

ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO, BIOMASA Y COBERTURA VEGETAL DEL ESPÁRRAGO (*ASPARAGUS OFFICINALIS*) CON EL MODELO AQUACROP-OS

Gamaliel López Hernández^{1*}; Irineo L. López Cruz²

¹²Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

Correo electrónico: al22120276@chapingo.mx -teléfono: 4111484941(*Autor para correspondencia)

ilopez@correo.chapingo.mx

Resumen

El agua es uno de los factores más importantes para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. A nivel mundial, la agricultura de riego consume aproximadamente el 70% de los recursos de agua dulce disponibles. En este contexto, optimizar la gestión del riego es clave para mejorar la eficiencia en el uso del agua, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde el acceso al recurso es limitado. En el estado de Sonora, México, la agricultura intensiva de espárragos (*Asparagus officinalis* L.) representa un desafío debido a las grandes cantidades de agua necesarias, estudiar el cultivo mediante la modelación de cultivos es crucial para entender las dinámicas, mismas que nos permiten optimizar la producción del cultivo. El estudio en cuestión utilizó el modelo Aquacrop-OS para simular la cobertura del dosel del suelo (CC), la biomasa producida (B) y el rendimiento de turiones (Y) del espárrago durante los años 2019 y 2020. Aquacrop es un modelo desarrollado por la FAO para estimar el rendimiento de cultivos en función del uso del agua y otros factores climáticos y agronómicos. Los resultados mostraron que el modelo permite simular el comportamiento del cultivo obteniendo la curva CC. En cuanto al rendimiento de los turiones de espárrago, las simulaciones realizadas con Aquacrop predijeron valores de entre 12.83 y 13.15 t ha⁻¹, sin estrés por riego.

Palabras clave: Modelo de cultivo, Simulación, Evapotranspiración, Productividad del agua, Índice de cosecha

Introducción

A lo largo de los años, se han desarrollado modelos matemáticos para representar la dinámica del cultivo y el suelo, incorporando las relaciones causa-efecto entre las variables ambientales y los componentes de la planta y el suelo. Estos modelos incluyen ecuaciones de balance de masas, relaciones heurísticas y funciones estadísticas, tal como se describe en un estudio sobre la evolución histórica de dichos modelos (Huang et al., 2018; J. W. Jones et al., 2017).

Los conocimientos fisiológicos que aportan los distintos modelos de relaciones hídricas también pueden servir de guía para mejorar los sistemas de gestión (H. G. Jones & Tardieu, 1998). El modelo Aquacrop desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) está diseñado para equilibrar simplicidad, precisión y estabilidad. En comparación con otros modelos de cultivos, el modelo Aquacrop incluye los parámetros más intuitivos para simular el rendimiento de los cultivos en distintas condiciones de gestión (Feng et al., 2022).

Aquacrop es un modelo de simulación basado en un balance de agua que requiere un número relativamente bajo de parámetros y datos de entrada para simular la respuesta del rendimiento al agua de la mayoría de los principales cultivos de campo y hortalizas del mundo. Los parámetros son explícitos y, en su mayoría, intuitivos, y el modelo mantiene un equilibrio suficiente entre precisión, sencillez y solidez. Puede utilizarse como herramienta de planificación o para ayudar a tomar decisiones de gestión, ya sean estratégicas, tácticas u operativas. El modelo Aquacrop representa un esfuerzo por incorporar los conocimientos actuales sobre las respuestas fisiológicas de los cultivos a una herramienta capaz de predecir el rendimiento alcanzable de un cultivo en función del suministro de agua disponible (Steduto et al., 2008).

Aquacrop simula el CC del follaje verde del cultivo (no el índice de área foliar, LAI) desde la emergencia del cultivo hasta el desarrollo y la senescencia de la cubierta. El CC y la evapotranspiración de referencia (E_{To}) se utilizan entonces con el coeficiente de transpiración del cultivo para calcular la transpiración en condiciones de no estrés, y con el coeficiente de evaporación del suelo para calcular la evaporación del suelo (Heng et al., 2009).

Las características particulares que distinguen a Aquacrop de otros modelos de cultivo son su enfoque en el agua, el uso de CC en lugar de LAI y el uso de valores de WP normalizados para la demanda evaporativa atmosférica y la concentración de CO_2 que confieren al modelo una capacidad de extrapolación ampliada, a diversas ubicaciones, estaciones y clima, incluidos escenarios climáticos futuros (Steduto et al., 2009).

