

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL



<http://opn.to/a/omM1V>

Análisis del requerimiento hídrico en un distrito de riego de Tamaulipas, México

Analysis of the water requirement in an irrigation district of Tamaulipas, Mexico

MC. Edgar Omar Ruiz-del Ángel*, Dra. Rocío del Carmen Vargas-Castilleja, Dr. Julio César Rolón-Aguilar, Dr. Carlos Alberto Chávez-García, Dr. Roberto Pichardo-Ramírez

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller”, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Centro Universitario Sur, Tampico, Tamaulipas, México.
Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Querétaro, México.

RESUMEN. La tecnificación y el desarrollo tecnológico agrícola repercuten en la seguridad alimentaria de la población. El desarrollo de modelos que consideren el aprovechamiento del agua en los cultivos, considerando la disponibilidad de agua adecuada a la variación del clima y suelo en las zonas de riego, son la pieza clave para mitigar los efectos de un clima cambiante y de las malas prácticas. En la República Mexicana la superficie regable se encuentra dividida en 86 Distritos de Riego (DR) y en 40,000 Unidades de Riego. El objetivo fue modelar los requerimientos de agua del DR 002 Mante en Tamaulipas, México para los ciclos agrícolas 2007 al 2014 mediante la construcción de un modelo en Cropwat. El cultivo analizado fue la caña de azúcar para un estimado de 15,250 ha de superficie regable. Se destaca que para el ciclo 2009-2010 el volumen realizado es 51.78% menor que el volumen de requerimiento obtenido en el modelo. El análisis contribuye al incremento en la eficiencia del uso del agua a nivel parcelario, al rendimiento de la planta y al manejo integral del recurso, tema de seguridad nacional en México en un contexto de condiciones cambiantes del clima.

Palabras clave: agricultura de riego, requerimiento de agua, caña de azúcar.

ABSTRACT. Technification and agricultural technological development have an impact on the food security of the population. The development of models that consider the use of water in crops, taking into account the availability of water in view of the variation of climate and soil in the irrigation areas, are the key to mitigate the effects of a changing climate and bad practices. In the Mexican Republic, the irrigable area is divided into 86 Irrigation Districts (DR) and 40,000 Irrigation Units. The objective was to model the water requirements of DR 002 Mante in Tamaulipas, Mexico for the 2007 to 2014 agricultural cycles by constructing a model in Cropwat. The analyzed crop was sugar cane for an estimated 15,250 ha of irrigable area. It is highlighted that for the 2009-2010 cycle the volume performed is 51.78 % less than the volume of requirement obtained in the model. The analysis contributes to the increase in the efficiency of water use at the parcel level, to the yield of the plant and to the integral management of the resource, an issue of national security in Mexico in a context of changing climate conditions.

Keywords: irrigation agriculture, water requirement, sugar cane.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental en los procesos medioambientales y vitales para los seres vivos. Para las plantas, el volumen de agua que estas consuman determina la cantidad

de frutos que producirán, por lo tanto, no es de sorprenderse que en México el sector con mayor demanda de agua es el agrícola, pues alrededor de 30.2 millones de hectáreas son dedicadas

*Autor para correspondencia: Rocío del Carmen Vargas-Castilleja, e-mail: rocvargas@docentes.uat.edu.mx

Recibido: 17/09/2018.

Aprobado: 15/03/2019.

a la agricultura, siendo el 18% superficie de riego y el 82% restante de temporal (CONAGUA, 2017). La superficie regable estimada en México es de 6.5 millones de hectáreas, de las cuales 3.3 millones están distribuidas en 86 Distritos de Riego (DR), mientras que las 3.2 millones restantes corresponden a aproximadamente 40 mil Unidades de Riego (UR). Para los DR el agua es conducida a través de canales por gravedad, en el caso que se obtenga de una fuente superficial como presas, derivación o bombeo directo de la corriente, y en el caso de una fuente subterránea es a través del bombeo de pozos.

La prioridad de la agricultura de riego es la optimización del uso del agua, por lo que esta práctica no debe significar la utilización de grandes volúmenes de agua (Vargas, 2015). El aprovechamiento del agua disponible para riego es la premisa bajo las actuales condiciones cambiantes del clima, ya que en muchas zonas del mundo la escasez de agua ha ido en aumento (Cavero *et al.*, 2000). Con base en lo anterior, son necesarias las proyecciones de la necesidad del agua en los cultivos, así como la producción de los mismos (Zhang *et al.*, 2018).

En los DR es común que durante el recorrido que hace el agua desde la fuente de suministro hasta la parcela, donde se efectuará el riego, se pierda más del 50% del recurso, esto debido a pérdidas durante la conducción, a las malas condiciones de la infraestructura y a la poca tecnificación del riego.

Tener el conocimiento del volumen de agua que requieren los cultivos, de acuerdo a las condiciones edafoclimáticas y su desarrollo, hace más sencillo el equilibrio entre el riego y las demandas de los mismos, ya que en días con mayor insolación, con vientos fuertes o con baja humedad ambiental, los requerimientos de agua pueden ser altos (Ángeles *et al.*, 2007). Si se subestiman las cantidades de agua que requieren los cultivos, se puede generar una condición de estrés hídrico, lo cual afecta directamente el rendimiento. Una consideración importante es que las áreas de irrigación se ven seriamente afectadas por la variabilidad en las temperaturas (Arteaga *et al.*, 2011) (Paredes-Tavares, 2015), debido a los efectos en la evapotranspiración, caso contrario en las áreas de secano, donde la lluvia juega un papel importante.

Con la finalidad de elaborar programas de riego y optimizar las cantidades de agua que se utilizan en la agricultura, han surgido diferentes programas computacionales que permiten realizar dicha tarea, expertos en riego de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) recomiendan el programa Cropwat como una herramienta de soporte para estimar las necesidades de agua de los cultivos a partir de datos climatológicos e información elemental de los mismos (Arteaga *et al.*, 2011). El software calcula principalmente la evapotranspiración de referencia, los requerimientos de agua de los cultivos, así como programas de riego bajo diferentes escenarios (Caicedo *et al.*, 2015).

La agricultura en México genera gran parte de la producción de los alimentos que se consumen en el país, así como empleos, lo que contribuye al desarrollo del medio rural (Iñiguez *et al.*, 2015), incluso el 78% del agua en México es destinada al uso consuntivo agrícola. Uno de los cultivos más significativos, es la caña de azúcar, siendo históricamente la industria

azucarera en México una de las más importantes (Iñiguez *et al.*, 2015). Las áreas donde se cultiva la caña de azúcar dependen en gran medida de las lluvias que se presenten para cumplir los requerimientos de agua en el crecimiento de la planta, resaltan la importancia de comercialización de la agroindustria azucarera, los subproductos y el aprovechamiento de la biomasa de la caña a través de una diversificación del producto, coadyuvando al desarrollo económico y sustentable, sin embargo, el estrés hídrico, merma las condiciones para lograr producciones que satisfagan la demanda.

