



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE IRRIGACIÓN E INGENIERÍA MECÁNICA AGRÍCOLA

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

SIMULACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ CON DIFERENTES
LÁMINAS DE RIEGO, MEDIANTE EL MODELO AQUACROP

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:
**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**



Presenta:

MISAE LÓPEZ HERNÁNDEZ

Bajo la supervisión de: **RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ, DR.**

Chapingo, Estado de México, Julio de 2017.

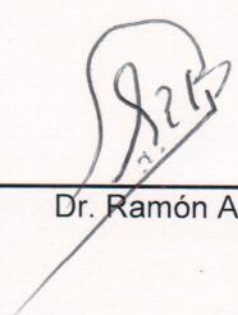


SIMULACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ CON DIFERENTES LÁMINAS DE RIEGO, MEDIANTE EL MODELO AQUACROP

Tesis realizada por **MISAE LÓPEZ HERNÁNDEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

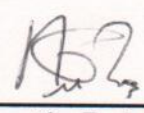
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA.

DIRECTOR:



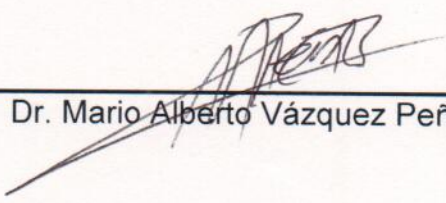
Dr. Ramón Arteaga Ramírez

ASESOR:



Dr. Agustín Ruíz García

ASESOR:



Dr. Mario Alberto Vázquez Peña

“LA VIDA”

<<Sería trágica si no fuera graciosa>>. Por Stephen Hawking.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de Maestría.

“La realización de este trabajo de investigación se realizó gracias al apoyo económico obtenido mediante el proyecto convencional titulado: Estimación de coeficientes Kc y predicción del rendimiento en maíz (*Zea Mays L.*), con clave: 166501008”.

A la Universidad Autónoma Chapingo por darme la oportunidad de realizar mis estudios de educación medio superior, superior y posgrado.

Al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por el apoyo brindado durante toda la maestría.

Al Dr. Mauricio Carrillo y al Dr. Martín Hidalgo Reyes, por su apoyo.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por su confianza, asesoría y disposición siempre en atenderme, por su apoyo en mi desarrollo personal y académico, por sus acertadas recomendaciones, pero sobre todo por su excelente dirección.

Al Dr. Agustín Ruíz García compartir sus conocimientos y al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña por sus aportaciones a la presente investigación.

A todos los profesores de la Preparatoria Agrícola, del Departamento de Suelos y del Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, que contribuyeron en mi formación académica.

A los departamentos de Preparatoria Agrícola en especial al área de Agronomía, Mecánica Agrícola e Irrigación, que me apoyaron en los trabajos de campo.

Al departamento de Fitotecnia que me facilitó equipo para poder realizar trabajos de laboratorio.

A todo el personal administrativo y operativo que contribuyó de alguna forma con este logro.

A mi familia por creer en mí y alentarme siempre en cada reto que se me presenta.

DEDICATORIA

A mi mamá Matilde Hernández Romero y mi papá Perfecto López de Jesús quienes me han dado la confianza para alcanzar las metas propuestas y retos.

A Ana Patricia Fleisher Piña, Jared Misael y Jesús Ismael López Fleisher, pilares de mi familia, mi impulso para afrontar nuevos retos.

A mis hermanas y hermanos: Alicia, Lizet, Adolfo y Efrain López Hernández quienes siempre tienen una anécdota que contar y encuentran lo gracioso en cada una de ellas.

A la familia Fleisher Piña que siempre me ha ofrecido el apoyo incondicional.

A todas la personas de que me ayudaron a cumplir este objetivo.

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR



El autor de la presente tesis es originario del estado de Puebla, nació el 02 de abril de 1988 en el municipio de Tlatlauquitepec, sus estudios de educación básica los realizó en su comunidad Mazatepec. En enero de 2003 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo donde realizó sus estudios de nivel medio superior en el Departamento de Preparatoria Agrícola, egresó en el año 2011 del departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, obteniendo el título como Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, con No. de cédula profesional: 09112503, que le permite ejercer dicha profesión. En el ámbito profesional trabajó en proyectos institucionales de la Universidad Autónoma Chapingo, también se ha desempeñado como técnico de campo, prestador de servicios profesionales, residente de obra y como superintendente de construcción para distintas empresas en convenio con la CONAGUA, SAGARPA y la CONAFOR entre 2011 y 2013. Así como también asesor técnico FIRA en convenio con la SEDAGROH entre 2013 y 2015, como consultor externo del Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y del Trigo, CIMMYT Int., de junio a diciembre de 2014. En agosto de 2015 ingresó al Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua en la Universidad Autónoma Chapingo, para realizar estudios de Maestría en la línea de investigación de Uso Integral del Agua.

CONTENIDO

CONTENIDO	i
INDICE DE CUADROS	iii
INDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN GENERAL	v
GENERAL ABSTRACT	vi
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Literatura citada	7
2 REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.1 Fundamentos del AquaCrop	9
2.2 Estructura del modelo	11
2.3 Aplicaciones del modelo AquaCrop	14
2.3.1 Manejo de riego	14
2.3.2 Influencia del manejo de campo y las propiedades del suelo sobre el rendimiento y el uso del agua	14
2.3.3 Agronomía y manejo de cultivos	14
2.3.4 Efectos meteorológicos y climáticos en la producción agrícola y uso del agua	15
2.4 Parametrización, calibración y validación del modelo AquaCrop	15
2.5 Estudios realizados con el modelo AquaCrop	20
2.6 Literatura citada	25
3 PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA EL CULTIVO DE MAIZ CON RIEGO COMPLEMENTARIO EN CHAPINGO, MÉXICO	28
3.1 Resumen	28
3.2 Abstract	29
3.3 Introducción	30
3.4 Materiales y métodos	33
3.5 Resultados y discusión	40
3.6 Conclusiones	46

3.7	Literatura citada	47
4	PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN CHAPINGO, MÉXICO.....	49
4.1	Resumen	49
4.2	Abstract.....	50
4.3	Introducción	51
4.4	Materiales y métodos.....	53
4.5	Resultados y discusión	56
4.6	Conclusiones	61
4.7	Literatura citada	62
5	CONCLUSIONES GENERALES	64

INDICE DE CUADROS

Cuadro 2-1. Información que se requiere a fin de utilizar el modelo para simular el rendimiento y productividad del agua (Hisao et al., 2012).	17
Cuadro 2-2. Información adicional y datos necesarios para la parametrización y validación de AquaCrop (Hisao et al., 2012).....	19
Cuadro 3-1. Parámetros conservativos para la simulación del rendimiento de maíz.	37
Cuadro 3-2. Parámetros definidos por el usuario para la simulación del rendimiento de maíz por tratamiento.	37
Cuadro 3-3. Rendimientos observados y simulados con el modelo AquaCrop.	42
Cuadro 3-4. Estadísticas cobertura vegetal.	43
Cuadro 3-5. Estadísticas biomasa.	45
Cuadro 4-1. Análisis de la productividad del agua.	58
Cuadro 4-2. Resultados de la simulación con el modelo AquaCrop.	59
Cuadro 4-3. Valores obtenidos de productividad observada.	61

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Consumo de maíz grano en México en millones de toneladas (FIRA, 2016).....	1
Figura 1-2. Superficie cosechada y rendimientos de maíz (FIRA, 2016).	2
Figura 1-3. Precio promedio al productor de maíz blanco y amarillo en México (FIRA, 2016).	3
Figura 1-4. Principales estados productores de maíz grano en México en 2015 (FIRA, 2016).	3
Figura 1-5. Rendimientos promedio por modalidad hídrica por estado, ciclo 2015 (FIRA, 2016).	4
Figura 2-1. Evolución del modelo AquaCrop de periodos largo a un nivel diario (Fuente: Steduto et. al., 2012).	10
Figura 2-2. Representación esquemática del estrés hídrico para la expansión foliar, senescencia, conductancia estomática e índice de cosecha (Steduto et al., 2012).....	13
Figura 3-1. Ubicación de la parcela experimental.	33
Figura 3-2. Resultados de ET_0 calculados para el ciclo de cultivo.....	35
Figura 3-3. Muestreo no destructivo en maíz.....	35
Figura 3-4. Muestreo destructivo en maíz.....	36
Figura 3-5. Parcela útil de maíz.	36
Figura 3-6. Cobertura vegetal observada y simulada en los diferentes tratamientos.	40
Figura 3-7. Biomasa seca observada y simulada en los diferentes tratamientos.	41
Figura 3-8. Relación entre la cobertura vegetal observada y simulada en los diferentes tratamientos.	43
Figura 3-9. Relación entre la biomasa observada y simulada en los diferentes tratamientos.	44
Figura 3-10. Relación entre el rendimiento observado y simulado.	45
Figura 4-1. Distribución de la precipitación y comportamiento de la ET_0 en la etapa experimental.	54
Figura 4-2. Rendimientos obtenidos en campo.	57
Figura 4-3. Comparación de rendimientos entre tratamientos.	57
Figura 4-4. Tratamiento de temporal y 60% ET_0	58
Figura 4-5. Determinación de la productividad del agua observada en los diferentes tratamientos.	61

RESUMEN GENERAL

SIMULACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ CON DIFERENTES LÁMINAS DE RIEGO, MEDIANTE EL MODELO AQUACROP

La agricultura es la actividad económica más importante en cuanto al porcentaje de población ocupada en este sector, así como también en cuanto al uso del agua se refiere. La agricultura deberá competir con otros usuarios por la escasa agua disponible en calidad y cantidad, al mismo tiempo aumentar la productividad en las unidades de producción agrícola con un uso eficiente del agua en las etapas críticas de cultivo y al utilizar al máximo el agua de lluvia en complemento con la disponible para riego. El uso eficiente de los recursos hídricos es importante para mantener e incrementar la producción agrícola, que permita garantizar la demanda de alimentos para las generaciones futuras, cuya población crece de manera acelerada. Sin embargo el Maíz aun siendo el principal cultivo en nuestro país, por su uso industrial, consumo fresco y principalmente por su uso como semillas, granos, y forrajes, no somos autosuficientes en su producción. Con el objetivo de determinar su rendimiento mediante riego complementario fue establecido un experimento, con cinco tratamientos: Temporal, 120%, 100%, 80% y 60% de la Evapotranspiración de referencia (ET_0), láminas aplicadas mediante un sistema de riego por goteo superficial. El híbrido utilizado fue Aspros 823 de ciclo intermedio-precoc de maíz para grano blanco. La presente investigación determinó el uso eficiente del agua en el de cultivo de Maíz, así como también evaluar el funcionamiento del modelo AquaCrop en el área de trabajo, y así pueda servir como punto de partida para futuras investigaciones.

Palabras clave: Modelos de simulación, Productividad del agua, Riego complementario, Rendimiento, Biomasa, Zea mays.

Tesis de Maestría en Ingeniería

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Misael López Hernández

Director de Tesis: Ramón Arteaga Ramírez

GENERAL ABSTRACT

SIMULATION OF CORN YIELD WITH DIFFERENT IRRIGATION DEPTHS USING THE AQUACROP MODEL

Agriculture is the most important economic activity in terms of the percentage of the population working in this sector, as well as the water use involved. Agriculture will have to compete with other users for the limited water available in quality and quantity, while increasing productivity in agricultural production units by an efficient use of water in critical crop stages and by making maximum use of rainwater to supplement that available for irrigation. The efficient use of water resources is important to maintain and increase agricultural production, which ensures meeting the future demand for food by a rapidly-growing population. Although corn is still the main crop in our country, for its industrial use, fresh consumption and mainly for its use as seeds, grains, and forages, we are not self-sufficient in its production. In order to determine its yield using complementary irrigation, an experiment was established with five treatments: rainfed, 120%, 100%, 80% and 60% of reference evapotranspiration (ET_0), with depths applied using a surface drip irrigation system. The hybrid used was Aspros 823, an intermediate-precocious cycle corn for white grain. This research determined the efficient use of water in the corn crop, and also evaluate the performance of AquaCrop model in the area of work, and can thus serve as a starting point for future research.

Keywords: Simulation models, Water productivity, Complementary irrigation, Yield, Biomass, Zea mays.

Tesis de Maestría en Ingeniería

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Misael López Hernández

Director de Tesis: Ramón Arteaga Ramírez

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

El cultivo más importante de nuestro país es sin lugar a dudas el cultivo de maíz, debido a que es un producto esencial para la alimentación de la población y como suplemento alimenticio en la dieta de animales para la producción pecuaria, así como también su importancia en la industria. El uso de maíz blanco para consumo humano se ha mantenido constante mientras que el uso de maíz amarillo, destinado a la actividad pecuaria, creció poco más de 3 millones de toneladas, como se muestra en la Figura 1-1. Sin embargo, se sabe que México no es autosuficiente en este producto de suma importancia para los mexicanos, es uno de los principales importadores de Maíz sólo por detrás de la Unión Europea y Japón (FIRA, 2016).

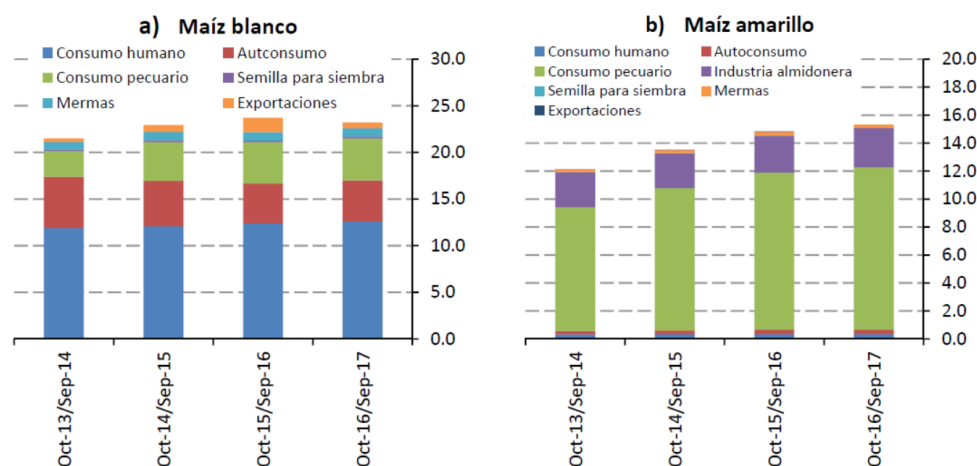


Figura 1-1. Consumo de maíz grano en México en millones de toneladas (FIRA, 2016).

No obstante, sólo en 2015 la producción nacional de maíz alcanzó la cifra de 22.6 millones de toneladas, y se importó aproximadamente 11.9 millones de toneladas de este grano, en conclusión, México es deficitario en la producción de Maíz aun teniendo zonas con las condiciones medioambientales idóneas para su desarrollo en la mayor parte del territorio nacional (SIAP, 2016a).

Según el estudio Panorama Agroalimentario (FIRA, 2016), al considerar la modalidad hídrica, la producción de maíz bajo riego en el país muestra un mayor dinamismo que el crecimiento en la producción de temporal, mientras que en los últimos años la producción bajo riego ha crecido a una tasa media anual de 2.8

%, la producción bajo temporal ha crecido en un 2.2 %. Toda vez que entre los años agrícolas 2005 y 2015 la superficie bajo riego ha crecido, tanto en superficie cosechada como en rendimiento, para ubicarse en 1.4 millones de hectáreas en 2015. Así, entre 2005 y 2015, los rendimientos en riego han crecido 1.9 por ciento en promedio, mientras que los rendimientos en temporal han aumentado 1.5 por ciento en promedio en el mismo periodo, teniendo un diferencial de 5.7 toneladas por hectárea (Figura 1-2).

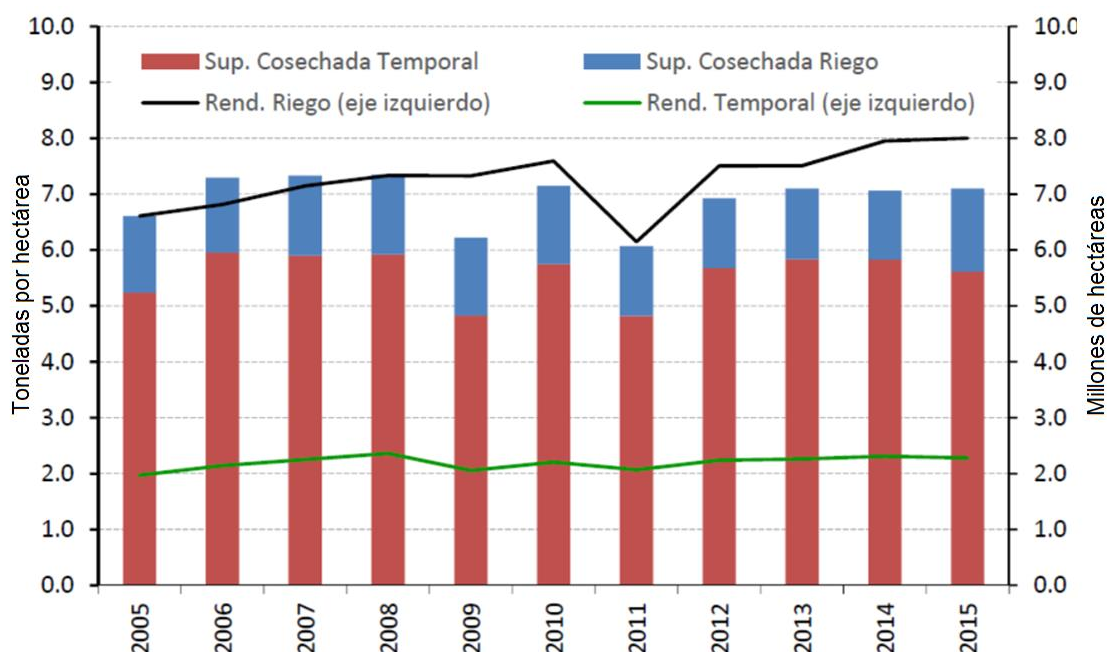


Figura 1-2. Superficie cosechada y rendimientos de maíz (FIRA, 2016).

