



Artículo: COMEII-16006

II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

UNA FUNCIÓN CONJUNTA PARA LA GESTIÓN HIDROSISTÉMICA: DEMANDA DE RIEGO, PROGRAMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN Y CAPACIDAD DE CANALES

**Mauro Íñiguez-Covarrubias^{1*}; Waldo Ojeda Bustamante¹; Carlos Díaz Delgado²;
Jorge Flores Velázquez¹**

¹Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, CP. 62550, México. mic@tlaloc.imta.mx. (*Autor para correspondencia).

²Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México, cdiazd@uaemex.mx.

Resumen

En una zona de riego, para lograr un beneficio común, se requiere alcanzar el uso más eficiente de los recursos con satisfacción plena de los usuarios. Sin embargo, ello no se ha logrado, principalmente, entre otras, a la falta de desarrollo y/o aplicación de innovaciones tecnológicas en la operación de los hidrosistemas, así, las variables en cuestión son analizadas y/o instrumentadas por separado. En este trabajo se desarrolla una propuesta de gestión hidrosistémica en la que concurren la demanda de los cultivos, programación en la asignación y distribución del agua, así como la capacidad de conducción que al articularse se obtiene un instrumento de gestión. Esta herramienta se aplicó y validó en el módulo de riego Santa Rosa, del Distrito de Riego DR- 075, "Río Fuerte", Sinaloa, México. La función conjunta generada, al integrarse en un periodo de tiempo produce como resultado la superficie y su requerimiento de riego en términos de volumen y gasto. Para el caso se estimó un requerimiento hídrico de máxima demanda decenal entre 11 al 20 de abril, con superficie establecida de 22,518 ha y superficie con demanda de riego de 13,548 ha. La programación de la distribución del agua requiere un gasto de $27.18 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, satisfaciéndolo con la capacidad del canal de $27.87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y un volumen decenal demandado de 11 millones de m^3 . Se concluye que con la aplicación de la propuesta de gestión hidrosistémica es posible realizar la entrega del agua de acuerdo al método de distribución de demanda controlada, por lo que se recomienda la implementación en los distritos de riego en México.

Palabras clave adicionales: Evapotranspiración, capacidad de canales, programación del riego.



Introducción

La irregular distribución de los recursos hídricos y la necesidad de producir alimentos en México, obligó a la apertura de grandes zonas riego en zonas áridas y semiáridas. Así se construyeron en el norte del país, varios distritos de riego, con sus respectivas obras de almacenamiento, en los Ríos Yaqui y Mayo en Sonora, en el Río Colorado en Baja California, en el río Conchos en Chihuahua, en el Río Bravo en Tamaulipas, entre otros. Paralelamente se construyó una gran cantidad de pequeñas obras hidráulicas en cientos de unidades de riego que permitieron incrementar la superficie bajo riego para que, junto con los distritos de riego, alcanzan más 6 millones de hectáreas con infraestructura de riego (Ojeda *et al.*, 2008). La mayor parte del país presenta una estación lluviosa bien definida, principalmente en verano. El 70% de la precipitación en México se presenta de mayo a octubre, esto determina que para practicar la agricultura en los meses de octubre-abril es necesario disponer de depósitos o almacenamientos de agua para abastecer de riego a los cultivos. Por lo tanto, disponer de una fuente de abastecimiento confiable de agua es el primer requisito para crear un distrito de riego.

De las áreas bajo riego proviene aproximadamente el 50% de la producción agrícola nacional (Ojeda *et al.*, 2008). Sin embargo, para incrementar la producción de alimentos al ritmo del crecimiento de la población, y mantener los niveles de seguridad alimentaria del país, se vislumbran dos alternativas posibles con respecto a la infraestructura de riego. La primera consiste en incrementar la frontera agrícola con la creación de nuevas zonas de riego y, la segunda consiste en mejorar la operación de las zonas de riego existentes. Dadas las condiciones económicas del país, la segunda posibilidad parece más factible, ya que permite tener resultados en el corto y mediano plazo, con los recursos hídricos actualmente disponibles y con una menor inversión, aunque promoviendo el análisis y la factibilidad de apertura de nuevas áreas de riego en zonas con superávit de recursos hídricos.

En México, el método de diseño tradicionalmente utilizado para determinar la capacidad de canales fue propuesto por la SRH (1973), sin embargo, en otros países se utilizan diferentes métodos que generan mejores eficiencias, tales como los métodos de Clement (1965) y Clemmens (1987) mismos que han sido comparados con el utilizado en el país, generándose recomendaciones de adaptación para su aplicación en México (Iñiguez *et al.*, 2007, 2011).

La mayor parte de infraestructura construida en los distritos de riego de México, tales como estructuras de conducción y redes de distribución (Canales principales, laterales, sublaterales, ramales y regaderas) fue dimensionada bajo el criterio de la SRH (1973). En la concepción y el diseño de la infraestructura de riego en México fue considerada información vigente en la época como los patrones de cultivos, métodos de distribución, climatología, y su capacidad e infraestructura de canales fue estimada con diseños convencionales. Sin embargo, de acuerdo con



Iñiguez *et al.* (2007 y 2011), esta idea conservadora de operación limita la evolución natural de las zonas de riego y la información actualizada de las variables de interés, lo que impide mejorar el servicio de riego y genera grandes pérdidas de agua por operación deficiente de la red de distribución en periodos de máxima demanda de riego no acordes a las condiciones actuales de las zonas de riego.

Actualmente, la organización de un distrito de riego con fines de operación, conservación y administración de la infraestructura para proporcionar el servicio de riego está concesionada a los usuarios de riego a través de Sociedades de Responsabilidad Limitada (SRLs) y Asociaciones Civiles de Usuarios (ACUs). Por otro lado, en los inicios de 1992, bajo el esquema de la transferencia de responsabilidades e infraestructura agrícola, el Ejecutivo Federal por conducto de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) transfirió la red menor de distribución hídrica a los usuarios y emitió los correspondientes títulos de concesión de agua y permisos para la utilización de obras de infraestructura hidráulica.