En el presente trabajo se llevó a cabo una estimación de los volúmenes de requerimiento de agua mediante una modelación en Cropwat versión 8.0 para el Distrito de Riego 002 Mante, Tamaulipas para el periodo 2007 – 2014. Los volúmenes obtenidos por el modelo para cada año agrícola se contrastaron con los volúmenes reales programados y consumidos por el DR. Debido a las condiciones cambiantes del clima, el aumento de la población, la disponibilidad de agua, entre otras consideraciones, la pertinencia de estos análisis radica en la necesidad de planear con la menor incertidumbre posible los requerimientos de agua para los mejores rendimientos en los cultivos, aumentando la productividad de los recursos hídricos existentes (Banerjee *et al.*, 2016).

Cabe destacar que, aunque existen paquetes tecnológicos que proporciona el Campo Experimental La Huastecas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias en donde se describen las especificaciones de la preparación del terreno para la siembra, las variedades recomendadas, el uso de fertilizantes y su aplicación para los Distritos de Desarrollo Rural (DDR) 162 González y el DDR 161 Mante al que corresponde el área de estudio de la presente investigación, la desorganización de los propietarios de las tierras en relación a las fechas de cortes del cultivo, generan el desfase en los riegos, requiriéndose agua en temporadas donde la disponibilidad es baja y por consecuencia se presentan decrementos en los rendimientos, pues las etapas fenológicas de la caña poseen requerimientos hídricos diferentes.

MÉTODOS

Área de estudio

El DR 002 Mante ubicado en el municipio de El Mante, en el Estado de Tamaulipas, México tiene una superficie de riego de 15,500 ha de un total de 19,165.3 ha, esta varía anualmente (Figuras 1 y 2). El cultivo principal es la caña de azúcar cubriendo el 99.5% de la superficie, el restante se destina para la siembra de cítricos o pastizales.

El proceso de construcción del modelo se llevó a cabo mediante Cropwat versión 8.0, cuyas funciones principales son calcular la evapotranspiración de referencia, los requerimientos de agua del cultivo y de irrigación, así como el desarrollo de diversas planificaciones de riego bajo diferentes condiciones (Stancalie *et al.*, 2010). Entre los insumos requeridos para la modelación, se destacan las temperaturas máximas y mínimas, las precipitaciones medias y las propiedades de los cultivos.

Para estimar las temperaturas máximas y mínimas se localizaron las estaciones meteorológicas (EM) de Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que se encontraban dentro y fuera del DR, seleccionando 8 EM (Figura 2). Las temperaturas se extrajeron mensualmente para cada año del periodo 2007-2014. Estas temperaturas se procesaron en un Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante una interpolación obteniendo isotermas para todos los meses de todos los años

del periodo bajo análisis. Finalmente, se realizó un promedio aritmético de todas las isotermas que cruzaban el DR, dando como resultado la media mensual de temperatura máxima y mínima. En el caso de los datos de la estación, como coordenadas geográficas y de altitud, se eligió un punto representativo en el DR y se usaron dichas coordenadas de posición, encontrándose este a 22.773383° latitud norte y a 98.966029° longitud oeste y a una altitud de 60 metros sobre el nivel del mar.

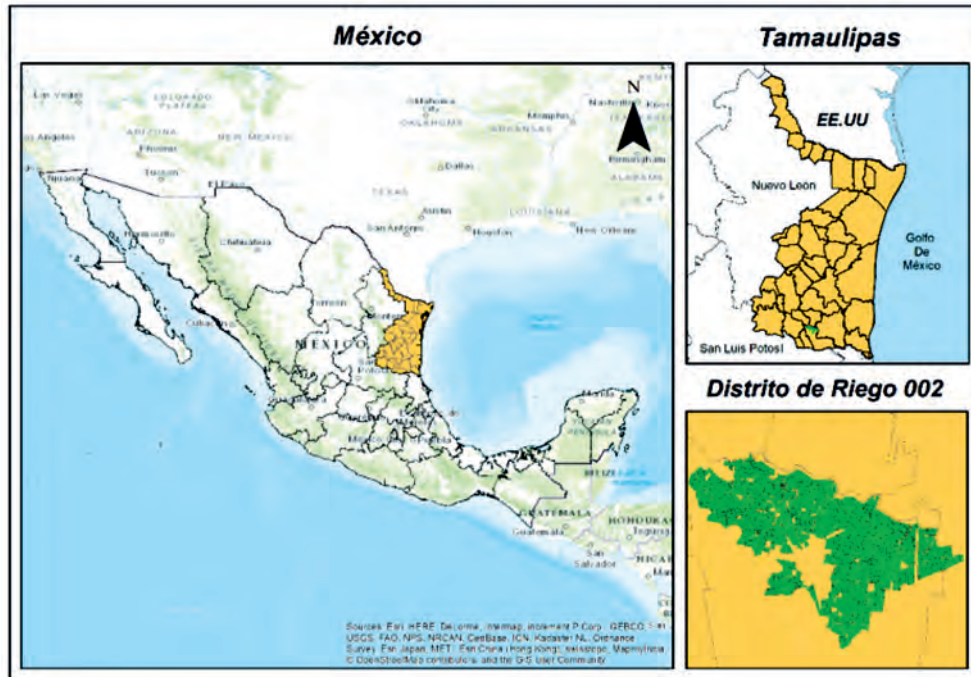


FIGURA 1. Localización del área de estudio.

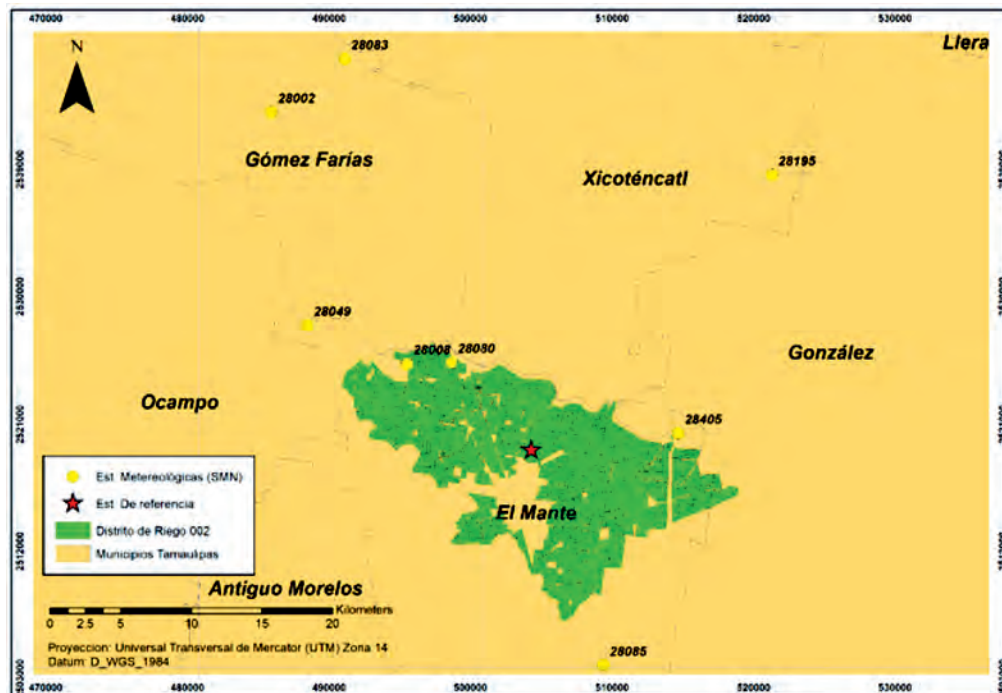


FIGURA 2. DR 002 Mante y estaciones meteorológicas del SMN.