Raes et al. (2009) presenta los principales algoritmos utilizados en el software del modelo y describe el funcionamiento del modelo. Se distingue entre los requisitos de entrada y elementos básicos del modelo, los procedimientos de cálculo con las ecuaciones correspondientes y las salidas del modelo.

En este estudio, se pretende simular el comportamiento del cultivo de espárrago utilizando Aquacrop-OS, implementado en Matlab. La zona de estudio se encuentra en Caborca, Sonora, las condiciones áridas, se recopilaron datos climáticos siendo los más importantes la temperatura mínima y máxima, la precipitación, y la estimación de la Evapotranspiración de referencia, además se contempla la búsqueda de parámetros para el cultivo de espárrago.

Materiales y Métodos

Este estudio se realizó en la parcela "El Cachanilla" de 48.5 (ha) de espárrago, sobre el cultivar 'Atlas' plantado hace ocho años. Esta parcela se localiza geográficamente a 30°38 "N y 112°11 "O en Caborca Sonora, México. Se utilizó el modelo Aquacrop- OS (FAO) para simular el desarrollo de la cubierta vegetal (CC), la biomasa aérea (B) y el rendimiento de turiones (Y) del espárrago. Aquacrop es una herramienta utilizada por científicos e investigadores para el análisis, la conceptualización y la ayuda en la gestión del agua y la productividad en los cultivos. El modelo Aquacrop describe las interacciones entre la planta y el suelo como sistema primario. Simula la producción de cultivos en cuatro pasos: desarrollo del CC, transpiración del cultivo (T_r), B. Además, requiere relativamente pocos datos de entrada y genera resultados satisfactorios (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009a). Debido a esta característica, el modelo Aquacrop se ha utilizado en unos 46 cultivos, principalmente en cereales como el maíz, el trigo y el arroz, entre otros (Cruz-Bautista et al., 2023).

Datos de entrada

En la parcela de estudio se instaló una torre micro meteorológica equipada con sensores de radiación solar (R), temperatura del aire (T), humedad relativa (Rh), velocidad del viento (U_2) y precipitación (P).

A continuación, en las figuras 1 y 2 se muestran las temperaturas mínimas y máximas registradas en el año 2019 y 20120, respectivamente.

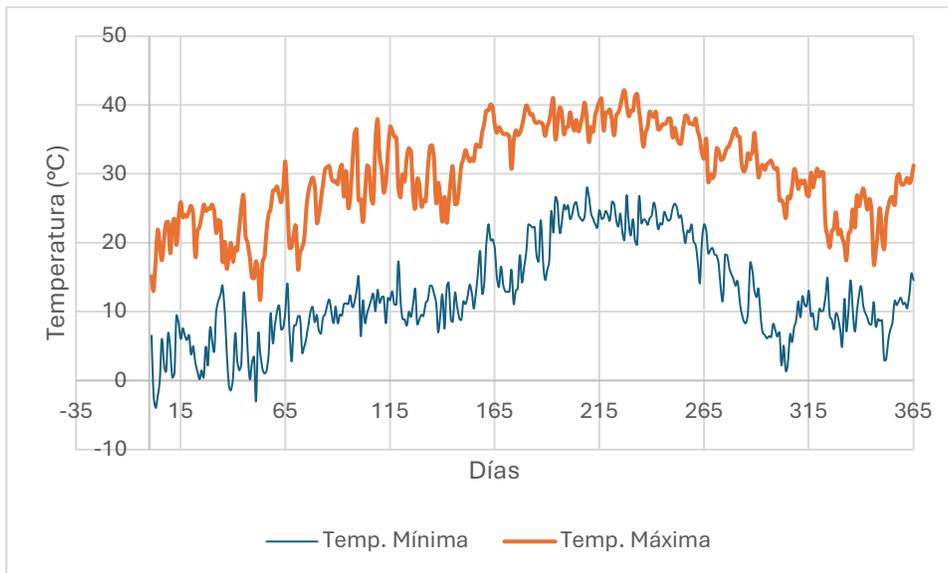


Figura 1. Temperaturas mínimas y máximas registradas en el año 2019.