Aun cuando la superficie bajo modalidad de riego apenas representa el 20.9 por ciento del total de la superficie cosechada de maíz en México, los rendimientos promedio por hectárea son considerablemente superiores a los reportados en temporal. Para el año agrícola 2015 los rendimientos fueron de 8 toneladas por hectárea en riego y 2.3 toneladas en temporal. Además, en relación al precio medio al productor, el maíz blanco presentó un precio promedio en septiembre de 2016 de 3,650.00 pesos por tonelada como se muestra en la Figura 1-3. Sin embargo, existe la necesidad de un aumento en el rendimiento lo cual hace que el costo por tonelada producida de grano disminuya y exista una mayor utilidad para el productor.

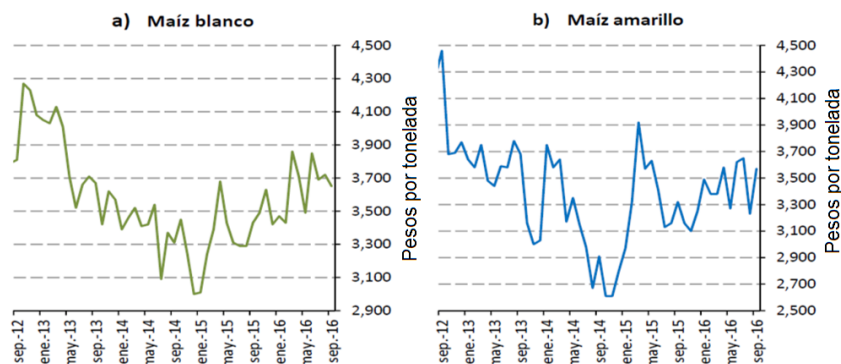


Figura 1-3. Precio promedio al productor de maíz blanco y amarillo en México (FIRA, 2016).

Datos de SIAP (2016b) hacen referencia que en la geografía mexiquense se siembran en promedio 759 mil hectáreas con cultivos cíclicos y otras 121 mil albergan cultivos perennes. Comprender la evolución de la agricultura en el Estado de México exige conocer sus características pasadas y actuales para tratar de prever su tendencia hacia el futuro. También que, en el año agrícola 2015, el Estado de México cosechó 8.3 millones de toneladas, cifra 1.7% mayor a la del año agrícola anterior, con un valor de 19 mil 642 millones de pesos.

La producción de maíz en el estado de México está fundamentalmente basada en el temporal y principalmente efectuada en el ciclo primavera-verano (Figura 1-4).

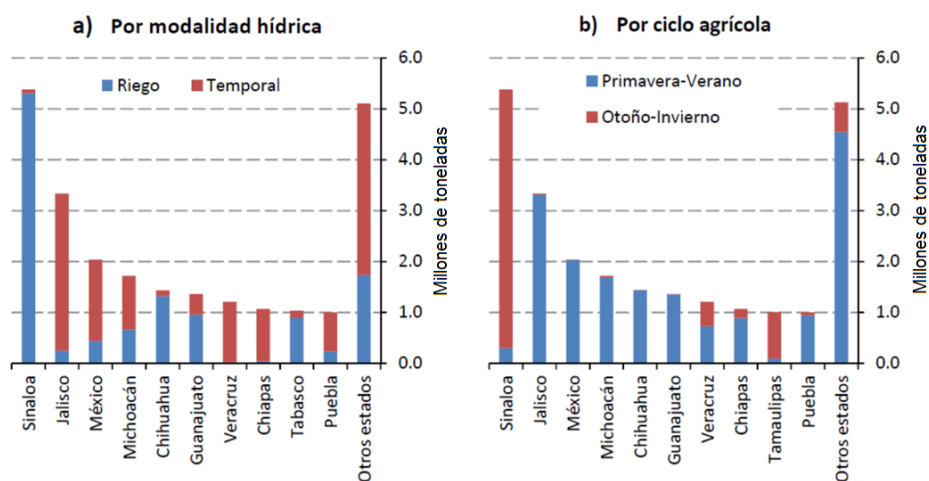


Figura 1-4. Principales estados productores de maíz grano en México en 2015 (FIRA, 2016).

Desde el punto de vista económico, la entidad destaca en la producción de granos y ornamentos aportando cuatro y dos de cada 10 pesos del valor de su producción, respectivamente; asimismo, es importante considerar que la oferta agrícola abarca diversos cultivos apreciados tanto en el mercado nacional como en el internacional. Dos terceras partes del valor de la producción agrícola del Estado de México se genera durante el ciclo primavera-verano, tiene una superficie sembrada de 727,053 ha de las cuales el 84.5% es temporal, el primer lugar lo ocupa Almoloya de Juárez con 3.4% que equivale a 29,136 ha (SIAP, 2016a). Por otra parte, en el estudio Panorama Agroalimentario, (2016) menciona que el estado de México se encuentra por debajo del rendimiento promedio nacional bajo riego, 6 ton ha⁻¹ como se muestra en la Figura 1-5.

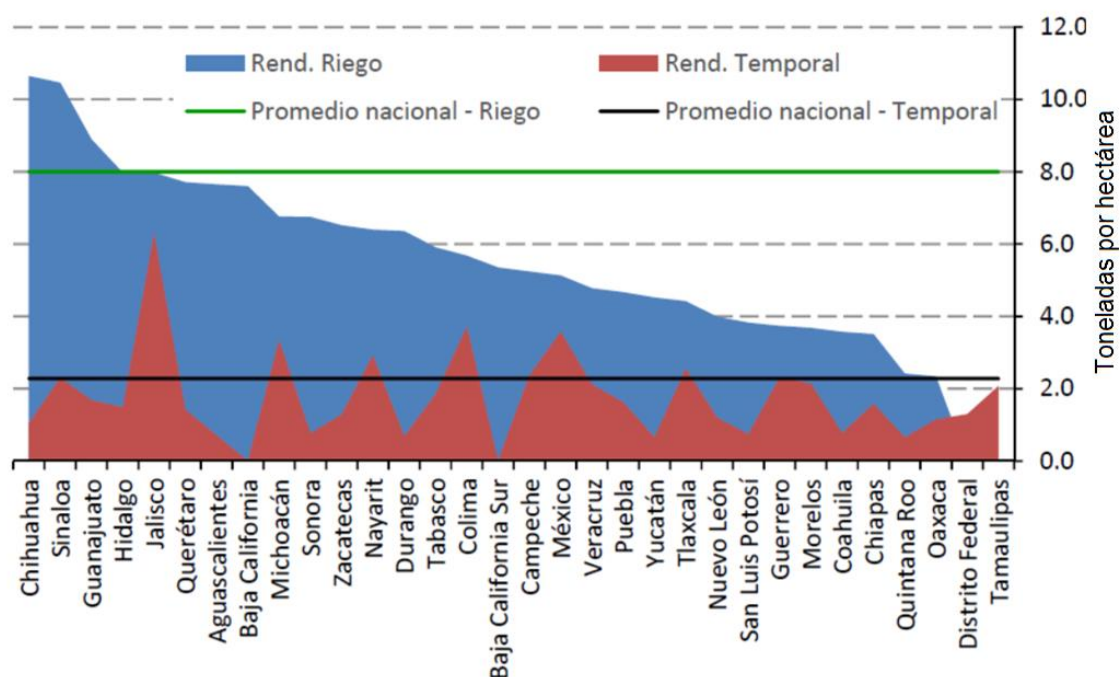


Figura 1-5. Rendimientos promedio por modalidad hídrica por estado, ciclo 2015 (FIRA, 2016).

En base a lo anterior el uso eficiente del agua disponible para riego y el aprovechamiento eficaz del agua de lluvia en la producción agrícola se hace aún más relevante, por lo cual el uso de modelos de simulación biológica para estimar la producción potencial e identificar factores limitantes de la producción se hace indispensable para generar estrategias de manejo hídrico.

La modelación del crecimiento y desarrollo de los cultivos es un instrumento que permite predecir su comportamiento a nivel local en combinación con su medio ambiente (Montoya, 2013). La FAO ha desarrollado un modelo de simulación libre, llamado AquaCrop, el cual simula el crecimiento de los cultivos en función del agua disponible mediante un parámetro de productividad del agua, WP (Steduto et al., 2012), y se ha parametrizado en varias regiones agrícolas del mundo y en distintos cultivos como algodón (Farahani et al., 2009), papa (Montoya, 2013), soya (Adeboye et al., 2017), tomate (Darko et al., 2016), trigo (Guendouz et al., 2014) y Maíz (Greaves and Wang, 2016) por mencionar algunos. Hamid et al. (2015) y Stricevic et al. (2011) en sus estudios, han obtenido un excelente ajuste en la predicción del rendimiento al usar el modelo AquaCrop en el cultivo de Maíz, al parametrizar el modelo con datos locales. Mientras que su aplicación en México ya fue realizada por Flores et al. (2013), quienes lo usaron en el distrito de riego 075 “Río Fuerte”, en el estado de Sinaloa, con datos experimentales de parcelas comerciales de Maíz.

La zona del oriente del estado México en específico en el municipio de Texcoco, la sobreexplotación del acuífero y su alto grado tecnológico lo hace un lugar estratégico para generar investigaciones sobre el uso eficiente del agua, por lo cual el objetivo general de la presente investigación es: realizar la simulación del rendimiento de maíz con diferentes láminas de riego, mediante el modelo AquaCrop.

La poca transferencia y adopción de nuevas tecnologías por el productor, en combinación con los altos costos de producción, la poca disponibilidad de agua para riego, la variabilidad en la distribución de las lluvias entre ciclos, falta de recursos económicos y bajos rendimientos, magnifican la preocupación por la demanda de alimentos y el crecimiento acelerado de la población, haciendo indispensable generar estrategias de uso eficiente del agua en la producción agrícola. Los objetivos particulares son: parametrizar el modelo AquaCrop para el cultivo de Maíz con riego complementario y realizar la simulación de la productividad del agua.

En el capítulo dos de la presente investigación se presenta la revisión de literatura acerca de los fundamentos y funcionamiento del modelo, además de un análisis de los estudios previos realizados en maíz y la capacidad del AquaCrop para predecir el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Mientras que en el capítulo tres se realizó la parametrización del modelo con datos experimentales del 2016 y se evaluó el funcionamiento del modelo para estimar la producción de cobertura vegetal, biomasa seca y rendimiento, en el capítulo cuatro se determinó la productividad del agua (WP*), con los valores obtenidos experimentalmente, así como también se determinaron otras definiciones de dicho parámetro. Para finalmente en el capítulo cinco describir las conclusiones generales a las que se llegaron con la realización de la investigación.

1.1 Literatura citada

- Montoya S., F. (2013). Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes tratamientos de riego con pívot en condiciones semiáridas. Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete.
- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adekalu, K. O. & Prasad, K. (2017). Modelling of response of the growth and yield of soybean to full and deficit irrigation by using aquacrop. *IRRIGATION AND DRAINAGE*, 66, 192–205.
- Darko, R. O., Yuan, S. Q., Yan, H. F., Liu, J. P. & Abbey, A. (2016). Calibration and validation of AquaCrop for deficit and full irrigation of tomato. *Int J Agric & Biol Eng*, 9(3), 104-110.
- FIRA. (2016). Panorama Agroalimentario | Maíz 2016. Puede ser consultado en: www.gob.mx.
- Farahani, H. J., Izzi, G. & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal*, 101, 469–476.
- Flores G., H., Ojeda B. W., Flores M., H., Sifuentes I., E. & Mejía S., E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia*, 47, 347-359.
- Guendouz, A., Hafsi, M., Moumeni, L., Khebbat, Z. & Achiri, A. (2014). Performance evaluation of AquaCrop model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semiarid conditions in Eastern Algeria. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3, 168-176.
- Greaves, G. E. & Wang, Y. (2016). Assessment of FAO AquaCrop Model for Simulating Maize Growth and Productivity under Deficit Irrigation in a Tropical Environment. *Water*, 8, 19.
- Hamid A., S., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A. A. & Reza S., A. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resour Manage*, 29, 2837–2853.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2016a). Atlas agroalimentario 2016. Puede ser consultado en: www.gob.mx/siap.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2016b). Estado de México: Infografía agroalimentaria 2016. Puede ser consultado en: www.gob.mx/siap.
- Steduto, P, Raes, D., Hsiao, T. C., Fereres, E. & Heng, L. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Stricevic, R, Cosica, M., Djurovica, N, Pejic, B. & Maksimovic, L. (2011). Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and

supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower Agricultural.
Water Management, 98,1615– 1621.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Fundamentos del AquaCrop

La división de Agua y Suelo de la FAO ha desarrollado el modelo AquaCrop el cual simula el rendimiento de cultivos herbáceos como respuesta del agua, es un modelo de desarrollo de follaje enfocado principalmente a la simulación del desarrollo de la biomasa potencial del cultivo y la producción cosechable, en respuesta al agua disponible (Hernández, 2015).

Steduto et al. (2012) indican que: la transpiración y la fotosíntesis del cultivo son impulsadas por la radicación solar; existe una relación directa entre la producción de biomasa y el agua consumida a través de la transpiración; el estrés hídrico y la disminución de la transpiración tienen como resultado una reducción en la producción de biomasa, lo cual generalmente también reduce el rendimiento. También hacen referencia a la función original de productividad del agua, la cual relacionaba la disminución relativa del rendimiento con la disminución relativa a la evapotranspiración expresada con la Ecuación 1:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad (1)$$

donde Y_x y Y_a son los rendimientos máximo y real, ET_x y ET_a son la evapotranspiración máxima y real, y K_y es el factor de respuesta del rendimiento que representa el efecto de una disminución de la evapotranspiración sobre las pérdidas de rendimiento. Resaltan dos inconvenientes de este enfoque: estimar el rendimiento final en lugar de sus componentes y la evapotranspiración en lugar de transpiración solamente, ya que el factor de respuesta del rendimiento demostró ser significativamente variable en varios casos.

Steduto et al. (2008) indican que, al separar la evapotranspiración en evaporación del suelo y transpiración del cultivo, permitió no considerar el consumo no productivo del agua que representa la evaporación del suelo, la Ecuación 2 es el motor del modelo AquaCrop, donde la producción de biomasa se estima directamente a partir de la transpiración del cultivo real mediante un parámetro de productividad del agua WP:

$$B = WP * \sum Tr \quad (2)$$

donde B es la biomasa acumulada producida (kg m^{-2}), Tr es la transpiración del cultivo (en mm), y WP es el parámetro de productividad del agua (kg de biomasa por m^2 y por mm de agua transpirada acumulada en el tiempo en el cual se produce la biomasa). Mencionan también que la separación del rendimiento (Y) en Biomasa (B) e Índice de cosecha (HI) como se muestra en la Ecuación 3, permite diferenciar las relaciones de estas con el ambiente por separado, como el impacto por la sequía o el exceso de humedad (Stricevic et al., 2011).

$$Y = HI * B \quad (3)$$

Además, la escala de tiempo en la ecuación original corresponde a etapas de crecimiento que duran varias semanas, mientras que AquaCrop usa una escala de tiempo diaria, a fin de representar de mejor manera la dinámica de la respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua (Figura 2-1).

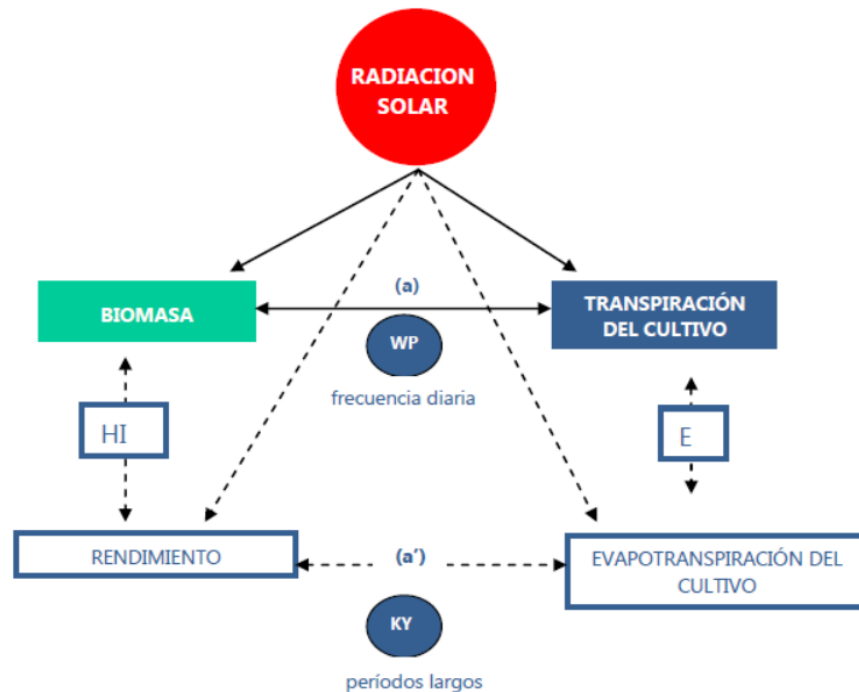


Figura 2-1. Evolución del modelo AquaCrop de periodos largo a un nivel diario (Fuente: Steduto et. al., 2012).

2.2 Estructura del modelo

La interfaz del software está dividida en cuatro componentes; clima, cultivo, manejo y suelo, se alimenta con información del lugar y cultivo, se realiza la parametrización y validación del funcionamiento del modelo para simular el rendimiento, biomasa, cobertura vegetal, productividad del agua, etcétera.

Para alimentar el componente del clima es necesario contar con datos de precipitación, evapotranspiración de referencia, temperaturas y concentración de CO₂. AquaCrop proporciona valores predeterminados de concentración atmosférica media anual de CO₂ prevista de acuerdo con escenarios de cambio climático determinados previamente (Steduto et al., 2012).

El módulo de cultivo incluye los subcomponentes: descripción, modo, desarrollo, producción, estrés por fertilidad y calendario. El subcomponente de desarrollo corresponde a la información fenológica del material utilizado, además es necesario el parámetro de entrada de días a cobertura máxima y su valor, este es muy importante para el modelo, ya que el desarrollo del dosel determina la cantidad de agua transpirada por el cultivo (Vanuytrecht et al., 2014). Su enfoque en el uso del agua, además de utilizar la cobertura del dosel en lugar del índice de área foliar como parámetro de entrada y el uso de valores de productividad del agua normalizados para la demanda de evaporación atmosférica y de dióxido de carbono, lo diferencia de otros modelos de cultivo (Dinh and Thi, 2016).