Los métodos de distribución de agua (Clemmens, 1987) más usados en el mundo son: a) Distribución continua; b) Distribución por demanda libre; c) Distribución por demanda controlada; y d) Distribución por rotación, turno o tandeo.

Algunos autores mencionan que para mejorar la eficiencia de operación conviene que el período de programación sea con el mayor periodo posible (Palacios, 2010); sin embargo, a mayor período de programación, menos oportuna es la entrega del agua a los cultivos.

Este proceso de distribución de agua, considerando el esquema de responsabilidad Usuario-Autoridad, se asocia con los siguientes procedimientos administrativos: a) Solicitud de servicio de riego del usuario al canalero (gasto neto). El canalero ordena las solicitudes por toma granja y canal; b) El canalero solicita al representante técnico de la concesionaria (ACU), quien ordena los pedidos por canal y tomas directas, totalizando el gasto bruto del módulo obtenido al ajustar el gasto neto por eficiencia de conducción.

En el proceso de entrega del servicio del riego (distribución de agua) se requiere conocer las eficiencias promedio del sistema de distribución del agua, se reporta como ejemplo, el caso del DR 076, con una eficiencia en el tramo muerto del 90%, en la red mayor 86.5% y en los módulos del 76%. Estas eficiencias deben de considerarse al momento de realizar la programación de la distribución del agua. En consecuencia, resulta vital la puesta en marcha de esquemas de calendarización robusta del riego, de preferencia en “tiempo real”, para lograr un uso eficiente de los recursos y operar hidráulicamente en forma satisfactoria la red de canales (Spare *et al.*, 1980).

Otro ejemplo, es la distribución del agua en el Distrito 085 (La Begoña, Gto.) el cual opera por demanda controlada semanal, y el procedimiento para la asignación del riego se efectúa considerando un calendario de aprobado de riegos



solicitados. Para calcular los caudales de riego, los operadores del distrito consideran una lámina bruta a nivel de fuente de 38 cm por riego. Cabe resaltar que este valor conservador de lámina de riego se ha establecido con base en la experiencia al operar el distrito y de acuerdo al nivel tecnológico del manejo actual del riego en la parcela, principalmente por gravedad.

En el caso particular del Distrito de Riego 014 documentado en IMTA (2014), la distribución de agua a los módulos y usuarios del distrito de riego se basa en el plan de riegos que para cada año agrícola es elaborado por las ACUS y aprobado en el seno del comité hidráulico del distrito. La CONAGUA con base en el Plan de Riegos hace la solicitud mensual de volúmenes de agua del Río Colorado a la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), pudiendo hacer movimientos de agua sólo en la magnitud señalada en el Tratado de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos. esto ha limitado la óptima entrega (oferta) -recepción (demanda) según los responsables de la SRL (Sociedad de Responsabilidad Limitada) ya que no existe flexibilidad para ajuste de gasto de acuerdo a los Planes de Riego y según los ciclos agrícolas (García , 2015). Cabe resaltar que el proceso de distribución en los módulos de riego está establecido en los reglamentos internos de las ACUs y en general en el reglamento del distrito de riego.

Para fines de planeación agrícola el año de los cultivos se divide en ciclos agrícolas y son periodos que reciben los nombres de las estaciones del año en que se realizan las siembras (primavera--verano, otoño--invierno, y perennes). Sin embargo, al considerar la totalidad del período de producción hasta que se llevan a cabo las cosechas, los ciclos se traslapan, es decir, todavía no termina un ciclo cuando inicia el otro, lo cual se debe a la duración de los períodos vegetativos de los cultivos: i) Cultivo de primavera-verano (cultivos cuya siembra se efectúe del 1º de febrero al 30 de septiembre), ii) Cultivo de otoño-invierno (cultivos cuyas siembras se realizan entre el 1º de octubre y el 31 de enero del siguiente año) y iii) Cultivos perennes (cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor de un año).

Para determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) con fines de determinar la capacidad del canal utilizando el método propuesto por la SARH, se utilizaba principalmente el método de Blaney-Criddle, o bien del método de Thornthwaite (Fernández, *et al.* 2015), de gran aceptación en el siglo pasado. Con las adecuaciones sugeridas por Iñiguez *et al.* (2011), se exhorta a los diseñadores a estimar la evapotranspiración por cultivo con base en métodos más robustos como el método de Penman-Montieth modificado por la FAO (Allen *et al.* 2008), además de utilizar el concepto de Grados Día Desarrollo ($^{\circ}D$) como las herramienta más adecuadas para predecir la fenología y desarrollo de los cultivos (Mcmaster *et al.*, 1997) y así justar mejor la demandas hídricas de los cultivos. El concepto $^{\circ}D$ integra en forma indirecta, a través de la temperatura, la energía calorífica acumulada requerida en las diferentes etapas de desarrollo fenológico de los cultivos. Es posible expresar el coeficiente de cultivo en función de los días grado acumulado de acuerdo con las ecuaciones propuestas por Ojeda (2011).



Una aplicación utilizada en la determinación de de la capacidad de canales usando esta metodología se reporta en Iñiguez et al. (2011, 2013). en donde la estimación de la evapotranspiración en una zona de riego (ET_{zr}) se efectúa en cinco pasos (Iñiguez et al., 2011): inicia con el cálculo de la evapotranspiración potencial por cultivo y fecha de siembra, y termina con la obtención de una curva general integral única para un año agrícola, al estimar la evapotranspiración de una zona de riego (ET_{zr}) que se usa en la determinación de la capacidad del canal con el método de Clement (Iñiguez *et al.*, 2007).

