el distrito de riego La Begoña. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(2), 81-90.

- IPCC (2000). *Emission Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In N. Nakicenović & R. Swart (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission>.
- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (104 pp.). Equipo de redacción principal: R. K. Pachauri, & A. Reisinger, directores de la publicación. Ginebra: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Montero-Martínez, J. M., Lobato-Sánchez, R., Ojeda-Bustamante, W., Santana-Sepúlveda, J. S., & Prieto, R. (2013). Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(2), 113-128.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., & Unland, H. (2006). Programación integral del riego en maíz. *Agrociencia*, 40, 13-25.
- Ojeda-Bustamante, W., González-Camacho, J. M., Sifuentes-Ibarra, E., Isidro, E., & Rendón-Pimentel, L. (2007). Using Spatial Information Systems to Improve Water Management in Mexico. *Agricultural Water Management*, 89, 81-88
- Ojeda-Bustamante, W., Hernández, L., & Sánchez, I. (2008a). *Requerimientos de riego de los cultivos. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas* (pp. 1-49). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda-Bustamante, W., Martínez, P., & Hernandez, L. (2008b). Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. Capítulo 6 (pp. 73-83). En A. Aguilar & P. Martínez (Eds). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. Vol. II. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Iñiguez, M., & Montero, J. M. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45, 1-21.
- Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvag, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., & Micale, F. (2011). Impacts and Adaptation of European Crop Production Systems to Climate Change. *Eur. J. Agron.*, 34, 96-112.
- Park, G. A., Ahn, S. R., Lee, Y. J., Shin, H. J., Park, M. J., & Kim, S. J. (2009). Assessment of Climate Change Impact on the Inflow and Outflow of Two Agricultural Reservoirs in Korea. *Transactions of the ASABE*, 52(6), 1869-1883.
- Parisa-Sadat, A., Bozorg-Haddad, O., Akbari-Alashti, H., & Mariño, M. A. (April, 2015). Determination of Irrigation Allocation Policy under Climate Change by Genetic Programming. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(4), 04014059.
- Salinger, M. J., Sivakumar, M. V. K., & Motha, R. (2005). Reducing Vulnerability of Agriculture and Forestry to Climate Variability and Change: Workshop Summary and Recommendations. *Climatic Change*, 70, 341-362.
- SRH (1973). *Proyecto de Zonas de Riego*. México, DF: Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección de Proyectos de Grande Irrigación, Departamento de Canales.
- Spare, D. P., Wang, J., & Hagan, E. (1980). Sizing Rice Irrigation Canals. *Transaction of the ASAE*, 23(4), 914-918.
- Tubiello, F. N., Soussana, J.-F., & Howden, S. M. (2007). Crop and Pasture Response to Climate Change. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 104(50), 19686-19690.
- Yano, T., Aydin, M., & Haraguchi, T. (2007). Impact of Climate Change on Irrigation Demand and Crop Growth in a Mediterranean Environment of Turkey. *Sensors-Basel*, 7, 2297-2315.

Dirección institucional de los autores

Dr. Mauro Iñiguez
Dr. Waldo Ojeda-Bustamante

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8535, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 600
mic@tlaloc.imta.mx
wojeda@tlaloc.imta.mx,

Dr. Carlos Díaz-Delgado

Centro Interamericano de Recursos del agua (CIRA)
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de México
Cerro de Coatepec s/n, ciudad Universitaria
50130 Toluca, Estado de México, MÉXICO
cdiazd@uaemex.mx