AquaCrop comprende dos categorías de prácticas de manejo: la de riego y la de campo, el suelo se describe mediante su perfil y las características de la capa freática en caso de que se presente. Según Navneet (2012) el módulo de suelo requiere principalmente de parámetros de entrada como: la textura, punto de marchitez permanente, capacidad de campo, punto de saturación y conductividad hidráulica saturada, determinados generalmente en laboratorio. Steduto et al. (2012) indican que el modelo requiere también datos de entrada como: el número de horizontes, curva número, lámina rápidamente evaporable, profundidad de capa restrictiva y profundidad de nivel freático, con base en estas características, AquaCrop deriva otros parámetros que rigen la evaporación del suelo.

Kikoyo and Nobert (2016) mencionan que la biomasa aérea (B) se deriva de la transpiración por medio de la productividad del agua normalizada, un parámetro conservativo, y el rendimiento es el resultado del producto de la biomasa simulada y el índice de cosecha ajustado HI. Steduto et al. (2012) mencionan que, para el cultivo como el maíz, el HI es ajustado de modo que aumente desde cero en la floración de manera constante, inicia con un crecimiento lento y aumenta rápidamente conforme se acerca a la maduración. Este proceso corresponde a un modelo del tipo logístico (Jin et al., 2016). El modelo utiliza un valor de referencia (Hlo) para el rango superior del índice de cosecha representativo para Maíz bajo condiciones de fertilización óptimas y sin limitantes, algunos valores utilizados son 48% por Greaves and Wang (2016) y 56% por Hamid et al. (2015).

Los estreses abióticos ambientales como el hídrico y el estrés por temperatura pueden tener impactos negativos importantes en el desarrollo del dosel, la producción de biomasa y el rendimiento, dependiendo del momento en que ocurran, de su severidad y duración. Adicionalmente, el estrés por salinidad o baja fertilidad del suelo puede tener impactos negativos semejantes, AquaCrop los aborda con un enfoque indirecto lo cual impide simular los balances de nutrientes y sus complejos ciclos. Esto se ve reflejado en los efectos del estrés hídrico en la productividad, y los procesos de uso del agua se simulan impactando en: el crecimiento del dosel; la conductancia estomática; la senescencia del dosel; la profundización de las raíces y en el índice de cosecha es de particular importancia asumir que la productividad del agua normalizada no se ve impactada (Steduto et al., 2012).

Los efectos por estrés son descritos por Steduto et al. (2012), ver Figura 2-2: en cuanto a la senescencia del dosel, esta puede ser desencadenada y acelerada por el estrés hídrico severo en cualquier momento; la profundización de las raíces se ve afectada por el estrés hídrico aunque es menos sensible que las hojas; los efectos del estrés hídrico en el HI pueden ser negativos o positivos, la inhibición del estrés hídrico en la polinización y cuajado del fruto (formación exitosa del

embrión) es uno de ellos, otro impacto negativo se refiere al llenado insuficiente (y el aborto de los frutos más jóvenes) debido a la falta de asimilados fotosintéticos por la competencia entre el crecimiento vegetativo y el reproductivo, cuando demasiados asimilados son desviados a los órganos vegetativos, por lo tanto maduran muy pocos frutos, y se reduce el HI, el efecto positivo es cuando el estrés hídrico es leve reduciendo el crecimiento foliar, mientras que los estomas, permanecen abiertos para mantener la fotosíntesis, lo cual genera una gran cantidad de asimilados disponibles para mejorar la retención y crecimiento del fruto, conduciendo a un HI mayor. Un efecto importante del estrés por temperatura, ocurre en la polinización, la cual se inhibe a temperaturas demasiado altas o demasiado bajas, las bajas temperaturas pueden obstaculizar la producción de biomasa, otro estrés abiótico es el estrés por aireación.

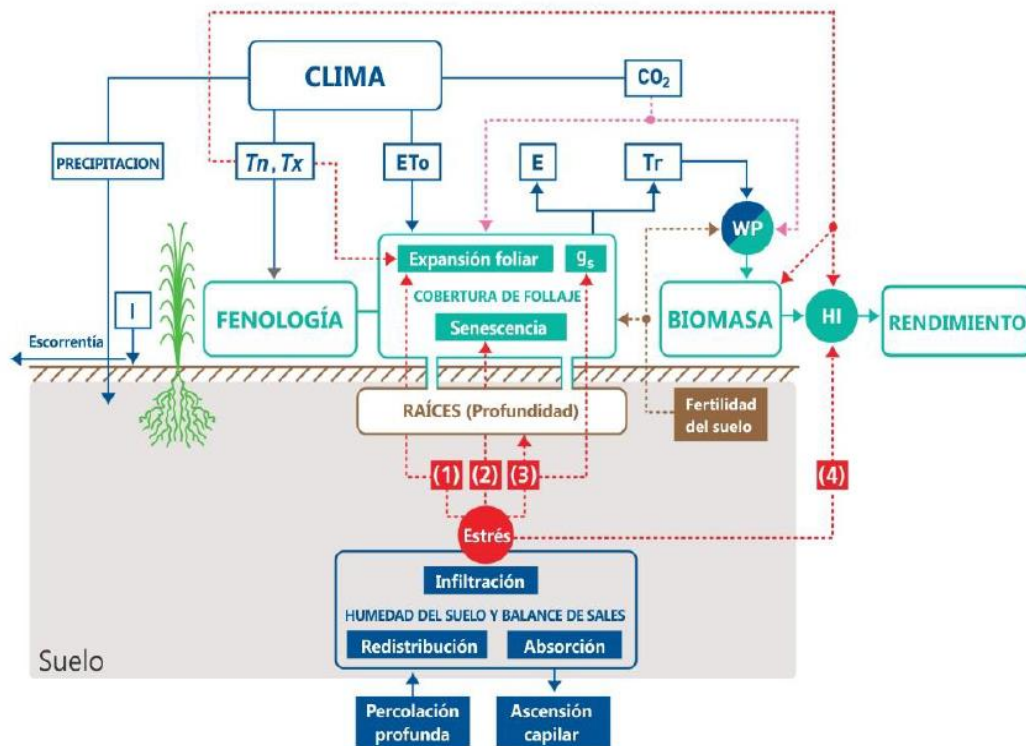


Figura 2-2. Representación esquemática del estrés hídrico para la expansión foliar, senescencia, conductancia estomática e índice de cosecha (Steduto et al., 2012).

2.3 Aplicaciones del modelo AquaCrop

Las aplicaciones del modelo dependen de la experiencia del usuario, su formación académica y los problemas específicos de su entorno además de la información que se desea generar o validar a partir de información experimental a nivel local. Estas pueden estar relacionadas con la asignación del agua de riego que, en una parcela, a nivel distrito de riego o hasta de cuenca hidrográfica. AquaCrop, al simular la respuesta del rendimiento a diferentes cantidades de agua aplicada para condiciones agronómicas y ambientales locales, lo hace una herramienta potente y flexible para lograr una actividad agrícola sustentable.

Algunas aplicaciones del modelo que propone Fereres et al. (2012) se enlistan a continuación:

2.3.1 Manejo de riego

- Desarrollo de un calendario de riego estacional para un cultivo y campo específicos.
- Determinación de la fecha del próximo riego.
- Determinación de los requerimientos hídricos estacionales y sus componentes para distintos cultivos.
- Evaluación comparativa de las prácticas reales de riego.
- Cómo hacer el mejor uso del agua almacenada en el suelo cuando el suministro de riego es limitado.
- Desarrollo de programas de riego deficitario y suplementario a escala de campo.
- Influencia del manejo de campo en la agricultura de secano.

2.3.2 Influencia del manejo de campo y las propiedades del suelo sobre el rendimiento y el uso del agua

- Influencia del manejo de campo en la agricultura de secano.
- Impacto de las variaciones en las propiedades de humedad del suelo y niveles de fertilidad del suelo.

2.3.3 Agronomía y manejo de cultivos

- Evaluación comparativa de las brechas de rendimiento en la agricultura de secano y de riego y evaluación de productividad a largo plazo.

- Determinación de la fecha de siembra óptima, con base en un análisis de probabilidad.
- Desarrollo de funciones de productividad del agua con AquaCrop y su utilización en sistemas de apoyo a las decisiones.
- Evaluación de los efectos de la densidad de plantas sobre el rendimiento.

2.3.4 Efectos meteorológicos y climáticos en la producción agrícola y uso del agua

- Evaluación del impacto de la variabilidad de las precipitaciones en rendimientos limitados por el agua.
- Cartografía del potencial de rendimiento limitado por el agua de una región.
- Efectos del cambio climático en la producción de cultivos y el uso del agua.
- Utilización de AquaCrop para las decisiones de asignación del agua a nivel regional o de cuenca.

2.4 Parametrización, calibración y validación del modelo AquaCrop

La calibración del modelo AquaCrop implica la modificación de los parámetros no conservativos de cultivo, suelo y gestión en la interfaz del modelo. Los parámetros que se ajustan durante la calibración incluyen densidad de plantación, índice de cosecha de referencia, duración del ciclo de crecimiento, profundidad máxima de enraizamiento y parámetros del suelo. Los valores iniciales de los parámetros se estiman a partir de los datos existentes sobre cultivos y prácticas de manejo (Kikoyo and Nobert, 2016).

Hisao et al. (2012) indican que el modelo está diseñado para utilizarse ampliamente en diferentes condiciones climáticas y de suelo, una vez que ha sido parametrizado correctamente para una especie de cultivo determinada, sin necesidad de calibración local.

Los parámetros del modelo se clasifican en conservativos (los parámetros deben permanecer prácticamente constantes):

- **Temperatura base y superior.** Temperatura base de 8 ó 10 °C. La temperatura superior se ha ajustado en 30 °C.
- **La cobertura del dosel inicial por unidad de superficie del suelo (CCo).** Se calcula a partir del tamaño medio inicial del dosel por plántula (cco) y la densidad de plantación; $CCo = cco \times \text{densidad de plantación}$.
- **Cobertura máxima del dosel (CCx).**
- **Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC).**
- **Coeficiente de disminución del dosel (CDC).**
- **Productividad del agua normalizada (WP*).**
- **Concentración de CO₂ atmosférico.**
- **Índice de cosecha de referencia (Hlo).**

El dosel es una característica crucial, ya que, a través de su expansión, envejecimiento, conductancia y senescencia, determina la cantidad de agua transpirada, lo que a su vez define la cantidad de biomasa producida. Esta simplificación es muy significativa permitiendo al usuario ingresar valores reales de CC e incluso los estimados, a partir de fuentes de detección remota, bien para comprobar el CC simulado o como entrada para el modelo (Steduto et al., 2009).

Hisao et al. (2012), mencionan que los parámetros conservativos son obtenidos de variedades de alto rendimiento, desarrolladas bajo condiciones de óptima fertilidad del suelo, sin deficiencias de nutrientes. AquaCrop no simula directamente los ciclos de los nutrientes ni los efectos nutricionales sobre el cultivo.

El segundo grupo abarca los parámetros que dependen de la ubicación, la variedad del cultivo y las prácticas de manejo, los cuales deben ser especificados por el usuario:

- **Datos del clima y evapotranspiración de referencia (ET₀).** La ET₀ se calcula utilizando la ecuación Penman-Monteith de la FAO, a partir de datos meteorológicos diarios, o también mediante la herramienta ET₀ Calculator. El método FAO Penman-Monteith hace uso de la definición del

cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23. Que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado, este método produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos (Allen et al., 2006).

- **Grados día acumulados (GDD).**
- **Características de la humedad del suelo.** Capacidad de campo, punto de marchitez permanente y conductividad hidráulica saturada.
- **Contenido inicial de humedad del suelo.**
- **Fenología del cultivo.** Tiempo para el 90 % de emergencia, Tiempo para iniciar la floración y su duración, Tiempo para alcanzar la máxima cobertura del dosel, Tiempo para iniciar la senescencia del dosel y Tiempo para la madurez fisiológica.
- **Profundidad de raíces.** Los datos mínimos obligatorios (aproximaciones) y la información adicional necesaria para que la simulación sea fiable son plasmados en el Cuadro 2-1. Lo cual hace indispensable establecer experimentos a nivel local con la finalidad de recopilar la información necesaria para el correcto funcionamiento del modelo.

Cuadro 2-1. Información que se requiere a fin de utilizar el modelo para simular el rendimiento y productividad del agua (Hisao et al., 2012).

Requerimiento mínimo	Datos adicionales
Cultivo	
Rendimiento de grano e indicación de la proporción del peso del grano seco con respecto a la biomasa aérea; es decir, una idea aproximada del índice de cosecha (HI).	Biomasa aérea al momento de la cosecha.
Fechas de siembra y cosecha (pueden ser aproximadas) y duración estimada del ciclo biológico del cultivo.	Fecha de emergencia (sea su inicio o la etapa próxima a la emergencia total) y fecha de madurez del grano.
	Densidad de plantación; profundidad máxima estimada de raíces.

Dosis de siembra y porcentaje de germinación.	Índice máximo de área foliar verde (LAI) o indicación del alcance de máxima cobertura del dosel o cobertura del dosel en un momento dado.
---	---

Clima y ET

Valores medios de 10 días o mensuales de: temperatura mínima y máxima e indicación del porcentaje de días soleados, y regímenes de viento y humedad. Latitud y elevación.	Valores medios semanales o de 10 días de: radiación solar (global) diaria u horas de luz solar, temperatura mínima y máxima, humedad relativa mínima y máxima, y velocidad del viento.
--	--

Como otra opción, datos de evaporación por el método de tanque con información sobre el tipo de tanque y si está ubicado en un entorno seco o verde, para estimar la evapotranspiración de referencia (ET _o).	Precipitación diaria. Evapotranspiración (ET) estimada mediante el balance del agua a largo plazo.
---	---

Datos de precipitación diaria (no se recomienda la media de 10 días o mensual, aunque es mejor que ningún dato).

Suelo y fertilidad

Clase textural del suelo e indicación de la variación con la profundidad.	Textura de las diversas capas (u horizontes) del suelo, y cualquier capa que limite el crecimiento de las raíces y su profundidad.
Indicación de la pendiente del suelo y la capacidad de retención de humedad del suelo.	Tipo, tasa y tiempo de fertilización.

Indicación de la fertilidad natural del suelo, prácticas generales de fertilización.

Riego y agua del suelo

Método de aplicación del agua y calendario aproximado de riego.	Fechas Reales de riego y cantidades aproximadas.
Idea aproximada del contenido de humedad del suelo al momento de la siembra, basada en el nivel de precipitación en meses anteriores y el cultivo que se sembró antes del actual.	Estimación del contenido de humedad del suelo al momento de la siembra, basado en alguna medición u observación cercana.

Para parametrizar y validar el modelo se necesitan datos más detallados y precisos, tal como se enumera en el Cuadro 2-2.

Cuadro 2-2. Información adicional y datos necesarios para la parametrización y validación de AquaCrop (Hisao et al., 2012).

Requerimientos mínimos además de la columna 2 del cuadro 1	Datos adicionales para una parametrización fiable
Cultivo	
Mediciones periódicas del índice de área foliar (LAI) o la cobertura del dosel durante la estación.	Datos de la columna 1, pero obtenidos en diferentes lugares y climas, en diferentes tipos de suelo.
Mediciones periódicas de la biomasa aérea durante la estación.	
Fecha en que el dosel se empieza a volver visiblemente amarilla.	
Medición de la profundidad de raíces Signos de estrés hídrico y fechas.	
Clima y ET	
Temperatura y humedad diaria, mínima y máxima.	Datos de la columna 1, pero obtenidos en diferentes lugares y climas, para diferentes tipos de suelo.
Radiación solar diaria y velocidad del viento.	Medición diaria de la ET.
ET por balance de agua del suelo (opcional).	
Suelo y fertilidad	
Debe tener un tratamiento con fertilidad óptima del suelo.	Datos de la columna 1, pero obtenidos en diferentes lugares y climas, para diferentes tipos de suelo.
Capacidad de campo y punto de marchitez permanente de los horizontes del suelo.	
Tasa de infiltración o conductividad hidráulica saturada del suelo	
Riego y agua del suelo	
Debe incluir un tratamiento bien regado (riego completo) y un tratamiento de estrés hídrico.	Datos de la columna 1, pero obtenidos en diferentes lugares y climas, para diferentes tipos de suelo.
Cantidad de agua que se aplica en cada uno de los riegos.	

Medición o buena estimación del contenido de humedad del suelo en diferentes profundidades al momento de la siembra.

Debe incluir tratamientos con estrés hídrico en diferentes momentos y diferentes niveles de severidad.

Mediciones periódicas del contenido de humedad del suelo en diversas profundidades de la zona radicular (alternativa opcional al balance de agua del suelo).

2.5 Estudios realizados con el modelo AquaCrop

La práctica común es ejecutar simulaciones con el modelo empezando con valores estimados o supuestos para los parámetros, y después comparar los resultados con los datos experimentales medidos, para luego ajustar los parámetros y ejecutar la simulación, y comparar de nuevo. Esto se repite hasta que los resultados simulados concuerdan estrechamente con los datos experimentales (Hisao et al., 2012).