El año agrícola en México comienza del 1 de octubre al 30 de septiembre del año siguiente, por lo tanto, la integración de las temperaturas para cada año agrícola del periodo de análisis consideró este criterio de inicio y fin del ciclo. La evapotranspiración fue estimada por el mismo modelo a partir del método de Penman-Monteith según FAO (2017) que se muestra en la ecuación (1).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

donde: ET_o - evapotranspiración de referencia, mm d^{-1} ; R_n - radiación neta en la superficie del cultivo, $\text{MJm}^2\text{d}^{-1}$; R_a - radiación extraterrestre, $\text{MJm}^2\text{d}^{-1}$; G - flujo de calor del suelo, $\text{MJm}^2\text{d}^{-1}$; T - temperatura media del aire a 2 m de altura, $^{\circ}\text{C}$; u_2 - velocidad del viento a 2 m de altura, ms^{-1} ; e_s - presión de vapor a saturación, kPa ; e_a - presión real de vapor, kPa ; $e_s - e_a$ se toma como el déficit de presión de vapor, kPa ; Δ - pendiente de curva de presión de vapor, $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$; γ - constante psicrométrica, $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$.

En el caso de la precipitación se obtuvo una media mensual para cada uno de los años del periodo de análisis, para ello se utilizó el método de polígonos de Thiessen Aparicio (1989) y

Aparicio (2004), partiendo de la información de las EM mencionadas anteriormente. Para cada EM se determinó la lámina de precipitación acumulada mensual, seguido de la aplicación del método de precipitación media para cada año.

La precipitación efectiva fue estimada por Cropwat a partir de las fórmulas propuestas por FAO, en función de la lluvia caída, cómo se muestra en la siguiente ecuación (2).

$$\begin{cases} P_{Efec} = 0.6P - 10 & P \leq 70 \text{ mm} \\ P_{Efec} = 0.8P - 24 & P > 70 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

donde P_{Efec} es la precipitación efectiva, mm y P es la precipitación media mensual, mm

Caña de azúcar

Para cada año, del área total destinada a siembra de caña, un 25% se consideró para caña virgen o planta y la superficie restante como soca. Las propiedades del cultivo tomaron la base de los valores estándar correspondientes a la caña de azúcar (FAO, 2017), estos valores se muestran en la Tabla 1 y Tabla 2. La altura máxima del cultivo se tomó como 3 m.

TABLA 1. Información del cultivo para la modalidad de soca y resoca

Etapas de crecimiento	Inicial	Desarrollo	Media	Final	Total
Coefficiente de cultivo (Kc)	0.4		1.25	0.75	
Duración (días)	30	50	180	100	360
Profundidad Radicular (m)	0.5		1.6	1.6	
Agotamiento crítico (Fracción)	0.6		0.6	0.6	
Factor de respuesta al rendimiento (Ky)	1.1	1.15	1.18	1.2	

TABLA 2. Información del cultivo para la modalidad de planta o caña virgen

Etapas de crecimiento	Inicial	Desarrollo	Media	Final	Total
Coefficiente de cultivo (Kc)	0.4		1.25	0.75	
Duración (días)	50	70	220	140	480
Profundidad Radicular (m)	0.5		1.6	1.6	
Agotamiento crítico (Fracción)	0.6		0.6	0.6	
Factor de respuesta al rendimiento (Ky)	1.1	1.15	1.18	1.2	

Se estima la fecha de cosecha a partir de la duración de las etapas de crecimiento, con la finalidad de un mayor ajuste a los resultados de la modelación y dado que para cada año agrícola se realizó un modelo independiente, las fechas de siembra y de cosecha se manejaron considerando una cierta secuencia (Tabla 3), en el caso de la

soca, la fecha de siembra se considera cuando a la planta le empiezan a brotar las hojas después que se ha llevado a cabo el corte, estas fechas se eligieron dentro de los meses en los que se lleva a cabo la zafra. Para el caso de la caña virgen o planta, la fecha de siembra en todos los casos fue el 18 de julio y la de cosecha el 09 de noviembre.

TABLA 3. Fechas de siembra y cosecha para la caña soca empleadas en la modelación

Año Agrícola	Fecha de Siembra	Fecha de cosecha
2007 – 2008	20 – Dic	14 – Dic
2008 – 2009	01 – Ene	26 – Dic
2009 – 2010	15 – Ene	09 – Ene
2010 – 2011	05 – Nov	19 – Ene
2011 – 2012	05 – Feb	30 – Ene
2012 – 2013	15 – Feb	09 – Feb
2013 – 2014	01 – Mar	23 - Feb

Suelo

Las propiedades del suelo consideradas (Tabla 4), fueron la capacidad de campo del suelo (CC) (Lambers *et al.*, 2008), el punto de marchitamiento permanente (PMP) (Muller, 1964) y la tasa máxima de infiltración o bien, la conductividad hidráulica a saturación (Ks) (Forsythe, 1975). El suelo en el DR es de tipo *franco arcilloso*, y los valores son un estándar para esta tipo (Zataráin *et al.*, 2012). Para el caso de la profundidad radicular máxima, se tomó el valor usado en las Tablas 1 y 2, mientras que el agotamiento inicial de humedad del suelo se consideró en cero.

TABLA 4. Propiedades hidrofísicas del suelo empleadas en la modelación

Propiedad del suelo	Valores
CC (cm^3/cm^3)	0.34
PMP (cm^3/cm^3)	0.19
Ks ($mm/día$)	36
CC – PCP (cm^3/cm^3)	0.15=150 mm/m

Eficiencia del sistema de riego

Cuando el agua destinada para riego es conducida desde la fuente de suministro hasta el terreno donde se efectuará el riego, sufre pérdidas y éstas determinan la eficiencia del sistema de conducción. Para obtener los volúmenes de requerimiento de agua y contrastarlos con los reales, se tomaron las eficiencias registradas en el DR en cada año agrícola del periodo de análisis como se muestra (Tabla 5).

TABLA 5. Eficiencias en la conducción registradas en el DR

Año agrícola	Eficiencia (%)
2007 – 2008	54.20
2008 – 2009	55.93
2009 – 2010	56.43
2010 – 2011	57.34
2011 – 2012	58.08
2012 – 2013	57.66
2013 – 2014	57.79

Se muestra la metodología que se empleó para obtener los volúmenes de requerimiento netos y brutos de agua mediante la construcción del modelo en Cropwat versión 8.0 para el DR 002 Mante (Figura 3), así como una síntesis de la fuente de los datos de cada módulo del modelo en la siguiente Tabla 6.