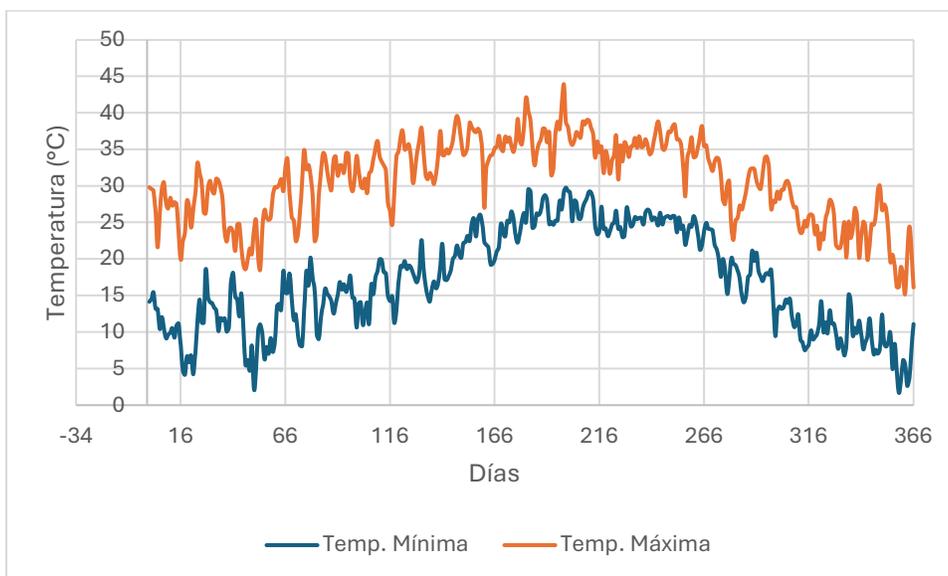


Figura 2. Temperaturas mínimas y máximas registradas en el año 2020.

La precipitación y la evapotranspiración de referencias son utilizadas como entradas en el modelo Aquacrop, en las figuras 3 y 4 se visualiza la precipitación, al igual que la evapotranspiración de referencia estimada mediante el método de Penman Monteith, mediante la ecuación 1:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

Donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia ($mm \text{ dia}^{-1}$); Δ es la pendiente de la función de presión de vapor a saturación ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); R_n es la radiación neta ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G es la densidad del flujo de calor en el suelo ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); γ es la constante psicométrica ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); T es a temperatura media del aire ($^\circ C$); U_2 es la velocidad del viento promedio (24 h), medida a 2 m sobre el nivel suelo ($m \text{ s}^{-1}$); e_a es la presión de vapor a saturación (kPa); y e_d es la presión de vapor actual (kPa) (Kişi, 2006).

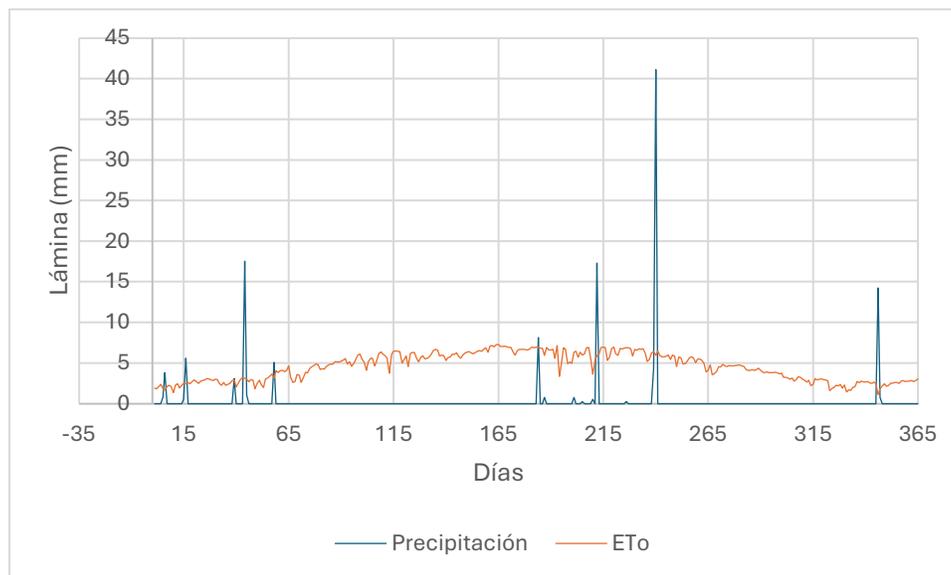


Figura 3. Precipitación y evapotranspiración registradas en el año 2019.