El modelo se ha calibrado, parametrizado y evaluado para distintos cultivos como: el Algodón, cultivo en el que el modelo resultó ser prometedor para predecir la evapotranspiración, biomasa total, rendimiento y agua del suelo para tratamientos correspondientes a 40, 60, 80 y 100% de las necesidades de agua del cultivo (Farahani et al., 2009); Tilahun et al. (2011) validaron el modelo para canola con datos experimentales de dos años continuos, en 2009 y 2010, donde el modelo fue capaz de simular con precisión la biomasa acumulada y el rendimiento de grano, con bajos valores de error cuadrático medio y valores cercanos a uno para el índice de eficiencia y de Willmott, aunque el funcionamiento del modelo fue menos satisfactorio bajo condiciones de estrés hídrico, ya que sobreestimó la biomasa y el rendimiento especialmente cuando el estrés ocurrió durante la senescencia; para el cultivo de Lechuga tuvo un buen funcionamiento en la predicción del rendimiento, aunque con un valor apenas aceptable de $r^2=0.7$, mientras que en general se sobreestimó la producción de biomasa y se subestimó el desarrollo del dosel, los valores de r^2 cercanos a uno mostraron que el modelo tuvo un buen ajuste en condiciones de déficit de riego

(Kiptum et al., 2013); Sam-Amoah et al.(2013) encontró que el modelo no pudo simular con precisión el rendimiento de Pimiento en las dos simulaciones que realizaron, sin embargo esto se debió a la falta de datos sobre el desarrollo del cultivo; los cultivos de Caña de azúcar (Cortés, 2013b) y arroz (Cortés, 2013a) se simularon bajo diferentes aplicaciones de riego, diferentes niveles freáticos, de fertilidad de suelo, profundidad de horizontes restrictivos y texturas del suelo; De la casa et al.(2013) evaluaron diferentes valores de productividad del agua (WP) para el cultivo de Papa, para simular el rendimiento tomaron como referencia valores para cultivos con metabolismo C_3 y C_4 , los coeficientes de cobertura fueron obtenidos a prueba y error, ajustados con datos de campo obtenidos a partir de fotografías digitales, determinaron que el valor de WP de 21 g m^{-2} permitió un ajuste satisfactorio para el rendimiento de papa, aunque el modelo en general subestimó el valor de la cobertura de dosel y sobreestimó la biomasa, Montoya (2013) por su parte evaluó el funcionamiento de los modelos AquaCrop, CropSyst y (SUBSTOR-Potato) DSSAT, para su estudio se utilizaron un valor de $WP=19 \text{ g m}^{-2}$, donde el modelo AquaCrop en general no fue capaz de reproducir los valores de cobertura en el primer año debido a las altas precipitaciones ocasionando desviaciones importantes de los valores simulados versus los datos de campo (2011), en el año 2012, también se subestimó los valores de cobertura menores a 60% durante la etapa vegetativa y de senescencia, mientras que en el periodo en el que alcanza su máxima cobertura el modelo los reproduce satisfactoriamente, aunque en este año el funcionamiento del modelo mejoró, en el caso de la biomasa el ajuste fue ($r^2>0.9$) bueno aunque la tendencia fue a subestimar los valores en ambos años, concluyen que en general el modelo es bueno también para predecir el rendimiento, índice de cosecha y materia seca, Cortés (2013d).también simuló el rendimiento de papa ante posibles impactos de cambio climático; en el caso del Trigo (Zhang et al., 2013) validaron el modelo para predecir la biomasa, cubierta de dosel, contenido del agua del suelo y rendimiento bajo condiciones de secano, consideraron su funcionamiento como satisfactorio, al igual que Guendouz et al. (2014) bajo condiciones semiáridas, por su parte Benabdelouhab et al. (2016)

concluyen que el modelo es una herramienta adecuada para simular la productividad del cultivo bajo condiciones de riego en condiciones semiáridas, mejorando sustancialmente el ajuste en comparación con las condiciones de secano; para el caso de Tomate, el modelo fue validado para predecir el rendimiento para cuatro tratamientos: sin riego después del establecimiento del cultivo, 50% de la evapotranspiración del cultivo (ETc), 100% ETc hasta el inicio de la floración y 50% de ETc después de floración y uno más 100% ETc durante todo el ciclo del cultivo, los mejores resultados se obtuvieron para el 100% ETc, ya que es en el cual se tiene las menores desviaciones, 5.30 y 3.1% en la predicción del rendimiento y la evapotranspiración del cultivo respectivamente, mientras su ajuste es menor para los demás tratamientos con un rango de desviación de 7.6-45.1% para la predicción del rendimiento, donde el tratamiento sin riego muestra la mayor desviación (Darko et al., 2016); para el cultivo del Sorgo, Araya et al.(2016) determinaron experimentalmente la cantidad de riego y fecha óptima en condiciones de cambio climático, al evaluar la productividad del agua para dos tipos de suelo, los autores concluyen que el modelo se puede utilizar para simular el rendimiento de sorgo, la biomasa y la evapotranspiración, mientras que tiende a subestimar el contenido de agua en el suelo, el rango de porcentaje de desviación va de -15 a 18% para esta variable; Adeboye et al. (2016) indican que el modelo puede ser utilizado para predecir de una manera precisa el rendimiento de soya y la humedad del suelo, permitiendo optimizar la productividad del agua a nivel de finca y cuenca, debido a su excelente funcionamiento para predecir la cobertura de dosel con valores cercanos a la unidad para r^2 , índice de eficiencia (E) e índice de Willmott (d) y con valores de RMSE y RMSE normalizado menores al 6 y 13% respectivamente, además del alto ajuste ($r^2 > 0.9$) para biomasa y rendimientos observados versus simulados, mientras que el modelo tiende a sobreestimar los valores de productividad del agua.

En el caso de Maíz Heng et al. (2009) evaluaron el desempeño del modelo en tres zonas con condiciones ambientales diferentes, al simular el crecimiento de la biomasa aérea, el rendimiento de grano y la cobertura de dosel resultó

satisfactorio en los tratamientos sin estrés hídrico y condiciones de estrés leve donde los índices de eficiencia van de 0.81 a 1, siendo menos satisfactorio en la simulación de tratamientos de estrés hídrico severo y de seco, donde bajo condiciones ambientales semiáridas obtuvieron valores de E negativos y altos valores de RMSE para cobertura y biomasa, por otro lado la predicción de la eficiencia del agua ($r^2 > 0.7$) se consideró aceptable, mientras que Stricevic et al. (2011), encontraron que el funcionamiento del modelo fue excelente en la predicción del rendimiento tanto para condiciones de riego suplementario como para temporal, con desviaciones menores a 1 y 4% respectivamente, aunque ante eventos extremos de sequía o de humedad el modelo tiende a aumentar sus desviaciones, obtuvieron un $RMSE = 0.14 \text{ Mg ha}^{-1}$ e índice de Willmott muy cercano a 1, con un alto ajuste entre valores medidos y simulados de rendimiento $r^2 > 0.90$, algo similar a lo encontrado por Salemi et al. (2011) quienes obtuvieron un valor de $r^2 = 0.95$ al simular el rendimiento de Maíz, estos autores indican que existe un nivel moderado de sensibilidad del modelo para su calibración a los parámetros: productividad del agua del cultivo, índice de cosecha de referencia y tiempo a senescencia del dosel, mientras que por su parte Vanuytrecht et al. (2014) también definen la cobertura máxima de dosel, el coeficiente de declinación de dosel y productividad del agua (WP) como los parámetros más influyentes en el rendimiento, donde WP es un parámetro prioritario bajo condiciones sin estrés, mientras que la duración del ciclo de cultivo y desarrollo del dosel son prioritarios para condiciones bajo estrés por temperatura, por otro lado, bajo condiciones de estrés hídrico se debe poner atención a los parámetros de desarrollo de raíz, características del agua en el suelo y emergencia. Hamid et al. (2015) mencionan que las simulaciones insatisfactorias de biomasa y rendimiento final de Maíz especialmente bajo condiciones de estrés hídrico es debido a la parametrización insuficiente de la fisiología de los cultivos y que la estructura de AquaCrop podría ser modificada e incorporar parámetros de crecimiento de las raíces que varían dependiendo del tipo de suelo, cultivo y clima, mejorando el funcionamiento del modelo. Por su parte Greaves and Wang (2016) concuerdan en que el modelo es una herramienta valiosa en la toma de

decisiones y para generar estrategias de manejo de riego, pero su desempeño predictivo se reduce en ambientes de humedad del suelo gravemente estresados. Derivado de lo anterior el modelo AquaCrop una vez parametrizado puede ser utilizado para evaluar diferentes láminas de riego en etapas seleccionadas del cultivo de Maíz (Oginaji et al., 2016), así como también para evaluar el rendimiento de Maíz bajo escenarios de impacto por cambio climático (Cortés, 2013d).

2.6 Literatura citada

- Cortés B., C. A. (2013a). Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de arroz en los departamentos de Tolima y Meta. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Cortés B., C. A. (2013b). Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Cortés B., C. A. (2013c). Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Cortés B., C. A. (2013d). Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Montoya S., F. (2013). Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes tratamientos de riego con pívot en condiciones semiáridas. Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete.
- Navneet K., B. (2012). Parameterization and application of the AquaCrop model for simulating bioenergy crops in Oklahoma. Master of Science, Oklahoma State University, Oklahoma.
- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adekalu, K. O. & Prasad, K. (2017). Modelling of response of the growth and yield of soybean to full and deficit irrigation by using AquaCrop. IRRIGATION AND DRAINAGE, 66, 192–205.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Araya, A., Kisekka, I. & Holman, J. (2016). Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. Irrig. Sci., 34, 465-481.
- Benabdelouahab, T., Balaghi, R., Hadria, R., Lionboui, H., Djaby, B. & Tychon, B. (2016). Testing AquaCrop to simulate durum wheat yield and schedule irrigation in a semi-arid irrigated perimeter in morocco. Irrigation and Drainage, 65, 631-643.
- Bitri, M., Grazhdani, S. & Ahmeti A. (2014). Validation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Potato Production in Environmental Condition of Korça Zone, South-eastern Albania. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 3, 12013-12020.
- Darko, R. O., Yuan, S. Q., Yan, H. F., Liu, J. P. & Abbey, A. (2016). Calibration and validation of AquaCrop for deficit and full irrigation of tomato. Int J Agric & Biol Eng, 9(3), 104-110.

- De la casa, A., Ovando, G., Bressanini, L. & Martínez, J. (2013). Aquacrop Model Calibration in Potato and Its Use to Estimate Yield Variability under Field Conditions. *Atmospheric and Climate Sciences*, 3, 397-407.
- Dinh, N. & Thi G., L. (2016). Simulating yield response of maize to climate change with aquacrop model in northwest Vietnam. *Vietnam J. Agri. Sci*, 14, 1549-1556.
- Farahani, H. J., Izzi, G. & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal*, 101, 469–476.
- Fereres, E., Walker, S., Heng, L., Hsiao, T. C., Steduto, P., Raes, D., Izzi, G., Asseng, S. & Evett, S. R. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua: Aplicaciones de AquaCrop. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Guendouz, A., Hafsi, M., Moumeni, L., Khebbat, Z. & Achiri, A. (2014). Performance evaluation of AquaCrop model for durum wheat (*Triticum durum Desf.*) crop in semiarid conditions in Eastern Algeria. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3, 168-176.
- Greaves, G. E. & Wang, Y. (2016). Assessment of FAO AquaCrop Model for Simulating Maize Growth and Productivity under Deficit Irrigation in a Tropical Environment. *Water*, 8, 19.
- Hamid A., S., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A. A. & Reza S., A. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resour Manage*, 29, 2837–2853.
- Heng, L. K., Hisao, T., Evett, S., Howell, T. & Steduto, P. (2016). Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agronomy Journal*, 101, 488–498.
- Hsiao, T. C., Fereres, E., Steduto, P. & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua: Guía de parametrización, calibración y validación de AquaCrop. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Kikoyo, D. A. & Nobert, J. (2016). Assessment of impact of climate change and adaptation strategies on maize production in Uganda. *Physics and Chemistry of the Earth*, 93, 37-45.
- Kiptum C., K., Kipkorir E., C., Munyao T., M. & Ndambuki J., M. (2013). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of cabbages in Keiyo Highlands. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 5, 360-369.
- Oiganji, E., Igbadun, H. E, Mudiare, O. J. & Oyeboode, M. A. (2016). Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in Northern zone of Nigeria. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(3):1-13.

- Salemi, H., Mohd S., M. A., Mousavi, S. F., Ganji, A., Shui L., T., Kamil Y., M. & Reza V., V. (2016). Irrigated Silage Maize Yield and Water Productivity Response to Deficit Irrigation in an Arid Region. *Polish Journal of Environmental Studies*, 20, 1295-1303.
- Sam-Amoah, L. K., Darko, R. O. & Owusu-Sekyere, J. D. (2013). Calibration and validation of aqua crop for full and deficit irrigation of hot pepper. *ARNP Journal of Agricultural and Biological Science*, 8, 175-178.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. & Raes, D. (2008). AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes, Series A*, 80. 285-292.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. & Fereres, E (2009). AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101, 426-437.
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. C., Fereres, E. & Heng, L. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua: el modelo de simulación AquaCrop. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Stricevic, R, Cosica, M., Djurovica, N, Pejic, B. & Maksimovic, L. (2011). Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower *Agricultural. Water Management*, 98,1615– 1621.
- Tilahun Z., K., Luckett, D. & Cowley, R. (2011). Calibration and Testing of the FAO AquaCrop Model for Canola. *Agronomy Journal*, 103, 1610-1618.
- Vanuytrecht, E., Raes, D. & Willems, P. (2014). Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environmental Modelling & Software*, 51, 323-332.
- Zhang, W., Liu, W., Xue, Q., Chen, J. & Han, X. (2013). Evaluation of the AquaCrop model for simulating yield response of winter wheat to water on the southern Loess Plateau of China. *Water Science & Technology*, 68.4, 821-828.

3 PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA EL CULTIVO DE MAÍZ CON RIEGO COMPLEMENTARIO EN CHAPINGO, MÉXICO

3.1 Resumen

La aplicación de modelos de simulación de cultivos son una herramienta muy útil para generar estrategias de manejo y uso del agua en las actividades agrícolas, el modelo AquaCrop ha sido validado con gran éxito en numerosos estudios. Se realizó la parametrización del modelo AquaCrop para el cultivo de Maíz bajo condiciones de riego complementario, para simular el rendimiento. Se estableció un experimento, con cinco tratamientos con tres repeticiones: Temporal, 120%, 100%, 80% y 60% de la evapotranspiración de referencia (ET_0). Se realizaron observaciones en campo de biomasa y cobertura vegetal, con la finalidad de parametrizar el modelo con datos experimentales. Al comparar los rendimientos simulados con los obtenidos experimentalmente se obtuvo una $r^2=0.99$, mientras que el RMSE fue de 0.11 ton ha^{-1} y una desviación media de 0.4 %. En general la predicción del rendimiento fue excelente para los cuatro tratamientos, mientras que para biomasa el ajuste fue bueno en el 100 y 120% de ET_0 y aceptable para el 80 y 60% de ET_0 , mientras que el ajuste de la cobertura vegetal, el funcionamiento del modelo en condiciones de 100% de ET_0 fue bueno, no así para los demás tratamientos de riego con un ajuste aceptable. Mientras que para el tratamiento de temporal el ajuste de biomasa y cobertura vegetal fue aceptable y malo respectivamente.

Palabras clave: Riego complementario, Zea mays, Evapotranspiración de referencia, Simulación, Rendimiento.

Tesis de Maestría en Ingeniería

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Misael López Hernández

Director de Tesis: Ramón Arteaga Ramírez

3.2 Abstract

The crop simulation models they are a very useful tool to generate strategies of managing and use of the water in the agricultural activities, the AquaCrop model has been validated by great success in numerous studies. There realized the parametrization of the AquaCrop model for corn crop of low conditions of complementary irrigation, to simulate the yield. An experiment was established, with five treatments with three repetitions: Temporary, 120 %, 100 %, 80 % and 60 % of the reference evapotranspiración (ET_0). There realized observations field to biomass and canopy cover with the purpose of parametrizing the model with experimental information. When the simulated yields were compared with those obtained experimentally, a $r^2 = 0.99$ was obtained, while the RMSE was 0.11 ton ha⁻¹ and an average deviation of 0.4%. Overall performance prediction was excellent for all four treatments, while for biomass the adjustment was good at 100 and 120% of ET_0 and acceptable for 80 and 60% of ET_0 , while adjustment of canopy cover, performance of the model in conditions of 100% ET_0 was good, not so for the other irrigation treatments with an acceptable fit. While for the treatment of temporal the adjustment of biomass and canopy cover was acceptable and bad respectively.

Keywords: Complementary irrigation, Zea mays, Reference evapotranspiration, Simulation, Yield

Tesis de Maestría en Ingeniería

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Misael López Hernández

Director de Tesis: Ramón Arteaga Ramírez

3.3 Introducción

El cultivo más importante de México es sin lugar a dudas el cultivo de maíz, es un producto necesario para la alimentación de la población y como suplemento alimenticio en la dieta de animales para la producción pecuaria, su importancia en la industria, sin embargo, México no es autosuficiente en este producto de suma importancia para los mexicanos. No obstante, en 2015 la producción nacional de maíz alcanzó la cifra de 22.6 millones de toneladas, pero somos deficitarios en su producción, ya que se tuvo que importar aproximadamente 11.9 millones de toneladas (SIAP, 2016).

Según Flores et al. (2013) para estimar el rendimiento con datos de campo y diferentes niveles de estrés hídrico de los cultivos, una alternativa son los modelos de simulación biofísica. Mencionan que los modelos de simulación biológica también pueden usarse para estimar la producción potencial e identificar factores limitantes de la producción o para analizar cambios en el manejo hídrico de los cultivos. Sam-Amoah et al. (2013) mencionan que lo anterior se debe a que el modelo AquaCrop simula el contenido de humedad en el suelo.

El modelo AquaCrop se usa para analizar escenarios agrícolas en ciclos y localidades diferentes, Flores et al. (2013) calibró y validó el modelo AquaCrop con datos experimentales de parcelas comerciales de maíz en el distrito de riego 075 "Río Fuerte", Sinaloa, México. Además, estudió y cuantificó el impacto de algunas prácticas de manejo como riego total (RT) y riego deficitario (80 y 60 % respecto a RT), para estimar rendimientos de maíz con fechas de siembra diferentes y determinar las fechas óptimas en ese distrito. Mencionan también que una vez validado el modelo, este será una herramienta para analizar el comportamiento del cultivo de maíz bajo diferentes escenarios de manejo agronómico, hídrico y condiciones climáticas contrastantes en México. Lo cual sugieren que para su aplicación se debe realizar la parametrización del modelo con datos experimentales a nivel local. Indican además la existencia de la relación directa entre la producción de biomasa y el agua consumida a través de

la transpiración, donde la disminución de la transpiración tiene como resultado una reducción en la producción de biomasa y del rendimiento. Y que por lo tanto la cantidad de biomasa generada durante su ciclo de crecimiento define la producción al estar relacionada con el trabajo que realiza la planta para producir su propio alimento.

Además, Farahani et al. (2009) mencionan que es un modelo simple al considerar el número de parámetros necesarios para ser ajustado, ya que las variables a parametrizar necesitan ser sometidas a nuevas pruebas bajo diferentes condiciones de clima, suelo, variedades, métodos de riego y prácticas de manejo. Consideran que la parametrización es un proceso continuo donde los parámetros de entrada son de suma importancia, tales como valores umbrales y productividad del agua normalizado WP^* . Vanuytrecht et al., (2014) mencionan que la sensibilidad del modelo depende fuertemente de las condiciones ambientales locales del lugar donde se pretenda parametrizar.