El Cálculo de láminas de riego corresponde a la capacidad útil de almacenamiento del suelo dentro de la profundidad radicular (SRH, 1973). Esta capacidad representa un porcentaje de contenido de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Para la determinación de la lámina de riego es necesario conocer los parámetros: densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente, la profundidad de las raíces de los cultivos para diferentes etapas de desarrollo y la correspondiente práctica de riego para cada cultivo. Esta lámina de riego se calcula con la ecuación (1):

$$Lr = P_o(CC-PMP)*Da*PR \quad (1)$$

Donde Lr: Lámina de riego (cm); P_o : Porcentaje de cantidad de humedad aprovechable; CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de Marchitez Permanente; Da: Densidad aparente del suelo (adimensional); PR: Profundidad radicular (cm); La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente se calculan como porcentaje del contenido de humedad con respecto a peso de suelo seco.

El intervalo de riego es el tiempo que transcurre entre un riego y el siguiente. Este intervalo termina cuando la planta consume la humedad contenida en la reserva útil del suelo. Para estimar el tiempo transcurrido entre dos riegos, se determina la relación entre la lámina de riego aprovechable y la evapotranspiración del cultivo diaria (ET_r) y es estimado con la ecuación (2):

$$I=Lr/\sum ET_{rd} \quad (2)$$

Donde I: Intervalo de riego (días); Lr: Lámina de riego aprovechable (cm); ET_{rd} : uso consuntivo diario (cm/día). Con los intervalos de riego calculados y las láminas de riego aprovechables, el número de riegos puede resultar entre 1 y mas riegos por mes, dependiendo del método de aplicación del riego.

Cabe subrayar que en años recientes la Gerencia de Distritos de Riego de la CONAGUA, ha realizado diversos estudios en los distritos de riego denominados planes directores (IMTA, 2007) y se han detectado una serie de acciones estructurales y no estructurales por emprender con fines de modernizar las zonas de riego del país y en especial los módulos de riego.

Actualmente, con la aplicación e innovación de herramientas informáticas se generan grandes volúmenes de información de diferentes variables útiles para facilitar cálculos numéricos laboriosos como la estimación de los requerimientos de riego generados en grandes zonas de riego y que son de gran importancia para acoplar las demandas hídricas de los cultivos con la aplicación del riego a través de la infraestructura hidráulica (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011).



Así, hoy en día, uno de los principales retos para los investigadores relacionados con la gestión de grandes zonas de riego dividido en varias zonas o módulos de riego, es realizar de manera eficiente estos cálculos numéricos y generar recomendaciones certeras y oportunas. Por lo anterior, sin duda alguna, los sistemas de riego se pueden diseñar y operar de forma más eficaz como consecuencia de utilizar eficientemente herramientas y metodologías para manejar grandes volúmenes de información generada en las zonas de riego (Ojeda-Bustamante, *et al.*, 2006 y Ojeda-Bustamante, 2008).

Con base en la revisión bibliográfica exhaustiva efectuada para el desarrollo del presente trabajo, en el conocimiento de los autores, por la publicación de los trabajos en los Distritos de Riego realizado por las Asociaciones Civiles de Usuarios, SRL y CONAGUA, no existe un procedimiento explícito, e integrado, para implementar una gestión hidrosistémica con aplicación en complejos sistemas de riego de gran extensión con diferentes cultivos, fechas de riego, ciclos agrícolas y diferentes módulos de riego, así que se desarrolla una función en la que ocurren tres variables; evapotranspiración de los cultivos, programación de distribución del agua y la capacidad de los canales.

En esta función base en la gestión hidrosistémica se conjugan las variables acordes a las condiciones generales que se integre la máxima demanda a los cultivos con el mayor grado de flexibilidad que satisfagan al usuario y cumplan con las expectativas de aprovechamiento de los recursos hídricos considerando sus condiciones agronómicas, climáticas locales y tipo de infraestructura del riego.

Materiales y métodos

En este apartado se presenta el desarrollo de la propuesta de gestión hidrosistémica integrada, y la metodología para su implementación, en zonas de riego complejas de gran extensión. Es decir, con presencia de diferentes cultivos simultáneos, diversas fechas de siembra y de requerimientos de riego, así como diferentes duraciones de ciclos fenológicos.

Zona de estudio: La zona de estudio corresponde al módulo Santa Rosa del distrito de riego 075 (DR-075) localizado en el Valle del Fuerte, al norte del estado de Sinaloa, México. La zona se localiza en una región árida al norte del estado de Sinaloa. El periodo de lluvias se concentra entre los meses de septiembre y octubre, muchas veces de origen ciclónico. 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 el 27%, dicho módulo por su extensión se destaca como el más grande del DR-075. El procedimiento para la asignación del riego (entrega-recepción) es con base a una programación de riegos semanal. La operación de la obra de cabeza (presa de almacenamiento) es responsabilidad de la autoridad federal, CONAGUA. Según la clasificación de los métodos de distribución (Iñiguez *et al.*, 2007), la responsabilidad del control de la distribución del riego es compartida Usuario-Autoridad (CONAGUA). La frecuencia del riego es programada en cada ACUR, el caudal 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 por el binomio Usuario-ACUR. Con estas condiciones de funcionamiento, el módulo de riego en estudio reporta una eficiencia global de operación anual del 51.4%, valor que refleja el método de distribución del agua utilizado en el DR-075.

Es importante señalar que en el DR 075 existe una excelente cultura de sistematización de información agrícola e hidrométrica. En efecto, se cuenta con una base de datos muy completa con información de los últimos 12 años agrícolas en el módulo Santa Rosa, que ha sido generada con el empleo del sistema de pronóstico de riego en tiempo real "Spriter" desarrollado por Ojeda (1999). La información climatológica 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. En virtud de que la zona de estudio se encuentra en una región semiárida, en este trabajo la precipitación no se considera ya que el periodo de máxima demanda de riego se presenta en los periodos secos del año.

Plan de cultivos: Se consideró el plan de riegos tipo de la zona de riego, 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).

Cuadro 1. Estadística de los principales cultivos del año 2004-2005 en el módulo Santa Rosa del DR-075.