TABLA 6. Bases de datos consultadas por módulo

Módulo	Fuente
Evapotranspiración	Servicio Meteorológico Nacional
Precipitación	Servicio Meteorológico Nacional
Cultivo	FAO, 2018 y Base de datos del DR 002
Suelo	Base de datos proporcionada por el DR 002

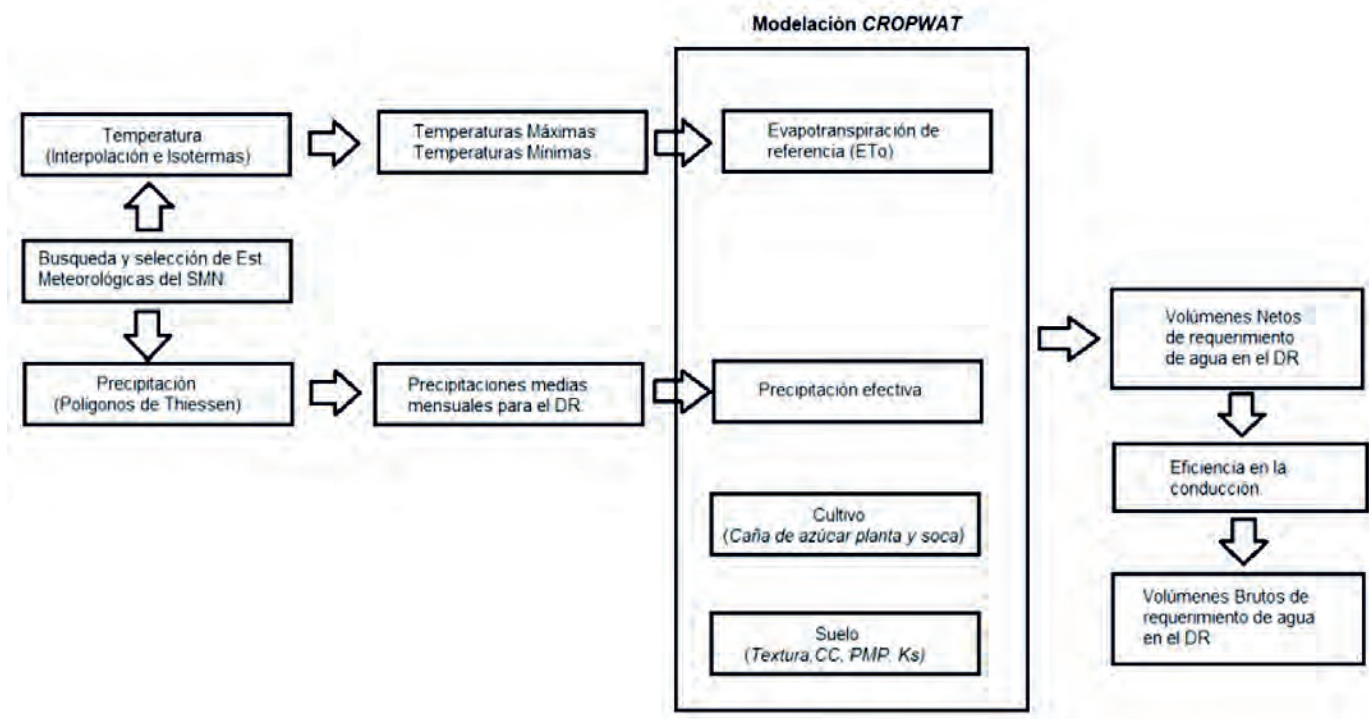


FIGURA 3. Esquema general del proceso metodológico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observan mayores evapotranspiraciones son para los meses de abril a agosto (Figura 4) con valores hasta de 6 mm/día;

mientras que los valores mas bajos corresponden a los meses de diciembre y enero con valores cercanos a los 2 mm/día. Como menciona (Arteaga *et al.*, 2011) la evapotranspiración puede tener influencia sobre el rendimiento del cultivo.

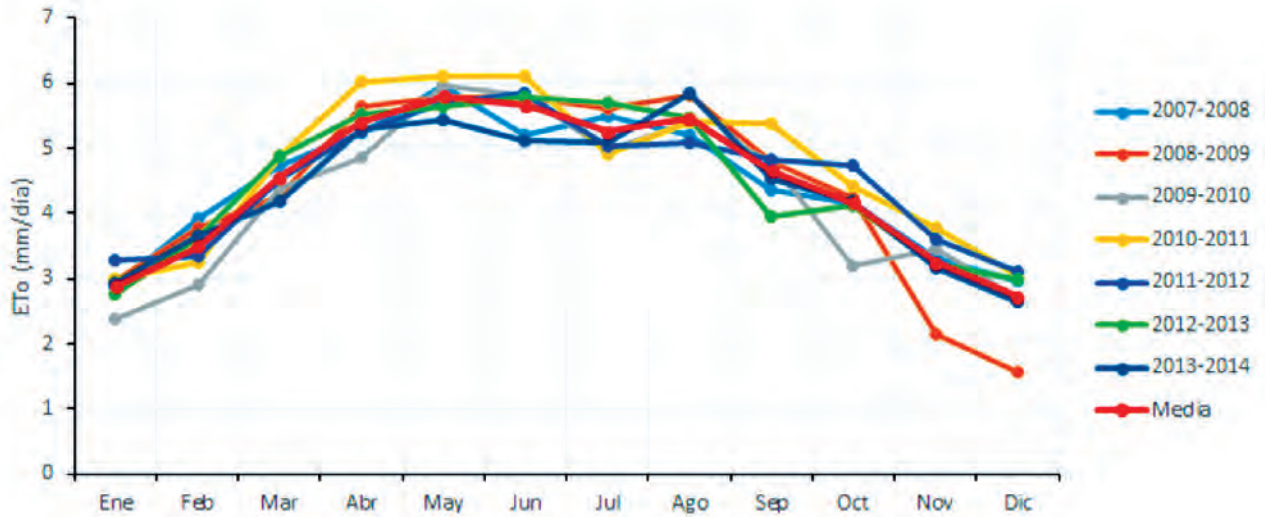


FIGURA 4. Evapotranspiración de referencia para el distrito de riego estudiado.

Se puede observar en la Figura 5 que las precipitaciones más altas se registraron en los meses de junio a septiembre, mientras que los meses con menor precipitación son de noviembre a febrero. Cabe destacar que la etapa de mayor requerimiento de agua en el cultivo es entre los meses de diciembre a marzo, donde la precipitación es más escasa y el riego es importante para una producción con rendimientos por hectárea favorable. Lo anterior, concuerda con los resultados de Vargas *et al.* (2017), en cuya investigación se reportan las disponibilidades de agua mensual en la cuenca Guayalejo-Tamesí donde se ubica el DR, resaltando la escases del recurso para los mismos meses.

Una vez estimados los valores de evapotranspiración y precipitación efectiva, la diferencia entre ambos define la cantidad neta de agua requerida. El volumen de requerimiento de agua total para cada año agrícola se calculó mediante la plantilla que se muestra en la Tabla 7, donde a partir de la lámina neta (LN) obtenida del modelo, la eficiencia de riego (ER) y la superficie de riego (Sup) se obtiene la lámina bruta (LB), el volumen neto (VN) y el volumen bruto (VB). A manera de ejemplo, en esa misma tabla se muestra el cálculo del volumen total neto y bruto para la soca y resoca para el ciclo agrícola 2013-2014, a este volumen se le suma el volumen total correspondiente a la caña virgen.