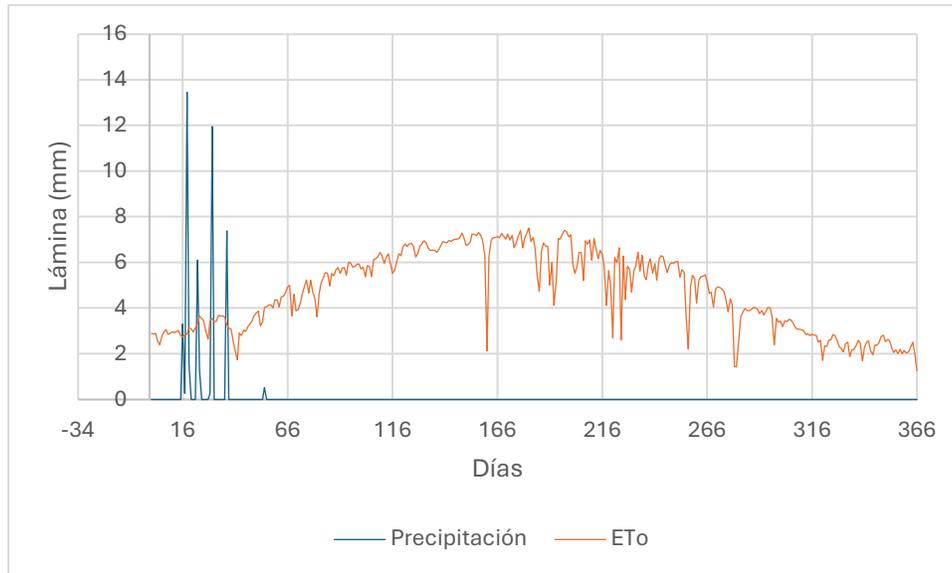


Figura 4. Precipitación y evapotranspiración registradas en el año 2020.

Parámetros

Los parámetros en el modelo Aquacrop son esenciales para simular con precisión el crecimiento y rendimiento de los cultivos bajo diferentes condiciones. Estos incluyen variables climáticas como la temperatura y la precipitación, características del suelo como la capacidad de retención de agua, y factores del cultivo como la eficiencia en el uso del agua y la respuesta al estrés hídrico. Además, las prácticas de manejo, como el riego y la fertilización, también se parametrizan para evaluar su impacto en el rendimiento. En conjunto, estos parámetros permiten ajustar las simulaciones para optimizar el uso del agua y mejorar la eficiencia agronómica. En el cuadro 1, se encuentran los valores nominales de los parámetros asociados con el cultivo de espárrago.

Cuadro 1. Parámetros conservativos y no conservativos implementados en el modelo Aquacrop.

N o.	CROP PARAMETERS	ID	Value	Min	Max
Conservative and Crop specific parameters					
Air temperature stress					
1	Base temperature (°C)	Tbase	11	8.8	13.2
2	Upper temperature (°C)	Tupper	40	32	48
3	Minimum growing degrees required for full crop transpiration (degC/day)	Gdmin	12	9.6	14.4
4	Maximum air temperature (degC) above which pollination begins to fail	MaxATempP BF	40	32	48
5	Maximum air temperature (degC) at which pollination completely fails	MaxATempP CF	45	36	54
6	Minimum air temperature (degC) below which pollination begins to fail	MinATempPB F	10	8	12
7	Minimum air temperature (degC) at which pollination completely fails	MinATempPC F	5	4	6