Cultivos	Estadística de Lámina (cm) de los principales cultivos			Láminas (cm) parcelarias de los principales cultivos		
	Anual			Perennes	Primavera-Verano	Otoño-Invierno
	Neta	Bruta	Número Riego	Neta		
Perennes						
Alfalfa	67.6	78.7	9.2			
Caña azúcar	132.9	154.7	7.4	109.65		
Frutales	55.8	65.0	2.7	138.96		
Invierno						
Frijol	30.8	35.8	2.1			
Maíz	61.9	72.1	4.5			
Papa	34.0	39.6	5.9			32.27
Tomate	42.1	49.0	7.6			28.25
Primavera						
Maíz	80.4	93.6	4.6		45.26	
Sorgo	53.6	62.4	4.1		37.62	

El Cuadro 1 presenta los principales cultivos establecidos en el año 2004-2005. El plan de cultivos típico indica que el 11.7 % de la superficie tiene cultivos perennes, el 88.3 % son los cultivos de los ciclos anuales, de los cuales el 80 % son del ciclo Otoño-Invierno (OI) y el 20% son segundo cultivos en el ciclo primavera verano (PV).



Las estadísticas de la lámina parcelarias fueron establecidas con fines de planeación anual y se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Láminas de los principales cultivos módulo Santa Rosa del D. R 075.

Cultivo	Ciclo					
	Perennes		Otoño-Invierno		Primavera-Verano	
	Lámina (cm)	Cultivo	Lámina (cm)	Cultivo	Lámina (cm)	
Caña	109.65	Papa	32.27	Maíz	45.26	
Frutales	138.96	Tomate	28.25	Sorgo	37.62	
Total ponderada del ciclo	110.89	Total ponderada del ciclo	39.47	Total ponderada del ciclo	39.15	

Lámina total ponderada del módulo= 49.36 cm

En el Cuadro 3, de acuerdo con estudios previos realizados por Mendoza *et al.* (2003), se presenta el caso del maíz, uno de los cultivos principales del módulo Santa Rosa del D. R. 075, en el cual se muestra la fecha de siembra óptima en relación con la probable pérdida de rendimiento kg/ha, además en el mismo estudio se reporta Fecha de Siembra, Duración del ciclo (días), ET_o (mm), ET_r (mm) y el número de riegos en el Cuadro 4.

Cuadro 3. Probable pérdida de rendimiento kg/ha para el cultivo del maíz DR 075 (tomado de Ernesto et al., 2014).

Fecha de siembra	Probable pérdida de rendimiento kg/ha	Probable pérdida económica \$/ha
Sep-15	1,958	2,938
Sep-30	1,025	1,961
Oct-15	353	187
Noviembre	0	0
Dic-15	309	464
Dic-30	960	1,440
Ene-15	1,941	2,912

Cuadro 4. Relación de variable para el cultivo del maíz DR 075 (tomado de Ernesto et al., 2014).

Fecha de Siembra	Duración del ciclo (días)	ET_o (mm)	ET_r (mm)	Número de riegos
Sep-15	123	405	277	3
Oct-01	165	505	360	4
Oct-15	176	558	375	4
Nov-01	183	605	435	5
Nov-15	182	633	419	5
Dic-01	176	641	421	5
Dic-15	168	636	433	6
Ene-01	157	622	425	6
Ene-15	148	626	410	5

En la figura 1 se muestra la distribución de las fechas de superficie establecida (%) para cultivos, ciclo O-I en el DR 075. En la Figura 2 se muestra la distribución de las fechas de superficie establecida (%) para cultivos, ciclo P-V en el DR 075 (IMTA, 2009).

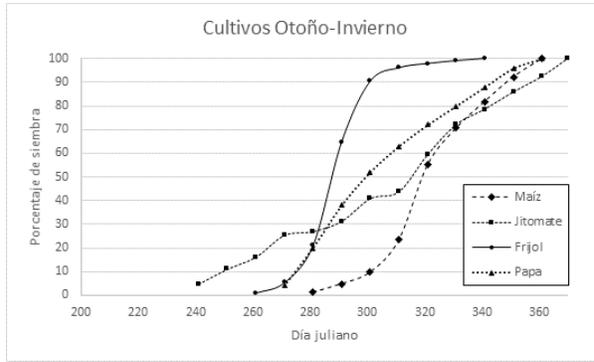


Figura 1. Distribución de fechas ciclo O-I

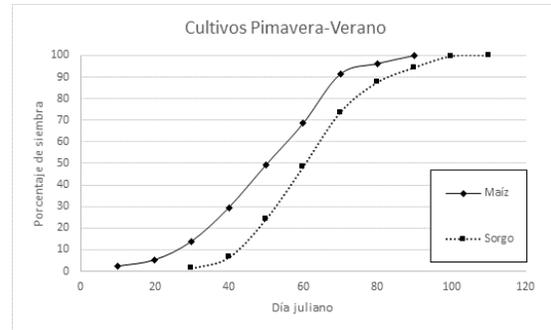


Figura 2. Distribución de fechas ciclo P-V

La determinación de la capacidad hidráulica de canales se realizó bajo el método de Clement propuesto por Iñiguez *et al.* (2012), Cuadro 5. La eficiencia de aplicación parcelaria reportada por SRH (SRH, 1973) es de $\eta = 70\%$ para riego por gravedad, para la conducción y distribución es de $\eta = 70\%$ para los canales con revestimiento de tierra. La eficiencia global η para diseño se estima como $\eta_{global} = \eta_{Conducción} * \eta_{aplicación}$, para los canales de tierra la eficiencia global es $\eta = 49\%$, tal como se reporta para el canal “Emilio Grivel” y por ser grandes extensiones cultivadas se considera que las horas del servicio de riego son las 24 h del día.

Cuadro 6. Capacidad de diseño ($L s^{-1}$) del canal “Emilio Grivel” con el método de Clement.