Guendouz et al. (2014) lo definen como un modelo prometedor para estimar la productividad de los cultivos en los casos donde se tienen datos limitados. Para Bitri et al. (2014) esta simplicidad es debido a los datos mínimos de entrada requeridos, y su relativa disponibilidad, lo que lo hace fácil en su manejo por los usuarios. Flores et al. (2013) argumentan que con el modelo es posible simular el rendimiento y lo hace una herramienta que se puede utilizar para evaluar escenarios de estrés hídrico, requerimientos de riego, el impacto de diferentes condiciones de manejo agronómico y estimar rendimientos dependientes de las condiciones climáticas de la región donde se pretenda adaptar el modelo.

Según Steduto et al. (2012) AquaCrop permite realizar simulaciones de la respuesta del rendimiento al agua bajo diversas condiciones ambientales y de manejo, incluidos escenarios derivados del cambio climático; sin embargo, al igual que la mayoría de los modelos de cultivo, no contempla los efectos de plagas ni enfermedades.

Es un modelo robusto, con relativamente pocos parámetros; es intuitivo y tiene un amplio espectro de aplicaciones que pueden ayudar a optimizar la producción agrícola (García et al., 2014). Stricevic et al. (2011) mencionan: prácticas de manejo, estrategias de planeación del uso de los recursos hídricos y estimación de rendimientos bajo escenarios de cambio climático. Cortés (2013) indica que el modelo AquaCrop y ETo Calculator son una buena herramienta para diseñar estrategias para la toma de decisiones para la adaptación de los cultivos ante fenómenos de variabilidad y cambio climático y/o aumentar la productividad del cultivo. Además para Bitri et al. (2014) es una aplicación importante del modelo sería comparar los rendimientos alcanzables con los reales en campo, e identificar los factores que limitan la producción de los cultivos y la productividad del agua, haciéndolo una excelente herramienta de evaluación comparativa.

Según Bitri et al. (2014) es útil para economistas y administradores del agua al realizar simulaciones de escenarios con propósitos de planificación, adecuado en la predicción de futuros escenarios de cambio climático y para desarrollar estrategias de manejo de agua para una variedad de objetivos y aplicaciones, definidas por la experiencia del usuario y la problemática existente a nivel local. Por su parte Darko et al., (2016) indican que es un modelo capaz de simular las necesidades de agua del cultivo con relativa precisión, y es una herramienta importante en la agricultura. El manejo del agua en el riego es necesario para lograr una agricultura sustentable, donde el modelo puede ser usado para evaluar el impacto de estrategias de planificación de riego y compararlas con las técnicas tradicionales, para definir la mejor bajo condiciones ambientales locales (Oiganji et al, 2016). El objetivo de la presente investigación fue parametrizar con datos experimentales el modelo AquaCrop para el cultivo de Maíz con riego complementario en Chapingo, Estado de México.

3.4 Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en la parcela experimental (1.3 ha) de la estación meteorológica de Irrigación ubicada en el campus de la Universidad Autónoma Chapingo, en el municipio de Texcoco, Estado de México, situada a una altitud de 2,241 msnm, y cuyas coordenadas geográficas son latitud norte 19°30' y longitud oeste 98°51', Figura 3-1.



Figura 3-1. Ubicación de la parcela experimental.

De la estación meteorológica automática ubicada en el campus de la Universidad Autónoma Chapingo se recopilaban datos diarios de temperaturas máxima y mínima, humedad relativa máxima y mínima, y radiación solar. De la estación meteorológica convencional se tomaron datos de velocidad del viento y precipitación.

Según los resultados del análisis de suelo, la parcela experimental presenta textura franca, pH moderadamente alcalino, libre de carbonatos y de sales. Un contenido moderadamente bajo de materia orgánica y pobre en boro.

Según Navneet (2012) el módulo de suelo requiere principalmente de parámetros de entrada: la textura del suelo, punto de marchitez permanente, capacidad de campo, punto de saturación y conductividad hidráulica saturada, determinados generalmente en laboratorio. Steduto et al. (2012) indican que el modelo requiere también datos de entrada como: el número de horizontes, curva número, lámina rápidamente evaporable, profundidad de capa restrictiva y profundidad de nivel freático.

Los datos de cultivo obtenidos en el presente trabajo de investigación fueron: fecha de siembra, tipo de siembra, densidad de siembra (plantas/ha), días a emergencia, dosel máximo (%), días a dosel máximo, días a senescencia, días a madurez fisiológica, días a la floración después de la siembra, días a la formación del grano, duración de la floración, profundidad mínima de raíces, profundidad máxima de raíces, días a máxima profundidad de raíces, temperaturas críticas (base y máxima). El híbrido sembrado fue ASPROS 823 de ciclo vegetativo precoz para maíz de grano blanco.

Se establecieron cuatro tratamientos con tres repeticiones de aplicación de agua al cultivo que consistieron de diferentes láminas de la evapotranspiración de referencia (ET_0): 60%, 80%, 100% y 120% de ET_0 calculada con el Método de FAO Penman-Monteith, y adicionalmente se tuvo un tratamiento de Temporal. La siembra se realizó de manera directa el 18 de Junio de 2016, con una densidad de siembra de 75 mil plantas ha^{-1} .

Para calcular la evapotranspiración de referencia, se usó el software ET_0 calculator que usa el método de FAO Penman-Monteith, para finalmente tener como resultado las láminas de ET_0 durante el ciclo de cultivo (Figura 3-2).

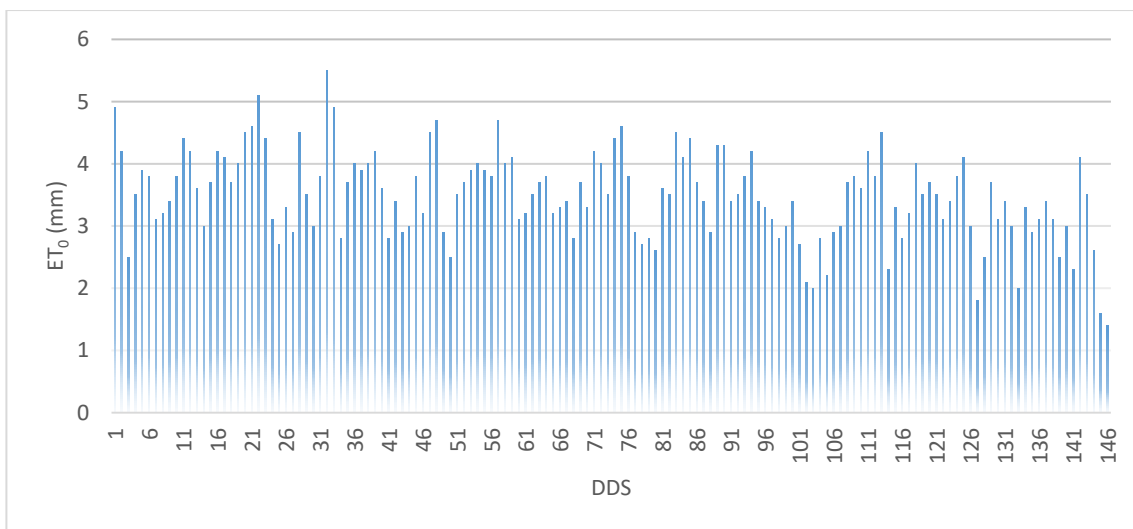


Figura 3-2. Resultados de ET_0 calculados para el ciclo de cultivo.

El muestreo no destructivo (Figura 3-3) consistió en medir: el largo y ancho de las hojas de cada planta (una planta por cada repetición), además los diámetros como su altura. Cabe mencionar que estas plantas fueron marcadas para poder darles seguimiento a las mismas durante todo el ciclo del cultivo de maíz.



Figura 3-3. Muestreo no destructivo en maíz.

El muestreo destructivo (Figura 3-4), consistió en cosechar dos plantas por repetición de cada tratamiento para posteriormente desmenuzar y separar hojas, tallo y fruto, los cuales a su vez fueron pesados en verde y en seco. También se midió y registro el área foliar con el uso de un integrador de área foliar modelo LI-3100 AREA METER el cual registra esta en centímetros cuadrados, la actividad al igual que el muestreo no destructivo se llevó a cabo durante todo su ciclo.



Figura 3-4. Muestreo destructivo en maíz.

Para estimar el rendimiento de cada tratamiento, la parcela útil fue 5 surcos con una separación de 0.8 m y una longitud de 10 m, ver Figura 3-5.



Figura 3-5. Parcela útil de maíz.

El modelo requiere pocos datos de entrada para su funcionamiento, estos son fácilmente colectados, haciendo fácil su manejo (Bitri et al., 2014). Los parámetros conservativos utilizados en la parametrización del modelo se mencionan en el Cuadro 3-1.

Cuadro 3-1. Parámetros conservativos para la simulación del rendimiento de maíz.

Parámetro	Valor	Unidades
Conservativos para todos los tratamientos		
Temperatura base	8	°C
Temperatura máxima	30	°C
Dosel vegetal al 90% emergido, CC ₀	0.49	%
Productividad del agua normalizado, WP	33.7	g m ⁻²
Índice de cosecha como referencia, HI	52	%

Tal como lo indican Kikoyo y Nobert (2015) los parámetros no conservativos que son necesarios para la parametrización del modelo AquaCrop son la textura del suelo, densidad de siembra, fecha de siembra, tipo y profundidad del suelo, nivel de fertilidad y días a madurez fisiológica, etc. Datos que fueron obtenidos en campo y a partir del manejo agronómico, se puso especial cuidado al simular el rendimiento de maíz sin estrés por fertilidad esto debido a su alto coeficiente de sensibilidad. Los parámetros especificados por el usuario para cada tratamiento que corresponden al crecimiento y desarrollo en campo del híbrido utilizado se pueden consultar en el Cuadro 3-2.

Cuadro 3-2. Parámetros definidos por el usuario para la simulación del rendimiento de maíz por tratamiento.

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad de siembra	75 000	Plantas ha ⁻¹
Profundidad de enraizamiento efectiva mínima	0.3	m
Profundidad de enraizamiento efectiva máxima	1.2	m
No conservativos para el tratamiento de temporal		
Tiempo a Máximo dosel vegetal	75	Días
Tiempo a Floración	75	Días
Duración de la fase de Floración	7	Días
Tiempo a senescencia	105	Días
Tiempo a madurez	145	Días
Máximo dosel vegetal, CC _x	80	%
No conservativos para el tratamiento de 60% de ET₀		
Tiempo a Máximo dosel vegetal	75	Días
Tiempo a Floración	75	Días
Duración de la fase de Floración	7	Días
Tiempo a senescencia	108	Días
Tiempo a madurez	148	Días
Máximo dosel vegetal, CC _x	85	%
No conservativos para el tratamiento de 80% de ET₀		
Tiempo a Máximo dosel vegetal	79	Días

Tiempo a Floración	79	Días
Duración de la fase de Floración	7	Días
Tiempo a senescencia	116	Días
Tiempo a madurez	156	Días
Máximo dosel vegetal, CC _x	85	%
No conservativos para el tratamiento de 100% de ET₀		
Tiempo a Máximo dosel vegetal	80	Días
Tiempo a Floración	80	Días
Duración de la fase de Floración	7	Días
Tiempo a senescencia	134	Días
Tiempo a madurez	156	Días
Máximo dosel vegetal, CC _x	85	%
No conservativos para el tratamiento de 120% de ET₀		
Tiempo a Máximo dosel vegetal	80	Días
Tiempo a Floración	80	Días
Duración de la fase de Floración	7	Días
Tiempo a senescencia	141	Días
Tiempo a madurez	157	Días
Máximo dosel vegetal, CC _x	87	%

Para evaluar el ajuste del modelo AquaCrop al simular cobertura vegetal, biomasa seca y el rendimiento de Maíz, fueron utilizadas seis estadísticas: el coeficiente de determinación (r^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), Ecuación 6, el índice de eficiencia (E), Ecuación 7, el índice de concordancia de Willmott (d), Ecuación 8 (Greaves and Wang, 2016), la desviación media (DM) y el RMSE normalizado por la media de los valores observados (Montoya, 2013).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2} \quad (6)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (7)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{M}| + |S_i - \bar{M}|)^2} \quad (8)$$

donde M_i y S_i son los valores medidos y simulados, respectivamente, n es el número de observaciones y $\bar{M}$ es la media de los valores medidos.

El r^2 es obtenido de la regresión lineal por el origen al graficar los valores medidos y los valores observados, un valor de 1 indica una buena agregación de las predicciones del modelo con los datos medidos. Aunque no indica si el modelo sobreestima o subestima dichos valores (Montoya, 2013).

Greaves and Wang, (2016) mencionan que el RMSE representa una medida del total de las desviaciones medias entre los valores observados y simulados. Por lo tanto, un valor cercano a 0 muestra el mejor ajuste del modelo de simulación. Y el E es una medida del cuadrado medio a la varianza observada. Los valores de E se encuentran en el rango de $-\infty$ a 1, donde la mejor eficiencia del modelo es cuando los valores son cercanos a 1. Por otro lado, el índice de concordancia d es una medida del error relativo en las estimaciones del modelo, donde el rango de valores va de 0 a 1 y un valor de 1 indica una perfecta concordancia del modelo.

Adicionalmente para evaluar el ajuste del modelo se utilizaron dos estadísticos más (Montoya, 2013): el NRMSE Ecuación 9 y la DM Ecuación 10, donde el RMSE normalizado por la media de los valores observados se expresa en porcentaje, un NRMSE inferior a 10% se considera excelente, mientras que la DM indica si el modelo tiende a sobreestimar o subestimar los valores observados, un valor mientras más se acerca a 0 al igual que el RMSE se tiene un mejor ajuste del modelo, al igual que Montoya (2013) para evaluar el modelo se considera el límite de $\pm 20\%$ tanto para RMSE como para la DM.

$$NRMSE = \frac{100}{\bar{M}} * RMSE \quad (9)$$

$$DM = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{n} \quad (10)$$

3.5 Resultados y discusión

El desarrollo de la cobertura vegetal es presentado en la Figura 3-6. En general el modelo tiende a subestimar los valores, esto se hace más notable en la etapa vegetativa del cultivo, lo cual se debió a los eventos de lluvia que permitieron al cultivo alcanzar su máxima cobertura independientemente del tratamiento algo similar a lo encontrado por Montoya (2013). Por otro lado, cuando el cultivo alcanza la máxima cobertura es donde las predicciones por el modelo se apegan más a las mediciones reales. Excepto para el tratamiento de temporal en el cual durante todo el ciclo se subestimaron los valores.

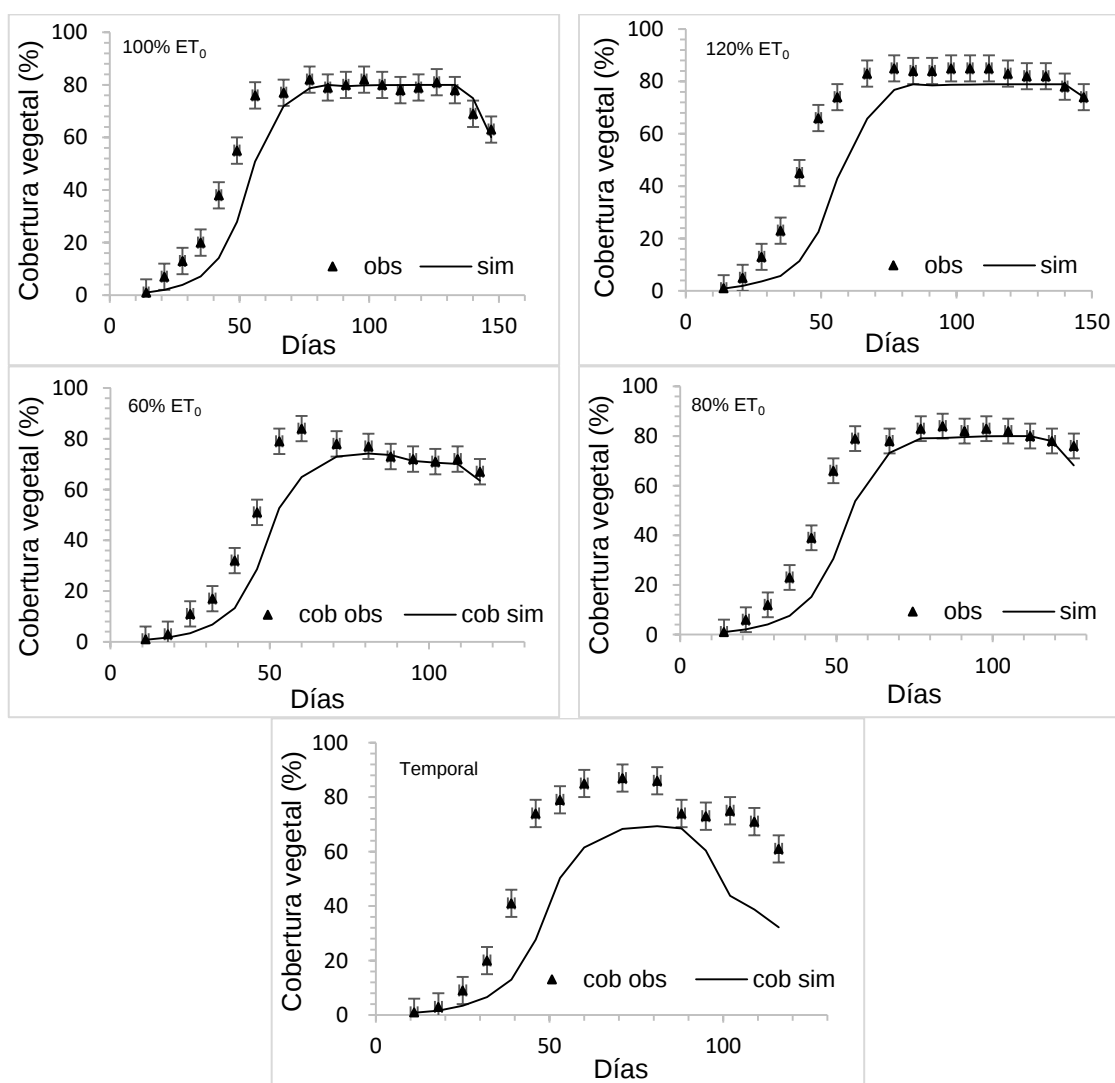


Figura 3-6. Cobertura vegetal observada y simulada en los diferentes tratamientos.

El ajuste de los valores medidos y simulados de biomasa es plasmado en la Figura 3-7. Generalmente, los valores simulados en los tratamientos de 100 y 120% de ET_0 son muy apegados a la realidad, aunque ligeramente subestimados, mientras que en los otros tratamientos tiende a sobreestimar los valores de biomasa, situación que se aprecia de mejor manera durante la etapa de llenado de grano, Greaves and Wang (2016) encontraron que en general los valores de cobertura vegetal se subestiman mientras que los valores de biomasa son sobreestimados en los tratamientos bajo algún estrés.