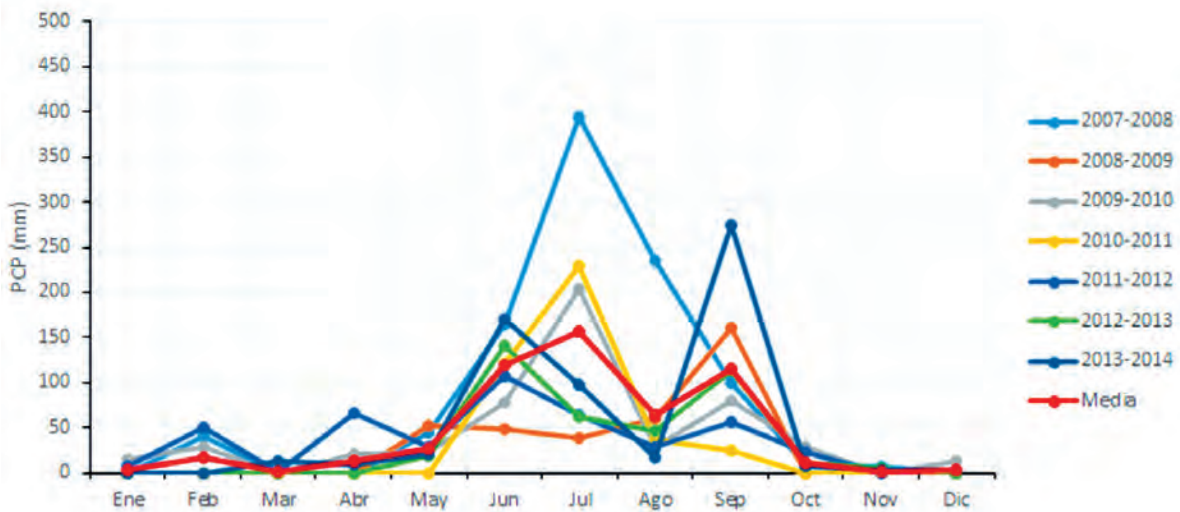


FIGURA 5. Precipitación efectiva media mensual por año agrícola.

TABLA 7. Volúmenes de requerimiento para la soca y resoca en el año agrícola 2013-2014

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
LN (mm)	64.5	48.9	30.2	73.3	127.2	18.6	75.8	153.3	0	112.1	85.8	66.9	
ER (%)	57.79	57.79	57.79	57.79	57.79	57.79	57.79	57.79	57.79	57.79	57.79	57.79	
LB (mm)	111.61	84.62	52.26	126.84	220.11	32.19	131.16	265.27	0.00	193.98	148.47	115.76	
Sup. (Ha)	9937.5	9937.5	9937.5	9937.5	9937.5	9937.5	9937.5	9937.5	9937.5	9937.5	9937.5	9937.5	
VN (Mm ³)	6.410	4.859	3.001	7.284	12.641	1.848	7.533	15.234	0.000	11.140	8.526	6.648	85.125
VB Mm ³)	11.091	8.409	5.193	12.605	21.873	3.198	13.034	26.361	0.000	19.277	14.754	11.504	147.300

Como se mencionó anteriormente, a partir de las modelaciones en Cropwat se obtuvieron los volúmenes de requerimiento de agua totales para cada año agrícola (Tabla 8), posteriormente los volúmenes fueron ajustados, pues se establece un periodo aproximado de 45 días sin regar antes de la cosecha por parte del ingenio azucarero, y posterior a la cosecha hasta después de haber realizado las actividades pertinentes, como el rebote y trabajos de subsuelo, por lo anterior, fueron cancelados los volúmenes de 2 meses antes y 2 meses después de la cosecha, dichos volúmenes se muestran en la Tabla 9.

TABLA 8. Volúmenes de requerimiento de agua en el DR 002, sin hacer reducciones

Año agrícola	Volumen total (Mm ³)	
	Neto	Bruto
2007 – 2008	93.482	172.476
2008 – 2009	126.997	227.065
2009 – 2010	100.548	178.182
2010 – 2011	143.597	250.430
2011 – 2012	129.666	223.255
2012 – 2013	122.450	212.365
2013 – 2014	96.228	166.513

TABLA 9. Volúmenes de requerimiento de agua para el DR 002, con reducciones

Año agrícola	Volumen total (Mm ³)	
	Neto	Bruto
2007 – 2008	77.681	143.322
2008 – 2009	109.798	196.312
2009 – 2010	92.042	163.108
2010 – 2011	115.797	201.948
2011 – 2012	113.311	195.095
2012 – 2013	107.644	186.688
2013 – 2014	80.375	139.080

En la Tabla 10 se muestran los volúmenes de agua que se programaron y se realizaron en el DR 002 para los ciclos de análisis. Como se observa, los volúmenes programados son similares, mientras que en los volúmenes realizados hay una diferencia notable, por ejemplo, para el año agrícola 2008-2009 se consumieron 177.5 Mm³, mientras que para el periodo 2009-2010 se obtuvo un volumen bruto total de 85.9 Mm³.

TABLA 10. Volúmenes programados y realizados en el distrito de riego estudiado

Año agrícola	Volumen total programado (Mm ³)		Volumen total consumido (Mm ³)	
	Neto	Bruto	Neto	Bruto
2007 – 2008	95.856	177.529	78.367	144.591
2008 – 2009	92.467	165.335	99.273	177.496
2009 – 2010	94.928	165.738	48.487	85.928
2010 – 2011	96.297	165.689	94.757	165.055
2011 – 2012	96.138	165.729	72.933	125.563
2012 – 2013	90.027	165.688	80.982	142.911
2013 – 2014	94.930	165.243	49.776	86.132

Se presenta la comparación de los volúmenes obtenidos en la modelación y los volúmenes programados y realizados (Figura 6) observándose que para algunos años agrícolas, como 2007-2008 y 2013-2014, los volúmenes de requerimiento de agua del modelo son similares a los volúmenes programados, mientras que en todos los restantes, los volúmenes obtenidos en Cropwat son mayores, esto se debe principalmente a que no se muestra el ajuste de los volúmenes quitando los meses en los que no se efectúa el riego.

Una vez que se han exento los volúmenes de agua co-

rrespondientes a 2 meses antes y después de la cosecha, se ajustan los volúmenes de requerimientos de agua obtenidos de Cropwat (Figura 7), en donde los valores de los modelos son más cercanos a los volúmenes programados y realizados. Se debe mencionar que los meses donde el sistema requiere riego son principalmente noviembre diciembre, enero, marzo, abril y mayo. Los meses donde se presenta mayor requerimiento de agua son similares a los presentados por (Arteaga *et al.*, 2011) para la región de Actopan en el estado de Veracruz, México.