Kilómetro	Área (ha)	Tomas		H(μ)		Gasto Q_d (Ls^{-1})
		R	p	(μ)	(μ)	
0+000	27,285	1289	0.1506	0.1336	1.5232	27,863
6+740	26,752	1264	0.1506	0.1323	1.5291	27,355
8+344	25,442	1202	0.1506	0.1290	1.5442	26,104
9+400	25,269	1194	0.1506	0.1286	1.5462	25,939
10+400	20,770	981	0.1507	0.1166	1.6040	21,627
11+400	20,287	958	0.1507	0.1152	1.6108	21,162
12+400	19,899	940	0.1507	0.1141	1.6164	20,789
13+400	19,599	926	0.1506	0.1132	1.6207	20,500
15+400	19,029	899	0.1506	0.1116	1.6292	19,951
13+350	18,776	887	0.1506	0.1108	1.6331	19,706
18+017	18,001	850	0.1507	0.1085	1.6452	18,958
21+740	11,439	540	0.1508	0.0865	1.7708	12,564
22+740	11,073	523	0.1507	0.0851	1.7795	12,203
23+740	10,907	515	0.1507	0.0845	1.7835	12,039
24+740	2,600	123	0.1504	0.0412	2.1381	3,546
25+740	2,236	106	0.1501	0.0381	2.1724	3,143
26+740	1,679	79	0.1513		2.32	2,550
29+740	1,143	54	0.1506		2.32	1,877
	1,000	47	0.1506		2.32	1,691
	500	24	0.1506		2.32	999
	300	14	0.1506		2.32	687

El desarrollo de la propuesta metodológica de gestión de gestión hidrosistémica se resume en las seis etapas siguientes: **Etapas 1.** Se efectúa la estimación de la



evapotranspiración de referencia y se obtiene la evapotranspiración potencial (ET_p) por cultivo y fecha de siembra, se utiliza el concepto de acumulación de Grados Día Desarrollo ($^{\circ}D$) como criterio alternativo 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 *et al.* (2006). En este caso se construye una curva de la ET_p para cada una de las diferentes fechas de siembra que integra el periodo de siembra en la zona de riego. Se obtienen los $^{\circ}D$ usando la expresión de la ecuación 3 correspondiente, y con los parámetros de los cultivos se estima el coeficiente de cultivo en función de los $^{\circ}D$. La evapotranspiración potencial de un cultivo a partir de la fecha de siembra (FS) a la fecha de cosecha (FC) está dada por la ecuación 2.

$$ET_p = \sum_{i=FS}^{FC} K_{c-i} ET_{o-i} \quad (3)$$

Donde K_{c-i} y ET_{o-i} son el coeficiente de cultivo y la evapotranspiración de referencia, respectivamente, para el día i .

La información necesaria para estimar la variable ET_p es la siguiente: Climatología histórica y un plan que incluye cultivos propuestos con fechas, superficies de siembra y ciclos agrícolas. 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 codificados en lenguaje de programación Java. En virtud de que la precipitación durante el periodo de máxima demanda es mínima 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 donde la precipitación sea importante en el periodo de máxima demanda de los cultivos, ésta debe ser restada de la evapotranspiración diaria.

Etapas 2. Se realiza la programación del riego para cada fecha de siembra y cultivo. Para la determinación de la lámina de riego es necesario conocer tipo de suelo, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente, la profundidad de las raíces de los cultivos para diferentes etapas de desarrollo y la práctica del riego de cada cultivo. Esta lámina de riego se calcula con la ecuación (1). Los intervalos de riego se determinaron con la ecuación (2). Se resalta que en estudios realizados previamente se determinaron los intervalos de riego calculados para cultivos de todos los ciclos en el DR 075 así como las láminas de riego aprovechables, adoptando para este trabajo un número de riegos entre 1 y 2 riegos para el mes con máxima demanda y espaciados 18 días para el cultivo de maíz.

Etapas 3. Con base en los resultados de la aplicación de la ecuación 3 se construye la curva de ET_c acumulada para cada cultivo del maíz, por fecha de siembra de los ciclos OI, PV y cultivos perennes, se especifican los riegos de acuerdo con cada cultivo, hasta la obtención de la ET_c acumulada en cm para la superficie establecida de policultivos. En esta etapa se obtienen los resultados



parciales de: la cantidad de hectáreas, láminas de riego, programación del riego y se compara el gasto necesario para satisfacer la demanda con el gasto disponible en el canal para cada punto de entrega.

Etapa 4. En esta etapa se construye la curva única de hectáreas establecidas para el cultivo del maíz por ciclo compuesta por las hectáreas de las diferentes fechas de siembra, iniciando con la primera decena el día 281 juliano hasta llegar a la siembra del total del cultivo, y se toma en cuenta la superficie sembrada por fecha de siembra, tal como lo indica la ecuación 3. En esta etapa se obtienen los siguientes resultados parciales: la cantidad y ubicación específica de hectáreas con programación del riego para cada decena, lo cual facilita la estimación del gasto necesario y disponible en el canal en los puntos específicos de entrega hídrica.

Etapa 5. En esta etapa se integra la superficie, considerando la ocupación por cultivo del ciclo PV, OI y Perennes, tal como se indica en la ecuación 3. Así, en esta etapa se obtienen los resultados parciales siguientes: la cantidad y ubicación específica de hectáreas con programación del riego para cada decena, lo cual facilita la estimación del gasto necesario y disponible en el canal en los puntos específicos de entrega hídrica.

Etapa 6. En esta etapa se obtiene la función general conjunta de los tres ciclos PV, OI y Perennes para el año agrícola, encontrándose la variable superficie con requerimiento de riego en la zona de riego total y por decena. La matriz de información obtenida con base en el cuadro 6, cuenta con n columnas, para el llenado se inicia con el ciclo O-I por cultivo, el día juliano de inicio de la primera siembra, existirán tantas columnas $n(i)$ como número de fechas de siembra de cultivo. La columna 1(1) está dividida en la columna día, es desde la fecha de siembra hasta la terminación de la etapa fenológica, y la columna cultivo con el resultado en forma tabular de la obtiene la evapotranspiración potencial (ET_p) por cultivo y fecha de siembra, área y fechas de riego de cada fecha de siembras. Con la columna $n(i)$, con las columnas Día y Cultivo área y fechas de riego de cada fecha de siembras se repite el proceso, así se hace para todos los cultivos y ciclos. En la columna 3 se anota la superficie con cultivo 3(a) de todos los días del año y en la columna 3(b) de anotan las superficies por decena con riego. En la columna 4(a) y 4(b) se reportan los volúmenes diario y decenal. Con la matriz completa se obtiene, la cantidad de hectáreas con requerimiento hídrico, láminas de riego que al multiplicarla por las hectáreas se obtiene el volumen diario decenal, se incluye las eficiencias totales, y finalmente el gasto necesario para satisfacer la demanda hídrica con el gasto disponible en el canal de distribución para cada punto de entrega.