Soil water stress					
8	Soil water depletion for canopy expansion- Upper threshold (fraction of TAW)	SWDCupp	0.14	0.112	0.168
9	Soil water depletion for canopy expansion- Lower threshold (fraction of TAW)	SWDClow	0.72	0.576	0.864
10	Shape factor for water stress coefficient for canopy expansion	SFWSCexpa n	1	0.8	1.2
11	Soil water depletion for stomatal control - Upper threshold (fraction of TAW)	SWDSCupp	0.69	0.552	0.828
12	Shape factor for water stress coefficient for stomatal control	SFWSCSC	2.9	2.32	3.48
13	Soil water depletion for canopy senescence - Upper threshold (fraction of TAW)	SWDCSupp	0.14	0.112	0.168
14	Shape factor for water stress coefficient for canopy senescence	SFWSCCS	6	4.8	7.2
15	Upper soil water depletion threshold for water stress effects on canopy pollination	USWDPC	0.8	0.64	0.96
16	Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy stomatal control	LSWDSC	1	0.8	1.2
17	Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy senescence	LSWDSCS	1	0.8	1.2
18	Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy pollination	LSWDPC	1	0.8	1.2
19	Shape factor describing water stress effects on pollination	SFWSP	2.7	2.16	3.24
Development of Crop Canopy Cover					
20	Canopy growth coefficient (CGC) (increase of the fraction soil cover per growing degree)	CGCinc	0.03	0.024	0.036
21	Canopy decline coefficient (CDC) (decrease of the fraction soil cover per growing degree)	CGCdec	0.002	0.0016	0.0024
22	Soil surface covered by an individual seedling at 90 % emergence (cm ²)	SSCIS90	7.5	6	9
Crop transpiration and biomass production					
23	Crop coefficient when canopy is complete but prior to senescence	KcTrx	1.05	0.84	1.26
24	Decline of crop coefficient as a result of ageing, nitrogen deficiency, etc. (%/day)	Fage	0.3	0.24	0.36
25	Water Productivity normalized for ET _o and CO ₂ (gram/m ²)	WPNEtoCO ₂	15.7	12.56	18.84
Non-conservatives and/or cultivar specific parameters					
26	Minimum effective rooting depth (m)	MinEffRD	0.3	0.24	0.36
27	Maximum effective rooting depth (m)	MaxEffRD	1.2	0.96	1.44
28	Shape factor describing root zone expansion	SFRZExp	1.3	1.04	1.56
29	Maximum root water extraction in top quarter of root zone (m ³ water/m ³ soil.day)	MaxRWExtTo p	0.045	0.036	0.054
30	Maximum root water extraction in bottom quarter of root zone (m ³ water/m ³ soil.day)	MaxRWExtBo tt	0.011	0.0088	0.0132
31	Number of plants per hectare	NPH	40000	32000	48000
32	Maximum canopy cover (CCx) in fraction soil cover	MaxCCFSC	0.87	0.696	1.044
33	Reference harvest index	RHI	0.48	0.384	0.576
34	Coefficient describing positive impact on harvest index of restricted vegetative growth during yield formation	CDPIHI	7	5.6	8.4
35	Coefficient describing negative impact on harvest index of stomatal closure during yield formation	CDNIHI	3	2.4	3.6
36	Maximum allowable increase of harvest index above reference value	MaxAIHI	15	12	18
37	Excess of potential fruits	Excess PF	50	40	60
38	Minimum growing degree days (degC/day) required for full crop transpiration potential	MinGDDFCT P	12	9.6	14.4

Fuente:(Cruz-Bautista et al., 2023).

Aquacrop-OS

AquaCrop OS es una versión de código abierto del modelo AquaCrop desarrollado por la FAO, diseñado para simular el crecimiento y el rendimiento de los cultivos en función de la cantidad de agua disponible. Este modelo está enfocado en ayudar a mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura, lo cual es crucial en regiones con recursos hídricos limitados. AquaCrop OS toma en cuenta factores clave como el clima (precipitación, temperatura, evaporación), las características del suelo (capacidad de retención de agua, textura) y las prácticas de manejo agrícola (riego, fertilización). A diferencia de otros modelos más complejos, AquaCrop simplifica los cálculos al enfocarse en variables esenciales, facilitando su uso tanto para agricultores como para investigadores. Al ser de código abierto, AquaCrop OS permite a los usuarios modificar y personalizar el modelo según las condiciones específicas de su región o tipo de cultivo, lo que lo convierte en una herramienta flexible y adaptable para la planificación y gestión del riego, la simulación de escenarios de cambio climático y el diseño de estrategias de sostenibilidad agrícola (Foster et al., 2017).