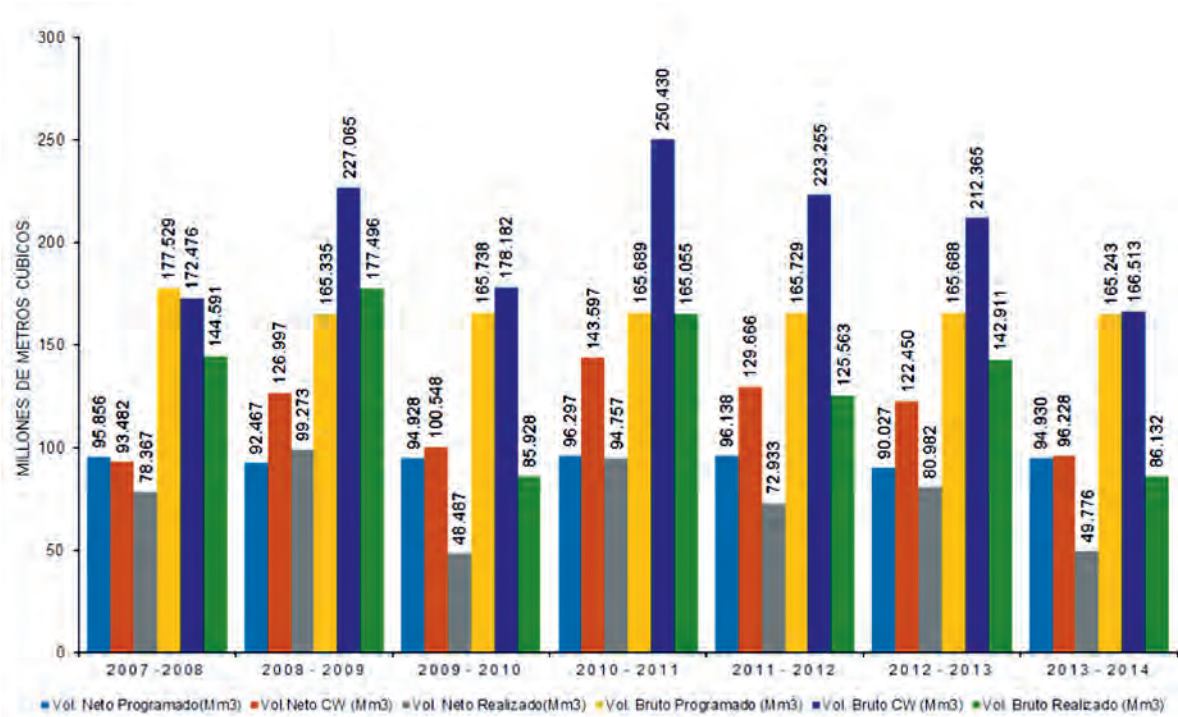


FIGURA 6. Comparación de volúmenes para el DR 002 Mante, Tamaulipas, Mexico.

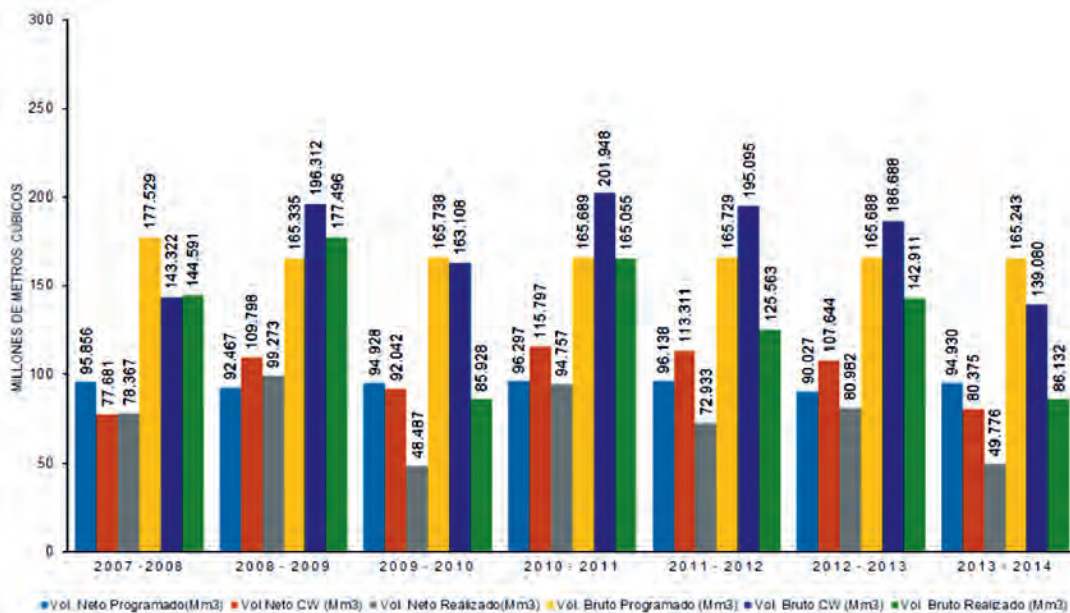


FIGURA 7. Comparación de volúmenes para el DR 002 Mante aplicando ajustes a los resultados de CROPWAT.

Para lograr una mejor visualización de la variación entre los volúmenes, en las Figuras 8 y 9 se muestran las diferencias expresadas en porcentaje del volumen programado contra el volumen obtenido en el modelo y del realizado contra el volumen de requerimiento obtenido en Cropwat.

Cuando el porcentaje es negativo, el volumen de requerimiento de agua obtenido por el modelo es mayor que el volumen comparando, por ejemplo, en el año agrícola 2007-2008, el volumen programado es 2.93% mayor que el volumen obtenido en Cropwat, mientras que para el mismo ciclo el volumen realizado

es 16.17% menor que el volumen de requerimiento obtenido en Cropwat, situación que se presenta de manera similar para otros ciclos, lo que evidencia el deficiente abasto de agua, la cual es requerida por la planta para lograr una producción efectiva. Para el 2009-2010 el volumen realizado es 51.78% menor que el volumen de requerimiento obtenido en el modelo. Cabe destacar la importancia de generar un modelo que presente diversos escenarios o estrategias de riego, pues de ellas depende en gran medida el aprovechamiento del recurso y por lo tanto el otorgamiento adecuado de agua en tiempo y volumen.

El análisis de los rendimientos de la planta, entregando el agua necesaria en las diferentes etapas de crecimiento, es indispensable para optimizar tanto el recurso hídrico como el producto, siempre que el sistema mantenga una eficiencia por arriba de las registradas. En el DR en cuestión, el rendimiento promedio de la caña es de 55 a 65 ton/ha. y las láminas de agua

de riego aplicadas y registradas son estimadas por el mismo distrito. Los rendimientos son bajos, comparados con los de otras regiones, tales como Brasil y Colombia que registra rendimientos de 120 ton/ha. Cabe destacar que no sólo la entrega de agua a la planta en términos de cantidad y tiempo, repercuten en el rendimiento, sino también el manejo del cultivo, las condiciones climáticas, así como los aspectos sociales (Ojeda *et al.*, 2008).