Como se observa en esta etapa se ha logrado integrar en una función conjunta las variables: demanda hectáreas riego, programación de la distribución y capacidad hidráulica de canales.

Cuadro 6. Matriz cultivos fechas de siembra y volumen. Matriz funcional que integra los tres ciclos PV, OI y Perennes

1(1)		n(i)		3		4	
Cultivo 1(1)		Cultivo n(i)		Superficie		Volumen	
Día	$ET_p = \sum_{i=FS}^{FC} K_{c-i} ET_{o-i}$	Área	Fecha de riego	Día	$ET_p = \sum_{i=FS}^{FC} K_{c-i} ET_{o-i}$	Con Cultivo	Riego Cultivos Decenal
							Diario

Análisis y discusión de resultados

Los resultados se presentan de acuerdo con el desarrollo de las seis etapas de la propuesta metodológica de gestión hidrosistémica. Así, se efectuó la estimación de la evapotranspiración de referencia y se obtuvo la evapotranspiración por cultivo (ET_c) y fecha de siembra de acuerdo con la ecuación 3. En el Cuadro 7, se muestran los resultados acumulados ET_c por fecha de siembra para las 9 fechas de siembra para el cultivo del maíz para el ciclo Otoño-invierno, se incluye fecha de siembra, día Juliano de la siembra, número de siembra, y por último la ET_c integrad de las 9 fechas de siembra con una superficie total de 10, 918 ha para el módulo Santa Rosa del D. R 075, en el ciclo agrícola 2004-2005. Así mismo, en el Cuadro 8 también se presentan los resultados acumulados ET_c por fecha de siembra para las 9 fechas de siembra para el cultivo del maíz para el ciclo Primavera-verano, se incluye fecha de siembra, día Juliano de la siembra, número de siembra, y por último la ET_c integrada de las 9 fechas de siembra con una superficie total de 1, 161 ha para el módulo Santa Rosa del D. R 075, en el ciclo agrícola 2004-2005.

Cuadro 7. Fechas de siembra cultivos de Maíz para el módulo Santa Rosa del D. R 075.

Otoño-Invierno				Primavera - Verano			
Siembra día Juliano	Número siembra	ETc acumulado	Superficie por fecha %	Siembra día Juliano	Número siembra	Superficie por fecha %	ETc acumulado
280	1	42.31	1.3	10	1	2.2	49.0
290	2	46.09	3.6	20	2	3.0	48.4
300	3	49.13	4.9	30	3	8.7	48.4
310	4	50.60	13.6	40	4	15.6	46.8
320	5	51.16	31.6	50	5	19.8	45.7
330	6	51.21	15.6	60	6	19.2	44.7
340	7	51.05	11.3	70	7	22.9	43.7
350	8	50.62	10.4	80	8	4.9	42.7
360	9	50.04	7.7	90	9	3.7	41.6
			cm			1,161.9 ha	cm

Las láminas aplicadas por cultivo de acuerdo con la política de riego y donde el número riegos es variable ya que se aplica el siguiente riego al consumirse el 80 % de la humedad aprovechable de acuerdo a la ecuación 1 y 2. La Lámina Neta es de 10 cm y bruta es afectada por la eficiencia reportada para los principales cultivos del módulo Santa Rosa del DR-075, Perennes, Otoño-Invierno, Primavera-Verano excepto para el Tomate con Lámina Neta (8 cm), Lámina Bruta (16.4 cm).

El periodo de siembra del maíz es desde los primeros días 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. Se observa que para el cultivo de jitomate no presenta ningún periodo con toda la superficie establecida, ya que este cultivo tiene un amplio periodo de siembra, por lo que las primeras cosechas se presentan todavía en el periodo global de siembra considerado. 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 del 100%.

Por ser el cultivo del maíz el más representativo de la zona, se presentan los resultados de la aplicación de la ecuación 3 (**etapa 1**). En la figura 3 se muestra la curva de ET_c acumulada para el cultivo del maíz con fecha de siembra del 16/12/2004 (siembra número 8, día Juliano 350, cuadro 5, del ciclo O-I), para esta fecha se suministran cinco riegos con ET_c acumulada de 50.62 cm, la superficie establecida fue de 1,135.51 ha, representando el 10.4 % de siembra de maíz el ciclo Otoño-invierno. La programación de suministro hídrico es decenal para entrega lunes o jueves, para el día 1 primer riego y riegos subsecuentes para el día 67, 87, 107, 125, lámina de 10 cm por riego, el intervalo de riego mínimo es de 17 días, el gasto en el canal es de $1.87 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ gasto necesario por las condiciones del canal con eficiencia del 49% del canal Emilio Grivel.