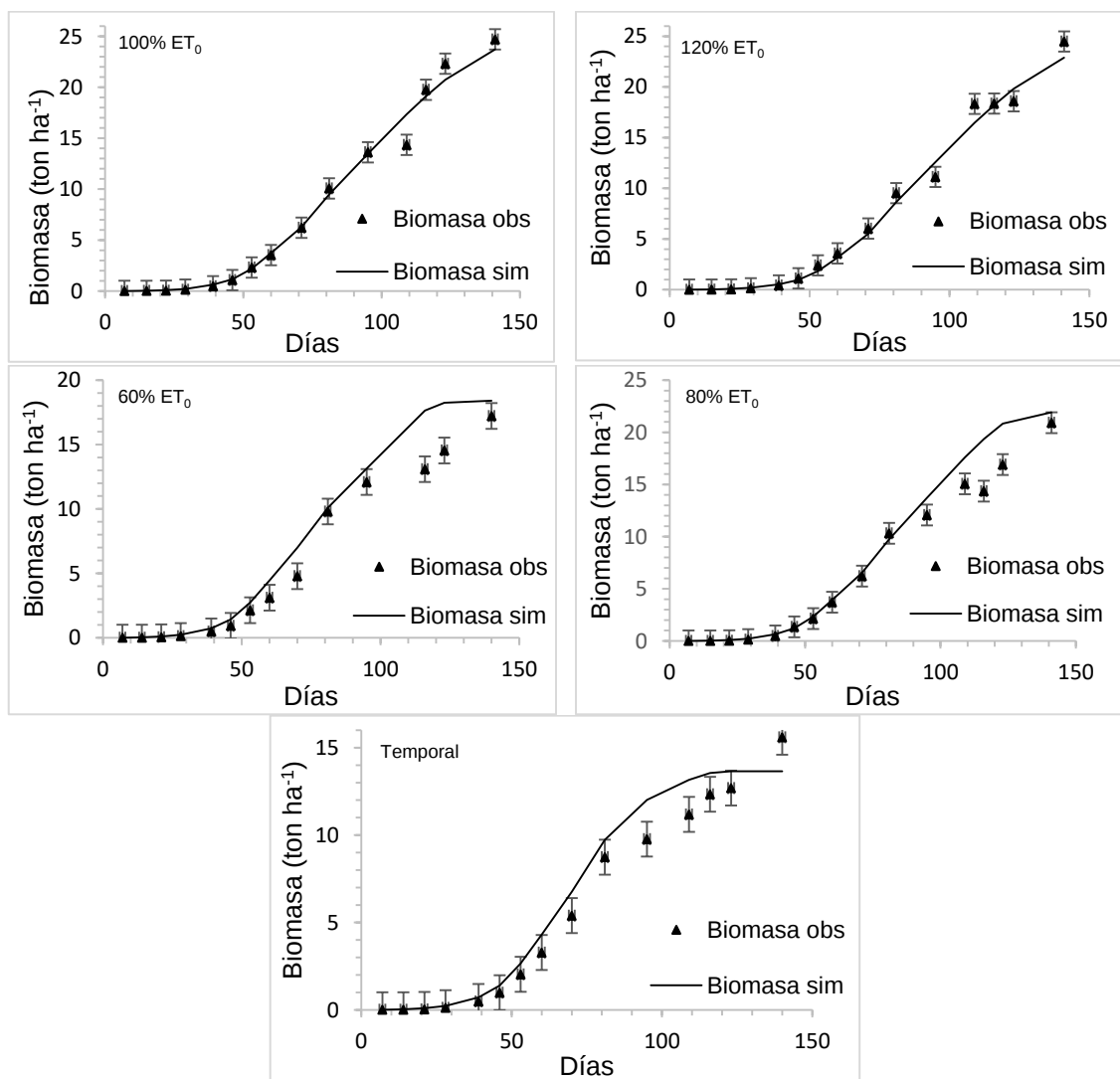


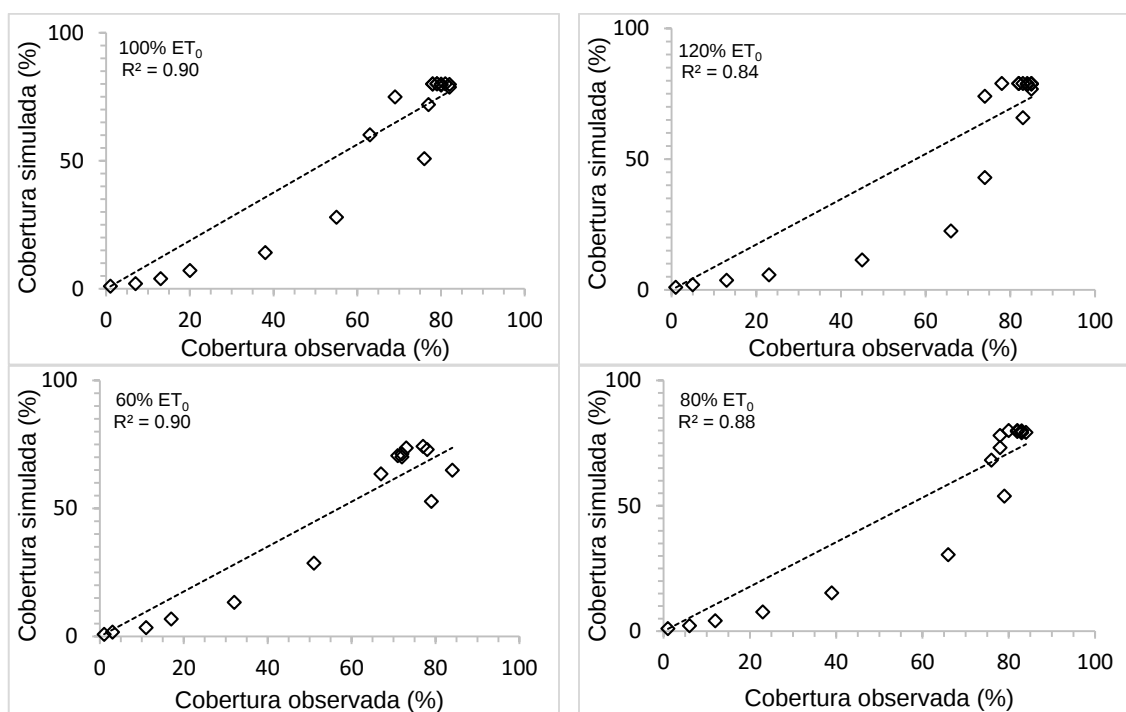
Figura 3-7. Biomasa seca observada y simulada en los diferentes tratamientos.

En el caso del rendimiento, los valores medidos y los simulados por el AquaCrop se muestran en el Cuadro 3-3, donde se aprecia que la predicción del rendimiento por el modelo muestra valores muy similares a los observados.

Cuadro 3-3. Rendimientos observados y simulados con el modelo AquaCrop.

Tratamiento	Rendimientos observados	Rendimientos simulados
Temporal	5.26 ton ha ⁻¹	5.13 ton ha ⁻¹
60% de ET ₀	7.47 ton ha ⁻¹	7.55 ton ha ⁻¹
80% de ET ₀	8.87 ton ha ⁻¹	8.99 ton ha ⁻¹
100% de ET ₀	13.06 ton ha ⁻¹	13.09 ton ha ⁻¹
120% de ET ₀	13.19 ton ha ⁻¹	13.35 ton ha ⁻¹

Al evaluar la predicción de la cobertura vegetal se tienen valores de r^2 aceptables que van de 0.82 a 0.90, el mayor valor se tiene en condiciones de 100% ET₀ y el valor de correlación baja en los tratamientos en condiciones de estrés, ver Figura 3-8.



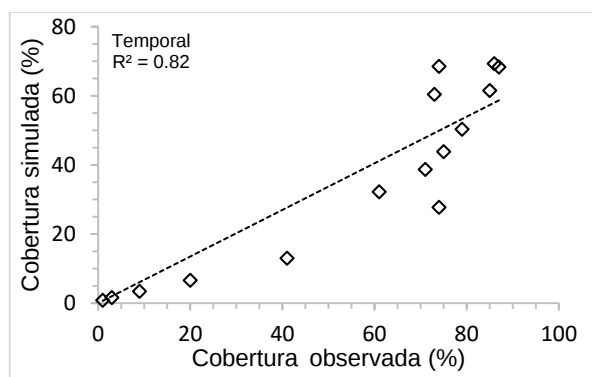


Figura 3-8. Relación entre la cobertura vegetal observada y simulada en los diferentes tratamientos.

Las estadísticas de los valores de cobertura están plasmadas en el Cuadro 3-4. Donde se observa que los valores más bajos de RMSE y DM fueron obtenidos para el tratamiento de 100% de ET_0 , considerando los valores de índice de eficiencia (E) y del índice de concordancia (d), el ajuste del modelo para la predicción de la cobertura vegetal fue bueno para el tratamiento de 100% de ET_0 , aceptable para el 60, 80 y 120% de ET_0 , y malo para el tratamiento de temporal del cual se obtuvo el mayor valor de RMSE y de NRMSE, en este tratamiento la DM fue mayor al 20% y presentó los valores más bajos de $R^2=0.82$, $E=0.43$ y $d=0.85$.

Cuadro 3-4. Estadísticas cobertura vegetal.

Tratamiento	r^2	E	d	RMSE		NRMSE	DM	
				%	%	(%)	%	%
Temporal	0.82	0.43	0.85	23.3	26.8	41.8	-20	-22
60% ET_0	0.90	0.84	0.96	11.9	14.1	22.6	-8	-10
80% ET_0	0.88	0.80	0.95	13.5	16.1	22.7	-9	-11
100% ET_0	0.90	0.84	0.97	11.0	13.5	18.4	-6	-7
120% ET_0	0.84	0.70	0.93	16.1	19.0	25.2	-11	-13

Como se puede apreciar en la Figura 3-9, en general la correlación entre la biomasa observada y la simulada es alta, con valores de r^2 de 0.97 a 0.99, los valores más altos (0.99) corresponden al tratamiento de 100 y 120% de ET_0 .

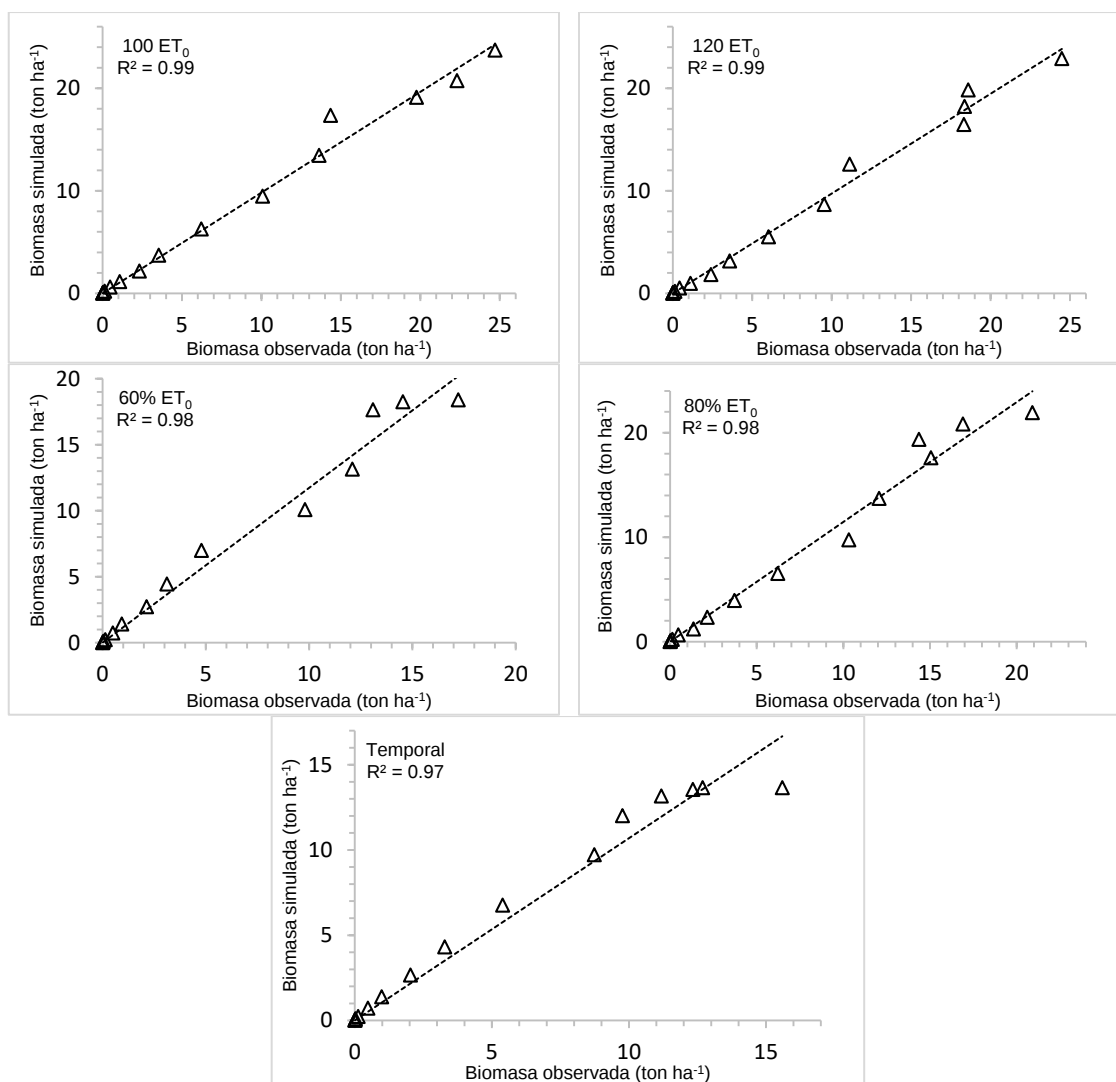


Figura 3-9. Relación entre la biomasa observada y simulada en los diferentes tratamientos.

Altos valores de RMSE y DM fueron obtenidos para los tratamientos con un mayor estrés hídrico. Con un índice de eficiencia (E) mayor a 0.90 y el índice de concordancia (d) muy cercano a 1 para todos los tratamientos, el ajuste del modelo para la predicción de la biomasa fue bueno para los tratamientos de 100 y 120% de ET₀, mientras que para los tratamientos restantes el ajuste fue disminuyendo, aunque su ajuste sigue siendo aceptable para los tratamientos de temporal, 60 y 80% de ET₀, ver Cuadro 3-5.

Cuadro 3-5. Estadísticas biomasa.

Tratamiento	r^2	E	d	RMSE		NRMSE (%)	DM	
				ton ha ⁻¹	%		ton ha ⁻¹	%
Temporal	0.97	0.95	0.99	1.1	7.4	20.8	0.6	3.9
60% ET ₀	0.98	0.96	0.99	1.8	10.3	31.8	1.1	6.6
80% ET ₀	0.98	0.93	0.98	1.9	8.8	26.7	1.0	4.6
100% ET ₀	0.99	0.99	0.99	0.9	3.8	11.9	0.0	-0.1
120% ET ₀	0.99	0.99	0.99	0.9	3.5	11.4	-0.2	-0.9

Al igual que Adeboye et al. (2017), se tuvo un $r^2=0.99$ entre los rendimientos observados y simulados de, ver Figura 3-10, se obtuvo un índice de eficiencia (E) de 0.99 y un índice de concordancia (d) de 0.99, tomando en cuenta que E y d fueron cercanos a 1, el NRMSE fue de 1.2 %, el valor de desviación media de 0.4 % y un bajo RMSE de 0.11 ton ha⁻¹, el ajuste del modelo para la predicción del rendimiento se considera excelente, similar a lo encontrado por Hamid et al. (2015) y por Stricevic et al. (2011), quienes obtuvieron un alto grado de confiabilidad. Lo cual lo hace una opción para simular el rendimiento de Maíz en etapas críticas del cultivo, algo semejante a lo que determinaron Oiganji et al. (2017).

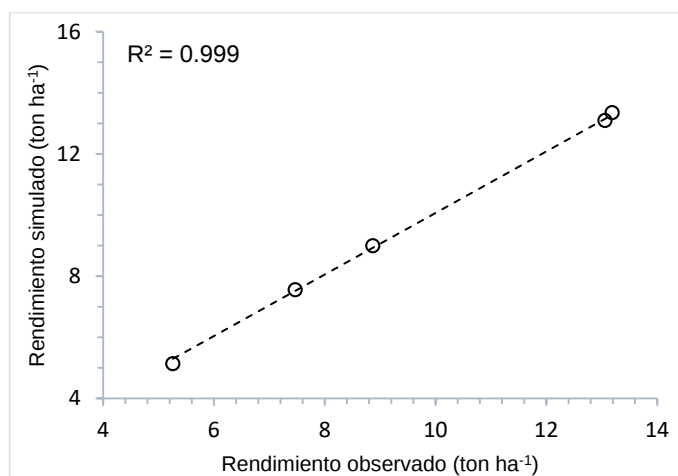


Figura 3-10. Relación entre el rendimiento observado y simulado.

3.6 Conclusiones

El seguimiento a biomasa, materia seca, cobertura vegetal, así como también las fechas en que se presentan cada una de las etapas fenológicas del cultivo y su duración, son parámetros muy importantes para el correcto funcionamiento del modelo.

Con la parametrización del modelo AquaCrop es posible simular el rendimiento de la zona de manera fiable comparándolos con los valores observados en campo. Por lo tanto, sería una buena herramienta para simular el rendimiento de maíz con distintas láminas de riego aplicadas durante sus periodos críticos.

El modelo resultó excelente en la predicción del rendimiento para todos los tratamientos, bueno para la simulación de la biomasa y cobertura vegetal para el tratamiento de 100% de ET_0 , aunque en condiciones de estrés su funcionamiento es aceptable, para el temporal se tuvo un mal funcionamiento del modelo al predecir la cobertura vegetal al subestimar los valores, debido a que las lluvias permitieron al cultivo llegar a su máxima cobertura.