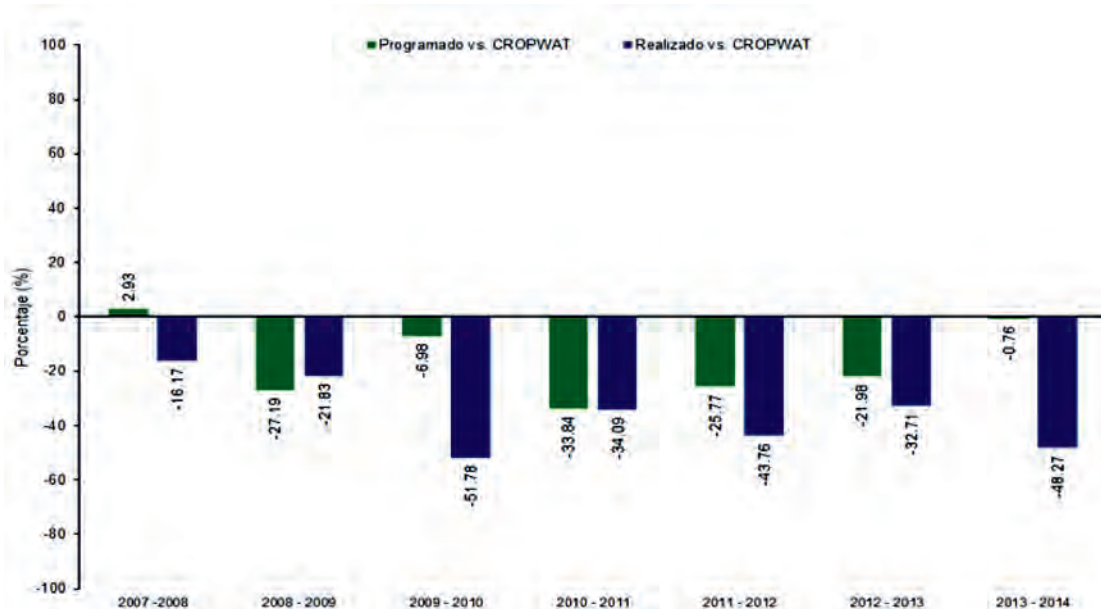


FIGURA 8. Comparación de volúmenes en porcentaje.

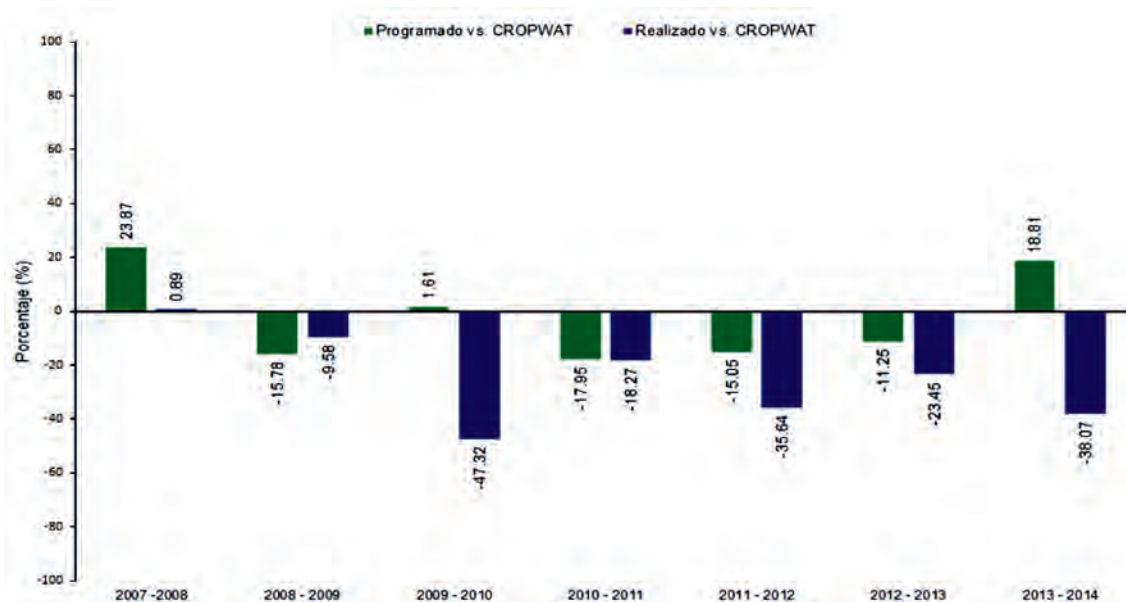


FIGURA 9. Comparación de volúmenes en porcentaje aplicando ajustes.

Con base en entrevista al jefe del DR 002 desataca que uno de los factores que provocan una variación en los volúmenes de agua proporcionados a los sembradíos de caña de azúcar mediante el riego son, en primera instancia, la propia decisión de los usuarios de no realizar el riego por el desfase en las etapas de la planta, esto conlleva a un conflicto entre el programa de riego y el programa de corte de la caña, suspendiendo los

riegos. Lo anterior explica la variación en los requerimientos de agua de los ciclos agrícolas analizados y contrastados con los ejecutados.

Se precisa la importancia de considerar el impacto del cambio climático en la disponibilidad del agua, pues representa el mayor desafío para el diseño de estrategias encaminadas a mitigar o adaptarse. El análisis de las temperaturas máximas y

mínimas y comportamiento de la evapotranspiración en áreas de irrigación, son variables que pueden analizarse a futuro, pues de estas variables depende en gran medida disponer del volumen de agua requerido para la producción agroindustrial azucarera, sobretodo en distritos de riego ubicados en zonas áridas o semi-áridas, resaltando que el 75% del territorio mexicano presenta esta cualidad climática (Iñiguez *et al.*, 2015).

Finalmente es importante resaltar que el Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, con base en la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (DOF, mayo 2015), coordinan las actividades agroindustriales del cultivo, impulsando acciones para incrementar la productividad a través del manejo sustentable del agua. Con base en lo anterior, la construcción de los modelos de requerimientos hídricos en los cultivos, como lo hizo el presente trabajo para el caso de la caña de azúcar en una región relativamente pequeña, contribuye al cumplimiento de los objetivos enmarcados en la Ley, desarrollando programas de riego más eficientes, pero concientizando a los usuarios sobre la necesidad del cumplimiento de estos, debido a las condiciones cambiantes en la lluvia y por ende en la disponibilidad del recurso.

CONCLUSIONES

- Mediante la modelación es posible estimar los volúmenes de requerimiento de agua de un cultivo partiendo de información climatológica, de cultivos y del suelo. El uso de bases de datos y el SIG permitieron desarrollar y sustentar el proceso metodológico para estimar los volúmenes de agua. Los

volúmenes netos de agua obtenidos mediante la modelación confirmaron que en algunos de los años estudiados la caña de azúcar necesitó volúmenes mayores a los suministrados, cuestión que repercute en el rendimiento del cultivo.