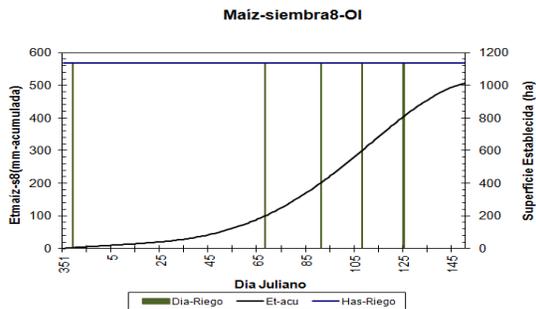


Figura 3. Hectáreas establecidas –hectáreas riego

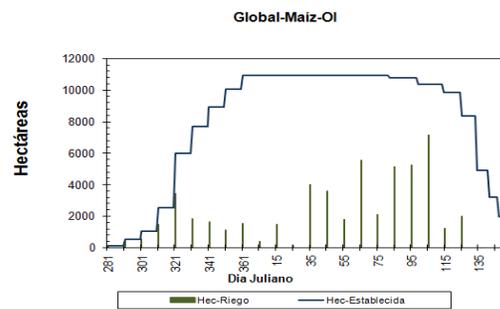


Figura 4. Hectáreas establecidas –hectáreas riego

En la figura 4 (**etapa 4**), se muestra como resultado la curva única de hectáreas establecidas para el cultivo del maíz del ciclo OI e integra las hectáreas de las diferentes fechas de siembra, iniciando con la primera decena el día 281 Juliano hasta llegar a la siembra de la 10,918 hectáreas, y considerando la superficie sembrada por fecha de siembra, tal como lo indica la ecuación 3. Los valores para el volumen máximo requerido para maíz del ciclo OI del año agrícola en el módulo Santa Rosa del D. R 075, se presentan en el día Juliano 99, con fecha del 09/04/2005, el volumen máximo de $557,134.56 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$; ET_{c1} de (5.3 mm/día) y una superficie establecida de 10,383.36 ha, la superficie programada decenal es de 7,129.8 ha y un gasto de capacidad de diseño en el canal de $8.18 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$, gasto necesario de $8.17 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ y un intervalo de 16 días, para una programación semanal con entrega lunes o jueves, con una eficiencia global del 63%, resulta como en el caso anterior que al aumentar la eficiencia de conducción del 70% al



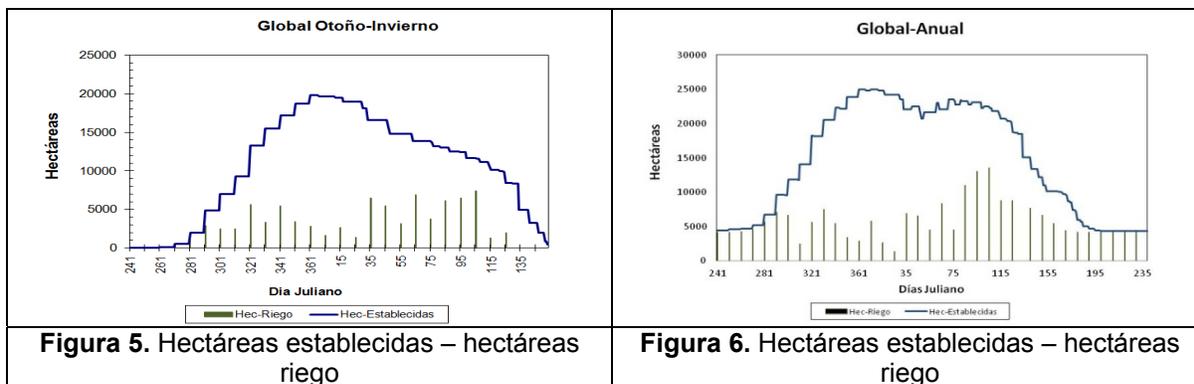
90% se alcanza un intervalo de 10 días por la misma condición se ser la última parte del sistema.

En la implementación de la **etapa 5**, 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 3. En la figura 4 (que corresponde a la etapa 5) se muestra la curva que integra ET_{1c-i} del ciclo OI. Se destacan los valores para del ciclo OI con el volumen pico requerido para el día Juliano 105 con Fecha 15/04/2001, un volumen máximo demandado de 672, 200.7 m³ día⁻¹; ETc = (5.172 mm día⁻¹) y una superficie de 11, 643.0 hectáreas establecidas (papa, 1,051.33 ha, maíz 10,383.36 ha, jitomate 208.42 ha) superficie programada decenal de 7,416.8 ha y un gasto de capacidad en el canal de 8.18 m³ seg⁻¹, gasto necesario de 8.17 m³ seg⁻¹ y un intervalo de 16 días, para una programación semanal con entrega lunes o jueves y con una eficiencia global del 63%, para este caso ya se dispone de la capacidad de todo el canal, es decir, por capacidad no existe restricción.

Finalmente, al completar la implementación metodológica propuesta en la **etapa 6** se obtiene la matriz general integrada de los tres ciclos PV, OI y Perennes para el año agrícola. En figura 5 se muestra la relación de las hectáreas establecidas para cada día, además las hectáreas con requerimiento de riego decenal para todas las decenas del año. El valor pico se presenta el día Juliano 105 con Fecha 15/04/2005; (día Juliano 231); un volumen máximo de 918,487.63 (m³ día⁻¹); ETzr = 4.07892 (mm día⁻¹) y una superficie de 22,518.0 ha establecidas, para la decena del 105 al 115, con una eficiencia global para diseño del 51.3% se necesitaría un gasto de 21.70 m³ s⁻¹.

La decena con máxima demanda al sistema es del día Juliano 101 al 111 con Fecha inicia 11/04/2005 al 21/04/2005 demanda con superficie para riego de 13, 548 ha, de las cuales 1, 985 ha son del ciclo Primavera-verano, 7,416 ha Otoño-Invierno y 4,146 ha de perene, para este caso como el anterior ya se dispone de toda la capacidad del canal, aquí nuevamente se corrobora que por capacidad hidráulica de conducción y disponibilidad volumétrica en el canal no existe restricción se dispone del gasto de 27.185 m³ s⁻¹, se resalta que el gasto del diseño del canal con el método de Clement es de 27.86 m³ s⁻¹, esto es mayor al gasto necesario en la decena máxima.

Con respecto al volumen programado utilizado bajo el plan de cultivos, la ACUR reporta un volumen bruto programado, esto es sin eficiencia en punto de control al inicio del módulo de 226,480 Millares de m³, el volumen estimado al integrar la curva de la figura es un volumen estimado de 154 544.00 Millares de m³, esto es 47 % menor al programado por los usuarios, lo que constituye un indicador real de la eficiencia global del hidrosistema, es decir del distrito de riego bajo la propuesta de gestión hidrosistémica aquí presentada.