3.7 Literatura citada

- Cortés B., C. A. (2013). Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Navneet K., B. (2012). Parameterization and application of the AquaCrop model for simulating bioenergy crops in Oklahoma. Master of Science, Oklahoma State University, Oklahoma.
- Montoya S., F. (2013). Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes tratamientos de riego con pívot en condiciones semiáridas. Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete.
- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adekalu, K. O. & Prasad, K. (2017). Modelling of response of the growth and yield of soybean to full and deficit irrigation by using aquacrop. IRRIGATION AND DRAINAGE, 66, 192–205.
- Bitri, M., Grazhdani, S. & Ahmeti A. (2014). Validation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Potato Production in Environmental Condition of Korça Zone, South-eastern Albania. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 3, 12013-12020.
- Darko, R. O., Yuan, S. Q., Yan, H. F., Liu, J. P. & Abbey, A. (2016). Calibration and validation of AquaCrop for deficit and full irrigation of tomato. Int J Agric & Biol Eng, 9(3), 104-110.
- Farahani, H. J., Izzi, G. & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. Agronomy Journal, 101, 469–476.
- Flores G., H, Ojeda B. W., Flores M., H., Sifuentes I., E. & Mejía S., E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. Agrociencia, 47, 347-359.
- García Á., J., Riaño H., N. & Magnitskiy, S. (2014). Simulation of corn (*Zea mays* L.) production in different agricultural zones of Colombia using the AquaCrop model. Agronomía Colombiana, 32, 358-366.
- Guendouz, A., Hafsi, M., Moumeni, L., Khebbat, Z. & Achiri, A. (2014). Performance evaluation of aquacrop model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semiarid conditions in Eastern Algeria. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 3, 168-176.
- Greaves, G. E. & Wang, Y. (2016). Assessment of FAO AquaCrop Model for Simulating Maize Growth and Productivity under Deficit Irrigation in a Tropical Environment. Water, 8, 19.
- Hamid A., S., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A. A. & Reza S., A. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. Water Resour Manage, 29, 2837–2853.

- Kikoyo, D. A. & Nobert, J. (2016). Assessment of impact of climate change and adaptation strategies on maize production in Uganda. *Physics and Chemistry of the Earth*, 93, 37-45.
- Oiganji, E., Igbadun, H. E, Mudiare, O. J. & Oyeboode, M. A. (2016). Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in Northern zone of Nigeria. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(3):1-13.
- Sam-Amoah, L. K., Darko, R. O. & Owusu-Sekyere, J. D. (2013). Calibration and validation of aqua crop for full and deficit irrigation of hot pepper. *ARNP Journal of Agricultural and Biological Science*, 8, 175-178.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2016). Atlas agroalimentario 2016. Puede ser consultado en: www.gob.mx/siap.
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. C., Fereres, E. & Heng, L. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua: el modelo de simulación AquaCrop. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Stricevic, R, Cosica, M., Djurovica, N, Pejic, B. & Maksimovic, L. (2011). Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower *Agricultural. Water Management*, 98,1615– 1621.
- Vanuytrecht, E., Raes, D. & Willems, P. (2014). Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environmental Modelling & Software*, 51, 323-332.

4 PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN CHAPINGO, MÉXICO.

4.1 Resumen

El aprovechamiento sustentable de los recursos naturales para satisfacer nuestras necesidades y de las generaciones futuras es el reto que afrontamos día a día, por lo cual el aprovechamiento de las energías renovables y el uso eficiente del agua disponible es cada vez más relevante para la sociedad. El agua además de ser el recurso vital para la vida en nuestro planeta es el insumo principal en la mayoría de los procesos industriales, para el desarrollo de las poblaciones y también el detonante de la germinación de todo tipo de plantas existentes, por lo cual el uso eficiente del agua en la producción agrícola es un paso importante hacia el aprovechamiento de este recurso tan limitado. El objetivo del presente trabajo de investigación fue determinar la productividad del agua normalizada para el cultivo de Maíz con datos experimentales. Se estableció un experimento de Maíz con cuatro tratamientos de riego complementario: 120%, 100%, 80% y 60% de la Evapotranspiración de referencia (ET_0), y uno más de temporal. La productividad del agua normalizada obtenida fue $23.30 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$.

Palabras clave: Zea mays, Productividad del agua normalizada, Regresión lineal, Transpiración, Lámina de riego.

Tesis de Maestría en Ingeniería

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Misael López Hernández

Director de Tesis: Ramón Arteaga Ramírez

4.2 Abstract

The sustainable use of natural resources to satisfy our needs and future generations is the challenge we confront day after day, so that the use of renewable energy and the efficient use of available water is increasingly relevant to society. Water as well as being the vital resource for life on our planet is the main input in most industrial processes, for the development of populations and also the trigger for the germination of all types of existing plants, efficient use of water in agricultural production is an important step towards the utilization of this so limited resource. The objective of this research was to determine the normalized water productivity for corn crop with experimental data. A corn experiment was established with four complementary irrigation treatments: 120%, 100%, 80% and 60% of the reference evapotranspiration (ET_0), and one more temporal. The normalized water productivity obtained was $23.30 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$

Keywords: Zea mays, Normalized water productivity, Linear regression, Transpiration, Irrigation depths.

Tesis de Maestría en Ingeniería

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Misael López Hernández

Director de Tesis: Ramón Arteaga Ramírez

4.3 Introducción

Los bajos rendimientos y los precios tan volátiles del Maíz grano en México son la principal razón de que la superficie destinada a la producción de Maíz haya cambiado a la siembra de productos agrícolas más rentables para el productor. Es bien sabido que México es uno de los principales importadores de este grano, aun cuando la tendencia de los rendimientos ha sido aumentar tanto en temporal como bajo riego, el estado de México siendo uno de los principales productores de Maíz, se basa en el régimen de temporal y los rendimientos bajo condiciones de riego se encuentran por debajo del promedio nacional de 8 ton ha⁻¹ (FIRA, 2016).

La necesidad de generar estrategias para el uso eficiente del agua hace que la zona de trabajo sea muy importante para investigar alternativas que permitan aumentar la productividad en la agricultura mediante el uso de modelos de simulación biológica, como el AquaCrop, el cual simula el rendimiento de los cultivos de acuerdo al agua disponible para su desarrollo.

Los modelos de cultivo pueden ayudar a predecir la producción de maíz y tomar decisiones, sin embargo, siguen siendo poco adecuados para gestionar y aliviar los riesgos por eventos climáticos extremos (Jin et al., 2016). Según Vanuytrecht et al. (2014) las ecuaciones del modelo AquaCrop y su parametrización implican inevitablemente supuestos y simplificaciones de la realidad, donde el desarrollo del dosel y la fenología son impulsados por la temperatura, el primero determina la cantidad de agua transpirada por el cultivo, y la producción biomasa (acumulada) se obtiene a través de la suma de la razón diaria de transpiración y ET₀ durante el período en que se produce, y donde la productividad del agua (WP*) es el factor proporcional entre la biomasa y la transpiración normalizada, Ecuación 1.

$$B_n = WP * \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr_i}{ET_{0i}} \right) \quad (1)$$

donde B_n es la producción acumulada de biomasa aérea después de n días (g m^{-2}); Tr_i es la transpiración diaria (mm día^{-1}); ET_0 es la evapotranspiración de referencia diaria (mm día^{-1}) para el i -ésimo día; $i=1, \dots, n$, son los días secuenciales del período en que se produce la biomasa; WP^* es la productividad del agua normalizada (g m^{-2}).

El monitoreo del cultivo a lo largo de su ciclo de vida es importante para poder validar el funcionamiento del modelo al representar los procesos que definen el rendimiento de los cultivos. Ya que una vez validado, el modelo AquaCrop puede ser usado para simular la producción de biomasa, rendimiento de grano y productividad del agua, con la finalidad de determinar la gestión del agua de riego y estrategias relacionadas con el tipo de clima y fechas de siembra sobre distintos tipos de suelo (Araya et al., 2016).

El modelo ha sido validado principalmente para la predicción del rendimiento y biomasa sin embargo otros investigadores como Greaves and Wang (2016) se han dado a la tarea de evaluar otros procesos como el desarrollo del dosel y la eficiencia del agua. Por su parte Stricevic et al. (2011) mencionan que este modelo es altamente confiable para las simulaciones de biomasa, rendimiento y demanda de agua, y lo recomiendan para su aplicación bajo diferentes condiciones climáticas.

La validación del modelo se ha realizado para cultivos como trigo, Guendouz et al. (2014) lo validó para la predicción del rendimiento y obtuvo una alta correlación entre los valores medidos y los simulados, aunque con una tendencia a subestimar los valores de biomasa y cobertura vegetal, por su parte Farahani et al. (2009) mencionan que en el caso del algodón también obtuvieron un excelente funcionamiento en la simulación del rendimiento, pero para el caso de la biomasa el ajuste del modelo fue bueno y para cobertura vegetal se consideró como aceptable, una vez que parametrizaron el modelo. Lo anterior también para Maíz, la evaluación del modelo en predecir la biomasa y rendimiento final, tanto para condiciones de temporal (Mhizha et al., 2014), como para distintos tratamientos de riego (Salemi et al., 2011) y riego complementario (Estricevic et al., 2011).

Sabiendo que el riego se utiliza a menudo como complemento a las precipitaciones en la agricultura para aumentar la productividad de los cultivos (Araya et al., 2016), es necesario generar estrategias de manejo del agua de riego, donde los modelos de simulación biológica son una excelente herramienta para generar información en poco tiempo sin necesidad de llevar a cabo experimentos en campo. El objetivo del presente trabajo fue realizar la simulación la productividad del agua.

4.4 Materiales y métodos

Según López (2008) presenta un clima Cb(Wo)(W)(i')g, templado subhúmedo con lluvias en verano (precipitación media anual de 664 mm) y una época de seca en invierno, la temperatura media anual es de 15.5 °C (Oscilación térmica 5 - 7 °C), siendo el mes de Mayo el más caluroso y el mes más frío el mes de Enero. El experimento se llevó acabo en la parcela experimental del departamento de irrigación, en la Universidad Autónoma Chapingo, situado geográficamente en las coordenadas 19°30' Latitud norte y 98°51' Longitud oeste. Fue establecido un experimento de Maíz con cuatro tratamientos de riego complementario, la siembra se realizó el 18 de Junio de 2016, el híbrido Aspros 823 para grano (Maíz blanco) de ciclo precoz.

La información climática incluye valores diarios de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento (a 2 m de altura), radiación solar y precipitación efectiva, fueron obtenidos de la estación meteorológica automática y convencional ubicadas en el campus de la universidad. Durante el periodo que se realizaron los muestreos de biomasa y el seguimiento a la cobertura vegetal se tuvo una precipitación efectiva de 292.28 mm y la evapotranspiración de referencia (ET_0) estimada por el método de FAO Penman-Montieth fue de 508.9 mm, donde durante los primeros 75 - 80 días que correspondieron a la etapa vegetativa del cultivo se tuvo una buena distribución de la precipitación en la zona de trabajo por lo cual el requerimiento de riego complementario fue mínimo, sin embargo en el resto del periodo experimental que corresponde a la etapa de floración y llenado de grano se estableció un periodo sin lluvias, excepto por 6

eventos de lluvia significativos entre el 21 de Septiembre y 1 de octubre, pero que no afectaron en la realización del experimento, lo anterior se puede observar en la Figura 4-1.

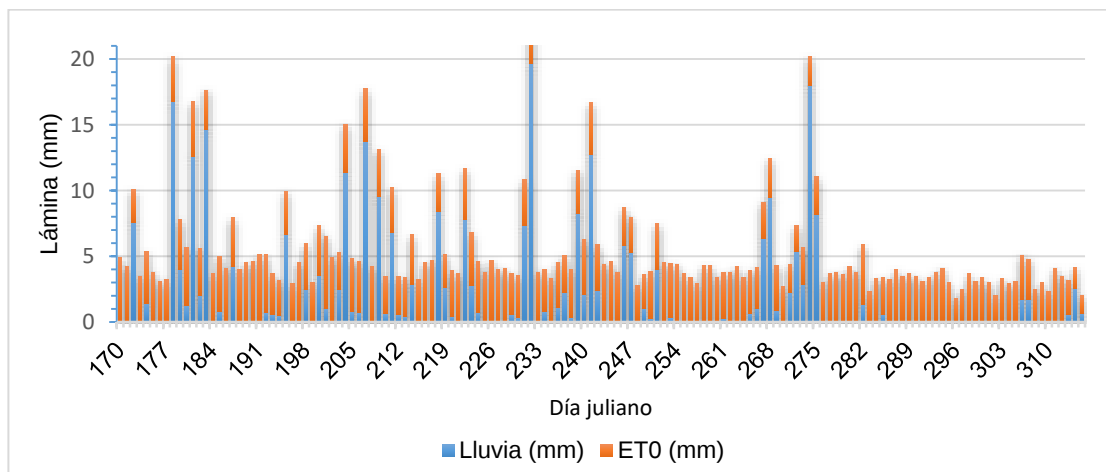


Figura 4-1. Distribución de la precipitación y comportamiento de la ET_0 en la etapa experimental.

El suelo de la parcela experimental según los resultados de su análisis: presenta textura franca con pH moderadamente alcalino, libre de carbonatos y de sales. Un contenido moderadamente bajo de materia orgánica y pobre en boro. Capacidad de campo de 21.3 %, punto de marchitez permanente de 12.7 %, punto de saturación 40 %, además la conductividad hidráulica fue de 4.50 cm h^{-1} y una densidad aparente de 1.03 g cm^{-3} . Durante el experimento el cultivo se mantuvo libre de malezas, plagas y enfermedades, ya que el modelo no contempla los efectos por estos (Steduto et al., 2012), realizando tratamientos preventivos y de control necesarios para que estos no compitieran por luz, agua y nutrientes.

Se estableció un experimento de Maíz con cinco tratamientos (con tres repeticiones), cuatro de riego complementario a la lluvia y uno más de temporal, distribuidos en bloques al azar, la diferencia en los tratamientos de riego fue sólo en la lámina de agua aplicada, ya que la fertilización y demás prácticas de manejo fueron las mismas para todos los tratamientos. Las cuatro láminas de riego

incluyen un tratamiento de riego completo (100 % de la ET_0), un tratamiento de sobre riego de 120% de ET_0 y dos más bajo estrés hídrico de 60 y 80% de ET_0 .

Durante la etapa experimental se dio seguimiento a cobertura vegetal mediante segmentación de imágenes fotográficas utilizando el software Open CV, mientras que para biomasa en verde y biomasa seca, el procedimiento consistió en cosechar 2 plantas al azar por repetición, las cuales se desmenuzaban y separaban en hojas, tallo, espiga y mazorca, para posteriormente ser pesadas (en verde) y registrar su peso (en gramos) antes de ser introducidas a la estufa de secado (Modelo: POM-326-F), una vez que estas perdieron la humedad fueron pesadas nuevamente (en seco), esta información fue registrada en cada muestreo, para finalmente obtener los pesos promedio de las seis plantas y por tratamiento (dos por repetición) para cada muestreo, tanto para biomasa seca como en verde.

La eficiencia del uso del agua es un parámetro de cultivo de notable importancia en los modelos de simulación de cultivos, definido como la pendiente de la ganancia de carbono versus la transpiración acumulada del dosel de un cultivo, donde la ganancia de carbono se expresa por la biomasa sobre el suelo, y para minimizar la contribución de la evaporación del suelo al consumo de agua, se determina para todos los cultivos comenzando cuando el suelo se encuentra totalmente cubierto (Steduto and Albrizio, 2005). En el presente trabajo se determinó la productividad del agua (WP^*) a partir de regresión lineal entre las mediciones en campo de biomasa (kg m^{-2}) versus la transpiración acumulada normalizada por la evapotranspiración de referencia, donde la pendiente representa este parámetro.

González et al. (2010), definen la productividad del agua WP como la cosecha física o económica por unidad de agua consumida por el cultivo (kg m^{-3} o $\$ \text{m}^{-3}$), donde el numerador es el rendimiento expresado en términos de grano o económicos (kg ha^{-1} o $\$ \text{ha}^{-1}$) y el denominador puede ser la transpiración, evapotranspiración, el agua aplicada en el riego o agua aplicada y lluvia, y propone las Ecuaciones 2 y 3 para evaluar este parámetro:

$$WP_{Et} = \frac{R}{ET} \quad (2)$$

$$WP_T = \frac{R}{T} \quad (3)$$

donde WP_{Et} es la productividad del agua consumida y WP_T es la productividad del agua total (agua aplicada más precipitaciones). En este trabajo se usaron además las siguientes definiciones: WP_{tr} la productividad del agua transpirada (Ecuación 4) y se propone la Ecuación 5, donde WP_{Rj-Ri} es la productividad del agua entre tratamientos de riego:

$$WP_{tr} = \frac{R}{tr} \quad (4)$$

$$WP_{Rj-Ri} = \frac{R_j - R_i}{I_j - I_i} \quad (5)$$

donde tr representa la transpiración (mm); R_j es el rendimiento del tratamiento de riego a evaluar y R_i es el tratamiento de riego con el cual se hace la comparación; I_j corresponde a la lámina de agua aplicada del tratamiento de riego a evaluar y I_i corresponde a la lámina de agua aplicada del tratamiento de riego con el cual se hace la comparación. Para el caso del 60% de ET_0 el denominador se usó la lámina aplicada para ese tratamiento y el rendimiento de referencia fue el del tratamiento de temporal.

4.5 Resultados y discusión

El mayor rendimiento de maíz se obtuvo con el tratamiento del 120% de la Evapotranspiración de referencia (325 mm de lámina de riego adicional a la lluvia), aunque tan sólo fue superior al de 100% de ET_0 por 130 kg ha⁻¹ de grano, en el tratamiento 4 al aplicar una lámina de riego de 261 mm, teniendo un ahorro de 64 mm de agua se obtiene un rendimiento de 13.06 ton ha⁻¹. Los rendimientos obtenidos de acuerdo a los tratamientos se observan en la Figura 4-2.