- Los volúmenes realizados para la caña de azúcar en el distrito de riego en los últimos 5 ciclos agrícolas marcan una tendencia de disminución en la entrega o abasto de agua con respecto a lo modelado, oscilando entre un 20% y 47% de volumen de agua menos para irrigar las parcelas, destacando los ciclos 2009-2010 y el 2013-2014.
- La estimación del agua con el modelo Cropwat demostró que los volúmenes de agua bruto planificados son insuficientes para satisfacer las necesidades hídricas de la caña en todos los años agrícolas estudiados, incluso aplicando ajustes a los meses previos y posteriores a la fecha de corte, los volúmenes de requerimiento son superiores al volumen disponible para aprovechamiento, lo que afecta directamente la productividad, por lo que estimar el volumen de requerimiento de agua y elaborar programas de riego sustentados en modelos reales, es de suma importancia para mejorar los rendimientos y con ello cumplir con las expectativas de seguridad alimentaria.
- Finalmente, se recomienda la generación de escenarios de cambio climático para la variable de la precipitación y temperatura para estimar las anomalías futuras que podrían impactar en el área del distrito de riego, así como la estimación de los escurrimientos superficiales, para conocer los volúmenes de agua disponibles actuales y futuros, que contribuyan en la planeación efectiva del recurso y del sistema de riego, disminuyendo la variabilidad en las entregas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁNGELES, J.M.; ÁNGELES, V.; ARTEAGA, R.E.; ARROYO, V.M.; CARRILLO, M.; CASTILLO, J.A.: *Manual para diseño de zonas de riego pequeñas*, Ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 2007.
- APARICIO, M.F.J.: *Fundamentos de hidrología de superficie*, Ed. Limusa, México, D.F., 1989.
- APARICIO, M.F.J.: *Fundamentos de hidrología de superficie*, Ed. Limusa, México D. F., 2004, ISBN: 968-18-3014-8.
- ARTEAGA, R.R.; ÁNGELES, M.V.; VÁZQUEZ, P.M.: "Programa CROPWAT para planeación y manejo del recurso hídrico", *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(2): 179-195, 2011, ISSN: 2007-0934.
- BANERJEE, S.; CHATTERJEE, S.; SARKAR, S.; JENA, S.: "Projecting Future Crop Evapotranspiration and Irrigation Requirement of Potato in Lower Gangetic Plains of India using the CROPWAT 8.0 Model", *Potato Research*, 59(4): 313-327, 2016, ISSN: 0014-3065.
- CAICEDO, C.O.; BALMASEDA, E.C.; PROAÑO, S.J.: "Programación del riego del banano (*Musa paradisiaca*) en finca San José 2, Los Ríos, Ecuador", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2): 18-22, 2015, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- CAVERO, J.; FARRE, I.; DEBAEKE, P.; FACI, J.M.: "Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models", *Agronomy Journal*, 92(1): 679-690, 2000, ISSN: 1435-0645.
- CONAGUA: *Estadísticas del Agua en México*, Inst. Comisión Nacional del Agua, México D. F., 2017.
- FAO: *Evapotranspiración del cultivo, [en línea]*, Inst. FAO, Roma, Italia, 2017, Disponible en: <http://www.fao.org/3/ax0490s.pdf>, [Consulta: 24 de mayo de 2018].
- FORSYTHE, W.: *Física de suelos: manual de laboratorio*, Ed. IICA, vol. 25, San José, Costa Rica, 1975, ISBN: 92-9039-052-2.
- IÑIGUEZ, M.; OJEDA-BUSTAMANTE, W.; DÍAZ-DELGADO, C.: "La infraestructura hidroagrícola ante escenarios del cambio climático", *Tecnología y ciencias del agua*, 6(5): 89-101, 2015, ISSN: 2007-2422.
- LAMBERS, H.; CHAPIN, F.S.; PONS, T.L.: *Plant Physiological Ecology*, Ed. Springer, Nueva York, USA, 2008.
- MULLER, L.: *Manual de laboratorio de fisiología vegetal*, Inst. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O.E.A, IICA, Turrialba, Costa Rica, 1964.
- OJEDA, B.; HERNÁNDEZ, L.; SÁNCHEZ, I.: "Manual para Diseño de Zonas de Riego Pequeñas Requerimientos de riego de los cultivos", *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México*, 2008.
- STANCALIE, G.; MARICA, A.; TOULIOS, L.: "Using earth observation data and CROPWAT model to estimate the actual crop evapotranspiration", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(1-2): 25-30, 2010, ISSN: 1474-7065.

- VARGAS, J.G.: *Validación del modelo cropwat en suelo inceptisol bajo cultivo comercial de caña de azúcar (Saccharum officinarum)*, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora, Magister Scientiarum Thesis, Guanare, Venezuela, 89 p., 2015.
- VARGAS, R.; ROLÓN, J.; TREVIÑO, J.; RUIZ, E.: “Disponibilidad del Recurso Hídrico Superficial”, En: *EL RECURSO HÍDRICO EN TAMAUZIPAS: LA CUENCA DEL RÍO GUAYALEJO TAMESÍ*, 2017.
- ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; VAUCLIN, M.: “Capítulo 5”, En: *Riego por gravedad*, Ed. Universidad Autónoma de Queretaro, Queretaro, Mexico, pp. 238-262, 2012.
- ZHANG, Y.; HANSEN, N.; TROUT, T.; NIELSEN, D.; PAUSTIAN, K.: “Modeling Deficit Irrigation of Maize with the DayCent Model”, *Agronomy Journal*, 1(1): 1-11, 2018, ISSN: 1435-0645.

Edgar Omar Ruíz-del Ángel, Profesor e Investigador, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller”, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Centro Universitario Sur, Tampico, Tamaulipas, México, e-mail: rocvargas@docentes.uat.edu.mx

Rocío del Carmen Vargas-Castilleja, e-mail: rocvargas@docentes.uat.edu.mx

Julio César Rolón-Aguilar, e-mail: jrolon@docentes.uat.edu.mx

Carlos Alberto Chávez-García, e-mail: rocvargas@docentes.uat.edu.mx

Roberto Pichardo-Ramírez, e-mail: rocvargas@docentes.uat.edu.mx

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

Programa de Asociación de País
Fortalecimiento de Capacidades para la Coordinación de Información y los sistemas de Monitoreo/ MST en Áreas con problemas de manejo de los Recursos Hídricos

El “Programa de asociación de País” (CPP OP-15) en “Apoyo a la implementación del Programa Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía de la República de Cuba”, recoge los fundamentos que propician el Manejo Sostenible de Tierras (MST). Para ello, propone fortalecer la coordinación entre las entidades nacionales, ofrece las alternativas para prevenir la degradación de tierras, así como recuperar y rehabilitar las funciones, resiliencia y productividad de los ecosistemas e incrementar la seguridad alimentaria.

Sus acciones se centran en la eliminación de las barreras que se oponen al logro del MST, mediante la aplicación de modelos que mejoren la integración entre los actores a todos los niveles, mediante acciones en el terreno, en el contexto de las políticas, el planeamiento, las regulaciones y en la toma de conciencia ciudadana en el manejo de los recursos naturales sobre bases científicamente argumentadas. En particular, el Proyecto 2 tiene como objetivo fortalecer la coordinación de la información y los sistemas de Monitoreo en la gestión de los recursos hídricos en función del MST”.

Todos por nuestra tierra