Conclusiones

La sistematización decenal de la demanda hídrica de los cultivos facilita el conocimiento de la superficie con requerimiento de riego desde el inicio de la primera fecha de siembra de cada uno de los cultivos y para cada uno de los ciclos hasta el último riego necesario.

Con el conocimiento de las hectáreas con requerimiento de riego se ajusta la distribución, también semanal del agua por la red, así mismo se conoce el gasto necesario diario por aplicar para todos los ciclos, al conocer la fecha y decena requerida de solicitud.

Para el caso de estudio, se concluye que la capacidad del canal en cualquier sección no es limitante para aplicar el plan de riego, esto implica que para cualquier otro plan de riego se tendría que repetir toda la metodología de gestión hidrosistémica aquí propuesta en la concurren las tres principales variables de las grandes zonas de riego, es decir, la demanda hídrica de los cultivos, la programación de distribución del agua y la determinación de la capacidad hidráulica de los canales.

Con respecto del servicio de riego, en el caso de estudio, se concluye que la satisfacción depende sólo de la correcta administración de la Asociación de Usuarios de Riego, ya que por infraestructura y por las condiciones de plan de riego, no existe limitante alguna siempre que la programación al riego sea programada, esto es de común acuerdo Autoridades - Usuarios.

Adicionalmente, con base en los resultados obtenidos se recomienda ampliamente la implementación de una gestión hidrosistémica, como la aquí propuesta, en cualquier distrito de riego. Particularmente, debido a sus características de construcción pues ésta tiene en consideración de forma conjunta las tres principales variables de una zona de riego, es decir, la demanda hídrica de policultivos simultáneos, la asignación volumétrica y la capacidad hidráulica de conducción.

Referencias bibliográficas



- Fuentes C., H. Saucedo, L. Rendón. 2012. Capítulo 7. Diseño de Riego por Gravedad. En Riego por Gravedad. Editores Carlos Fuentes y Luis Rendón. Universidad Autónoma de Querétaro. 321-358.
- Alarcón, J.; Garrido, A; and Juana, L. 2014. Optimal Water Allocation in Shortage Situations as Applied to an Irrigation Community. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 140(3): 04013015(8).
- 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. Serie Cuadernos Técnicos. Roma, Italia. FAO. 298 p.
- Clement, R. 1965. Computation of flow in Irrigation Systems Operating 'On Demand' La Société du canal de Provence et d'Aménagement de la Region Provencale, Le Tholonet, 13 December, 1965. Traducción al inglés por U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, Junio, 1979.
- 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, U.S.A.
- Delavar, M.; Moghadasi, M.; and Morid, S. 2012. Real-Time Model for Optimal Water Allocation in Irrigation Systems during Droughts. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138(6), 517–524.
- FAO. 1976. Pequeñas obras hidráulicas. Estudio FAO Riego y drenaje 26-1 y 2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. FAO. 40 p.
- Fernández Reynoso, D. S.; Martínez Menes M. R. Arturo Tavarez Espinosa C.; Castillo Vega R. y Salas Martínez, R. 2015. Estimación de las demandas de consumo de agua. Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. México. p 33.
- Guzmán-Ruiz, S.; Valenzuela Solano, C.; Félix Valencia, P.; Jiménez Trejo, A. y Ruiz Carbajal, S. 2008, Necesidades hídricas de los principales cultivos en el estado de Baja California. INIFAP. Instituto Nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias. CIRN, Campo experimental Valle de Mexicali, México, Folleto técnico No 18, P.18.
- García, V. L. A. 2015. Medidas para mejorar entregas de Agua CILA-SRL, Distrito de Riego 014, Revista Aquí en el Valle, Editor Luis Barrera Jr., San Luis Rio Colorado, Sonora, México. 49 p.
- IMTA. 2007. Plan director distrito de riego Rosario Mezquite. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.



- Hamideh Noory; Abdol Majid Liaghat; Masoud Parsinejad; and Omid Bozorg Haddad. 2012. Optimizing Irrigation Water Allocation and Multicrop Planning Using Discrete PSO Algorithm. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(5), 437–444.
- Íñiguez-Covarrubias, M.; De León, M. B.; Prado, H. J. V.; Rendón, P. L. 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*. XXII (2): 81-90.
- Íñiguez-Covarrubias, M., Ojeda-Bustamante, W. y Rojano-Aguilar A. 2011. Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Rev. FCA UNCUYO*. 43(2): 175-191.
- Mendoza, R. J.L., J. Macías, y E. Cortez. 2003. Tecnología para mejorar la productividad del maíz en el norte de Sinaloa y su impacto económico. Folleto Técnico No. 21. Fundación Produce Sinaloa. 37 p.
- Ojeda, B. W. (1999). Pronóstico de riego en tiempo real. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, y H. Unland. 2006. Programación integral del riego en maíz. *Agrociencia* 40: 13-25.
- Ojeda, W., L. Hernández, Y I. Sánchez. 2008. Requerimientos de riego de los cultivos. En *Manual para Diseño de Zonas de Riego Pequeñas*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor., México. 1-49 p.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, y Íñiguez C. M., Montero-M J.M. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos, *Agrociencia* 45:1-21.
- Kumari, S. and Mujumdar, P. P. 2015. Reservoir Operation with Fuzzy State Variables for Irrigation of Multiple Crops. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(11): 04015015(13)
- Spare, D. P., J. Wang, E. Hagan. 1980. Sizing rice irrigation canals. *Transaction of the ASAE*. 23(4): 914-918.
- S. R. H. 1973. Proyecto de Zonas de Riego. Dirección de Proyectos de Grande Irrigación, Departamento de Canales. México, D. F.
- Srinivasa Prasad, A.; Umamahesh, N. V; and Viswanath, G. K. 2006. Optimal Irrigation Planning under Water Scarcity. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(3), 228–237.