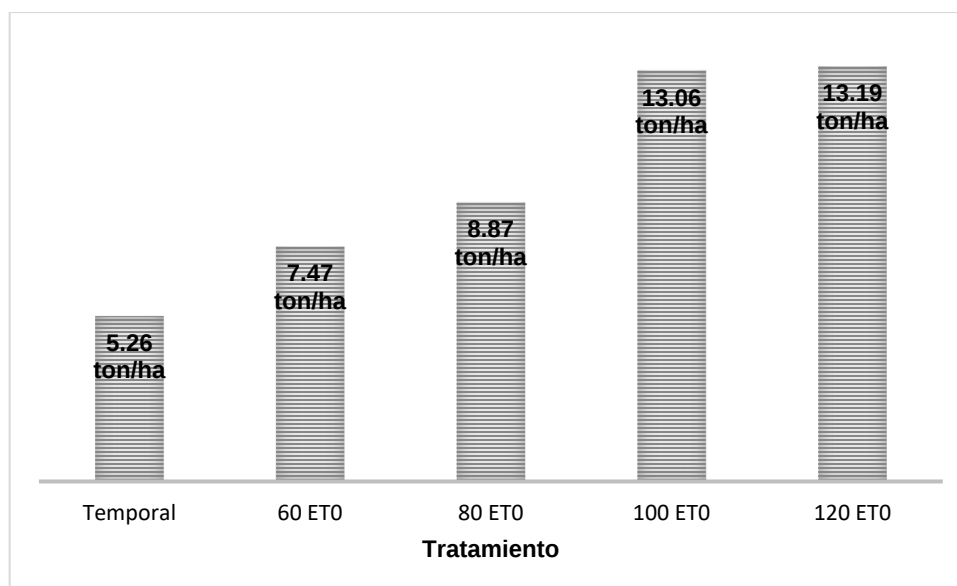


Figura 4-2. Rendimientos obtenidos en campo.

En la figura 4-3 se nota que los aumentos de rendimiento más notables se dan al comparar el obtenido de Temporal con el 60% ET₀, con un aumento de 40.02% de rendimiento, así como también al comparar el tratamiento de 80% ET₀ con el 100% ET₀, donde el rendimiento del 100% ET₀ fue superior un 47.24%.

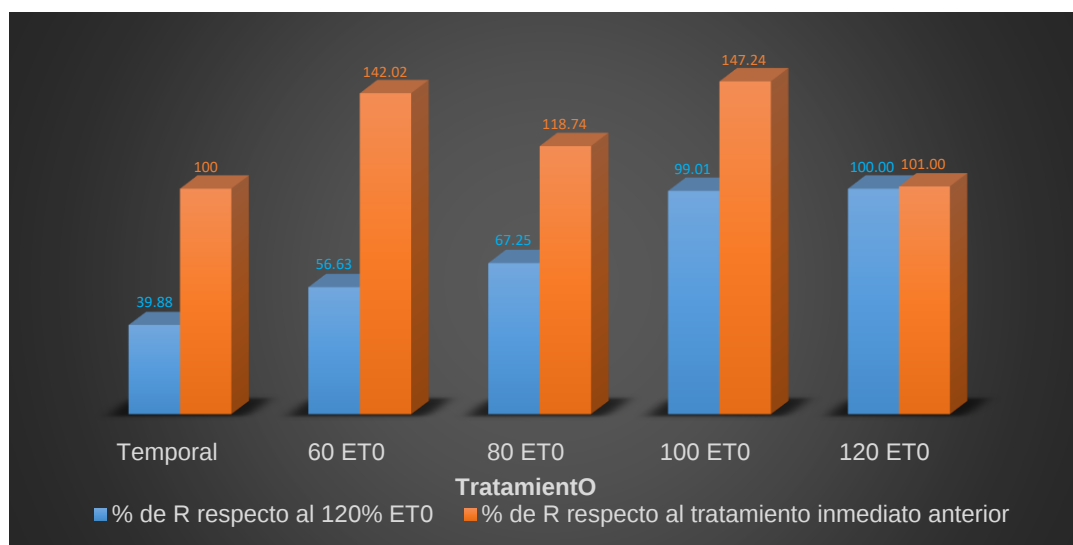


Figura 4-3. Comparación de rendimientos entre tratamientos.

En la zona de trabajo con una limitada cantidad de agua por precipitación y al realizar en lo posible un suministro de agua eficiente al cultivo durante su crecimiento, al aplicar una lámina de riego correspondiente al 60% ET₀, se tiene

un aumento de 2.21 ton ha⁻¹ en comparación con el tratamiento de temporal, el estrés en la etapa de llenado de grano es evidente al comparar estos tratamientos, teniendo un efecto negativo en la cobertura vegetal (Figura 4-4), lo cual repercute también en una disminución de la producción de biomasa y del rendimiento final.



Figura 4-4. Tratamiento de temporal y 60% ET₀.

Desde el punto de vista del ahorro del agua en riego del cultivo de Maíz, aplicar una lámina del 60% de ET₀ sería la mejor opción de los tratamientos con estrés, sin embargo, para obtener la mayor productividad al aplicar riego más lluvia, se alcanzó con el tratamiento de 100% de ET₀ (Cuadro 4-1). Álvarez et al., (2016) reconoce que, al aplicar riego, el agricultor asegura todos los años una buena cosecha independientemente de la ocurrencia de precipitaciones.

Cuadro 4-1. Análisis de la productividad del agua.

Parámetro	Temporal	60% ET₀	80% ET₀	100% ET₀	120% ET₀
Rendimiento, kg ha ⁻¹	5260	7470	8870	13060	13190
Lámina de riego, mm	0	66	167	261	325
Lluvia, mm	289.1	291.6	291.6	318.1	322.1
ET ₀ , mm	507.5	508.9	508.9	545.2	549.6
Transpiración, mm	158.2	211.5	255.1	296.9	302.6
WP _{Et} , kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	10.36	14.68	17.43	23.95	24.00

WP _T , kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	18.19	20.89	19.34	22.55	20.38
WP _{tr} , kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	33.25	35.32	34.77	43.99	43.59
WP _(Rj-Ri) , kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	-	33.48	13.86	44.57	2.03

Como se muestra en el Cuadro 4-2, resultado de las simulaciones de los tratamientos, en los de temporal, 60 y 80% de ET₀, el índice de cosecha fue ajustado debido al estrés hídrico al cual fueron sometidos durante el llenado de grano, además que en combinación con el estrés por temperatura todos los tratamientos disminuyeron su potencial de biomasa producida, hasta en un 34% en el caso de temporal (Biomasa/Biomasa potencial x 100), siendo menos afectados en su producción los tratamientos de 100 y 120% de ET₀ con una disminución del 7%.

En referencia a la productividad del agua (WP) el tratamiento de 100% de ET₀ fue de 2.76 kg m⁻³ en el cual se tiene un ahorro de 64 mm de lámina de riego al compararlo con el tratamiento de 120% de ET₀, (2.77 kg m⁻³), la diferencia de rendimiento es mínima, esto debido a que el tratamiento de 120% de ET₀ sufrió un mayor estrés hídrico en expansión de dosel, lo cual limitó a su vez la producción de biomasa y rendimiento final. Otra razón es el posible lavado de nutrientes, como sucedió en el estudio de Montoya (2013) en el cual al aplicar una mayor lámina de riego en el tratamiento de 120 %, no hubo un incremento en biomasa y rendimiento respecto al tratamiento de 100% de ET₀.

Cuadro 4-2. Resultados de la simulación con el modelo AquaCrop.

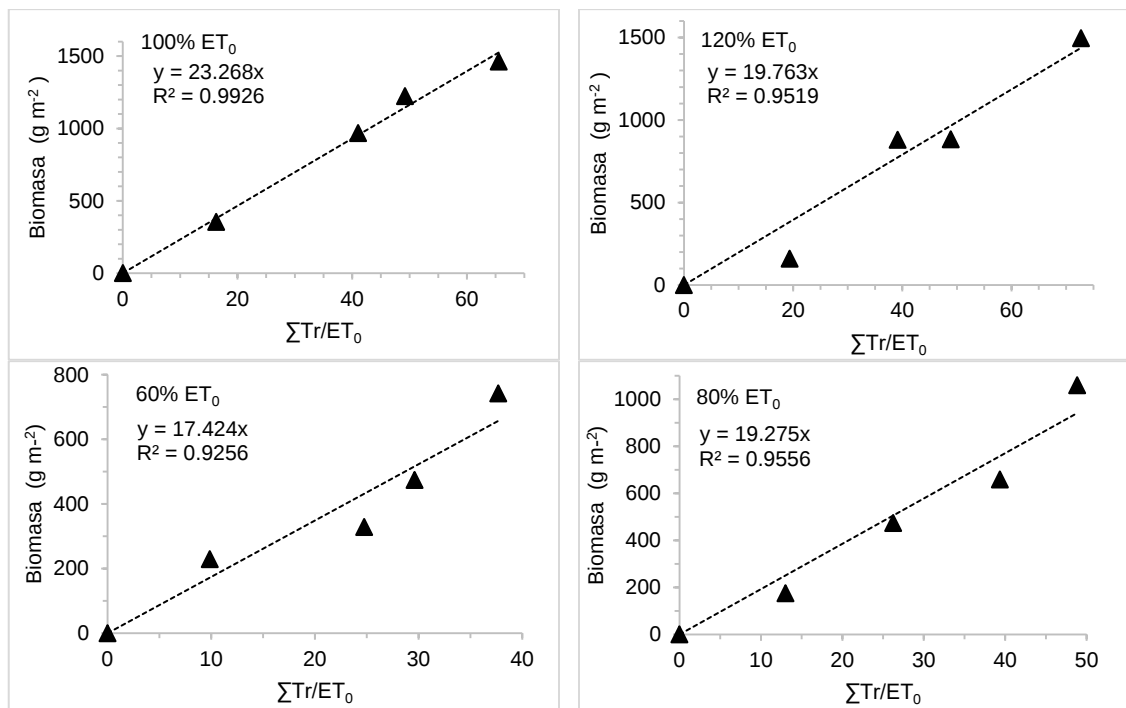
Parámetro	Tratamientos				
	Temporal	60% ET₀	80% ET₀	100% ET₀	120% ET₀
Biomasa (ton ha ⁻¹)	13.65	18.4	21.92	25.18	25.67
Rendimiento (ton ha ⁻¹)	5.13	7.55	8.99	13.09	13.35
Biomasa potencial	20.804	22.46	23.57	27.04	28.89
ET ₀ (mm)	507.5	508.9	508.9	545.2	549.6
WP (kg m ⁻³)	1.52	2.02	2.14	2.76	2.77
HI ajustado (%)	37.6	41.1	41	52	52
Lluvia (mm)	289.1	291.6	291.6	318.1	322.1
Evaporación, E (mm)	187	179.5	174.1	177.9	180.1
Transpiración, Tr (mm)	158.2	211.5	255.1	296.9	302.6
Estrés por temperatura Biomasa (%)	10	11	14	15	15

Estrés hídrico

Expansión de Dosel (%)	18	18	7	7	12
Cierre estomatal (%)	12	4			

Al implementar el riego complementario es posible alcanzar el potencial productivo para el híbrido utilizado en el experimento para la zona de Chapingo, Texcoco, estado de México al aplicar una lámina de 261 mm correspondiente al 100% de la Evapotranspiración de referencia. Sin embargo, si la finalidad es ahorrar agua, se debe aplicar una lámina de 66 mm de agua de riego y dependiendo de la disponibilidad se puede optar por aplicar un 80% de ET_0 .

La productividad del agua (WP^*) experimental se determinó a partir de regresión lineal por el origen entre las mediciones en campo de biomasa ($kg\ m^{-2}$) versus la transpiración acumulada normalizada por la evapotranspiración de referencia (Figura 4-5).



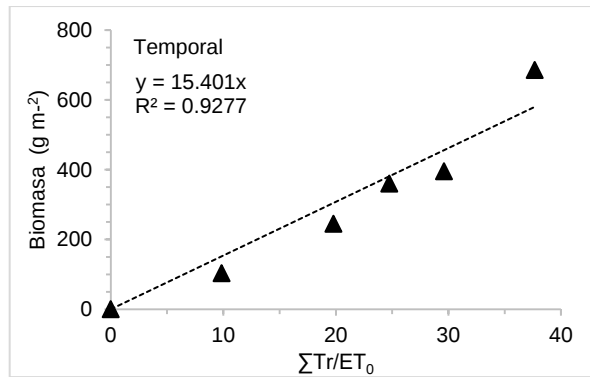


Figura 4-5. Determinación de la productividad del agua observada en los diferentes tratamientos.

Los valores del parámetro WP^* obtenidos experimentalmente se presentan en el Cuadro 4-3.

Cuadro 4-3. Valores obtenidos de productividad observada.

Tratamiento	WP^* observada (g m ⁻² mm ⁻¹)
Temporal	15.40
60% de ET_0	17.42
80% de ET_0	19.30
100% de ET_0	23.30
120% de ET_0	19.80

4.6 Conclusiones

Un mayor valor de productividad del agua (WP^*) indica una mayor producción con menos agua en la agricultura, por lo cual el resulta un indicador muy importante para el área de estudio, se obtuvo un valor de 23.30 g m⁻² mm⁻¹.

4.7 Literatura citada

- López L., R. (2008). Necesidades hídricas e índice de estrés hídrico en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). Tesis doctoral, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Montoya S., F. (2013). Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes tratamientos de riego con pívot en condiciones semiáridas. Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete.
- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adekalu, K. O. & Prasad, K. (2017). Modelling of response of the growth and yield of soybean to full and deficit irrigation by using aquacrop. *Irrigation and Drainage*, 66, 192–205.
- Alvarez, A., Morábito, J. A. & Schilardi, C. (2016). Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (*Zea mays*) en provincias del centro y noreste argentino FCA UNCUYO, 48(1), 161-177.
- Araya, A., Kisekka, I. & Holman, J. (2016). Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrig. Sci.*, 34, 465-481.
- Farahani, H. J., Izzi, G. & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal*, 101, 469–476.
- FIRA. (2016). Panorama Agroalimentario | Maíz 2016. Puede ser consultado en: www.gob.mx.
- González R., F., Herrera P., J., López S., T. & Cid L., G. (2010). Productividad del agua en el cultivo de Maíz en condiciones del sur de la Habana. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 2, 81-86.
- Guendouz, A., Hafsi, M., Moumeni, L., Khebbat, Z. & Achiri, A. (2014). Performance evaluation of AquaCrop model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semiarid conditions in Eastern Algeria. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3, 168-176.
- Greaves, G. E. & Wang, Y. (2016). Assessment of FAO AquaCrop Model for Simulating Maize Growth and Productivity under Deficit Irrigation in a Tropical Environment. *Water*, 8, 19.
- Jin, Z., Zuang, Q., Tan, Z., Dukes, J. S., Zheng, B. & Melillo, J. M. (2016). Do maize models capture the impacts of heat and drought stresses on yield? Using algorithm ensembles to identify successful approaches. *Global Change Biology*, 22, 3112-3126.
- Mhizha, T., Geerts, S., Vanuytrecht, E., Makarau, A. & Raes, D. (2014). Use of the FAO AquaCrop model in developing sowing guidelines for rainfed maize in Zimbabwe. *Water SA*, 40, 233-244.
- Salemi, H., Mohd S., M. A., Mousavi, S. F., Ganji, A., Shui L., T., Kamil Y., M. & Reza V., V. (2016). Irrigated Silage Maize Yield and Water Productivity

- Response to Deficit Irrigation in an Arid Region. Polish Journal of Environmental Studies, 20, 1295-1303.
- Steduto, P. & Albrizio, R. (2005). Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea II. Water efficiency and comparison with radiation use efficiency. Agricultural and Forest Meteorology, 130, 269-281.
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. C., Fereres, E. & Heng, L. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua: el modelo de simulación AquaCrop. Puede ser consultado en: www.fao.org/publications.
- Stricevic, R, Cosica, M., Djurovica, N, Pejic, B. & Maksimovic, L. (2011). Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower Agricultural. Water Management, 98, 1615– 1621.
- Vanuytrecht, E., Raes, D. & Willems, P. (2014). Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. Environmental Modelling & Software, 51, 323-332.

5 CONCLUSIONES GENERALES

El modelo AquaCrop es una herramienta que se puede utilizar para estimar rendimientos en la zona de trabajo, ya que el acuífero de Texcoco tiene un abatimiento anual considerable además de ser una zona con alto potencial productivo, hace indispensable utilizarlo para definir estrategias que permitan un uso racional del agua en la agricultura y en el cultivo de maíz.

El funcionamiento del modelo en la predicción del rendimiento resultó excelente, en general bueno para simular la biomasa y aceptable en la predicción de la cobertura vegetal, sin embargo, resultó ser insatisfactorio en la simulación de la productividad del agua normalizada, siendo este un parámetro importante a tomar en cuenta para definir estrategias de ahorro de agua y rotación de cultivos, donde las condiciones ambientales permiten tener dos ciclos de cultivo. Por lo anterior se recomienda realizar más investigaciones para mejorar el funcionamiento del modelo en la predicción de la biomasa y cobertura vegetal bajo condiciones de estrés hídrico, así como también se recomienda evaluar su funcionamiento con diferentes niveles de nutrición y para materiales de distinta duración de ciclos de vida.

La medición de la cobertura vegetal durante el desarrollo de este tipo de investigaciones es fundamental ya que es un parámetro de entrada muy importante del modelo, al estar relacionado con la transpiración productiva del cultivo y ser determinante en la predicción de la biomasa acumulada durante su formación. Una característica muy interesante del modelo es que interpreta efectos de estrés por temperatura y por estrés hídrico que no son reconocibles a simple vista, como la reducción en la expansión del dosel y cierre estomatal.

Las precipitaciones ocurridas durante la etapa vegetativa permitieron al cultivo alcanzar su máxima cobertura vegetal independientemente del riego aplicado debido a que en la etapa vegetativa el cultivo de maíz resulta ser tolerante al estrés hídrico.

La fenología del cultivo y la cobertura vegetal resultan ser parámetros muy importantes al simular el rendimiento de Maíz, así como también las condiciones ambientales presentes durante la realización de los experimentos y las simulaciones. Se recomienda además del seguimiento de: biomasa, área foliar y cobertura, realizar un estudio de fenología del cultivo, ya que la información de la fenología del híbrido que proveen las casas de semilla es incompleta y no se presenta en grados día desarrollo.

Si se quiere aumentar la productividad del cultivo y alcanzar un rendimiento superior con la condición de disponibilidad hídrica del 100% de la ET_0 , se recomienda utilizar un híbrido tardío (mayor ciclo de cultivo), así como también mejorar en lo posible el manejo que se le dio al cultivo, tomando en cuenta puntos más finos en el manejo de maíz de alto rendimiento.

Un trabajo de investigación muy importante será evaluar el funcionamiento del modelo AquaCrop en el cultivo de Maíz con diferentes láminas de riego y niveles de nutrición en sus etapas críticas. Así como también realizar un estudio para determinar lo más cercano a la realidad, la productividad del agua desde un enfoque económico en la producción de Maíz y compararlo con otros cultivos, para determinar su viabilidad económica y ambiental.