Resultados y discusión

Aquacrop es un modelo de simulación desarrollado por la FAO que estima el rendimiento de cultivos como el espárrago, enfocándose en la eficiencia del uso del agua. Al ingresar datos sobre clima, suelo y manejo del cultivo, Aquacrop simula el crecimiento y predice el rendimiento, ayudando a optimizar el riego y a tomar decisiones informadas para mejorar la productividad agrícola, especialmente en áreas con recursos hídricos limitados. Para el ciclo 2019 la simulación arroja como resultado un rendimiento final de 13.15 t/ha y para el 2020 un rendimiento de 12.93 t/ha como se aprecia en la figura 5.

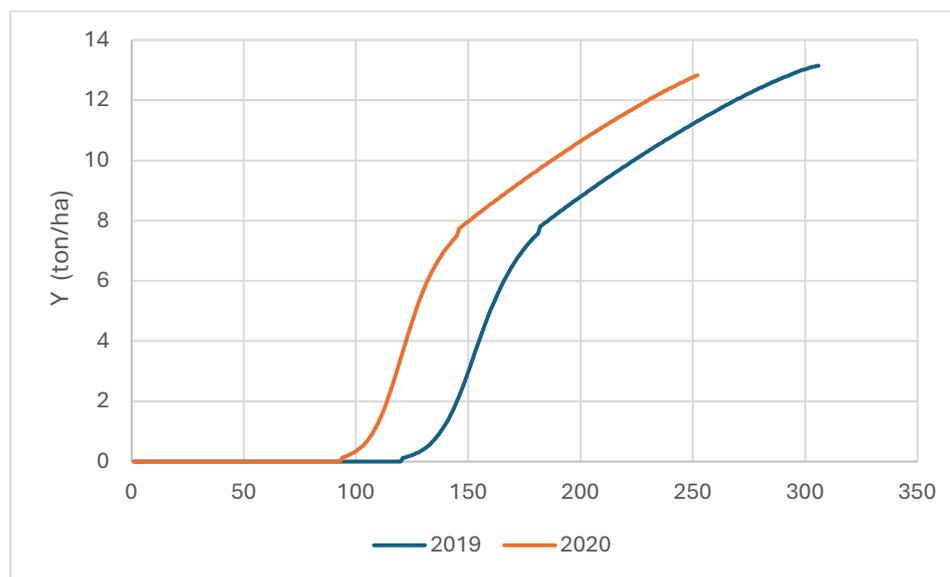


Figura 5. Rendimiento del espárrago en ambos ciclos 2019 y 2020.

Las temperaturas máximas y mínimas son fundamentales en el modelo Aquacrop porque influyen en los procesos fisiológicos del cultivo, como la fotosíntesis, respiración y transpiración. Las temperaturas mínimas bajas pueden ralentizar o detener el crecimiento del cultivo, mientras que las máximas elevadas pueden causar estrés térmico, afectando la eficiencia fotosintética y el desarrollo. Además, las temperaturas altas incrementan la evapotranspiración, lo que aumenta las necesidades hídricas del cultivo. Por lo tanto, la correcta parametrización de estos valores en Aquacrop es clave para estimar el rendimiento y el uso eficiente del agua.

La precipitación es un factor clave en el modelo Aquacrop, ya que determina la disponibilidad natural de agua para los cultivos, afectando directamente el balance hídrico y la necesidad de riego. El modelo utiliza la precipitación para estimar la cantidad de agua infiltrada en el suelo, el agua disponible para las plantas y el posible estrés hídrico si las lluvias son insuficientes. Además, la precipitación influye en la evapotranspiración, que es esencial para calcular la demanda hídrica del cultivo. Por lo tanto, una adecuada estimación de la precipitación es crucial para simular el crecimiento del cultivo y optimizar el uso del agua.

La cobertura vegetal es un indicador clave en Aquacrop-OS, ya que refleja la capacidad del cultivo para interceptar la luz solar y realizar la fotosíntesis, lo que a su vez influye en la biomasa y el rendimiento final. Al utilizar Aquacrop-OS, los agricultores y científicos pueden ajustar las prácticas de manejo para optimizar la cobertura vegetal del espárrago, mejorando así la eficiencia del uso del agua y la productividad del cultivo. Por ejemplo, el modelo puede simular diferentes escenarios de riego y fertilización para determinar las mejores estrategias que maximicen la cobertura vegetal y, por ende, el rendimiento del espárrago. En la figura 6, se muestran las gráficas de cobertura vegetal para el cultivo de espárrago.

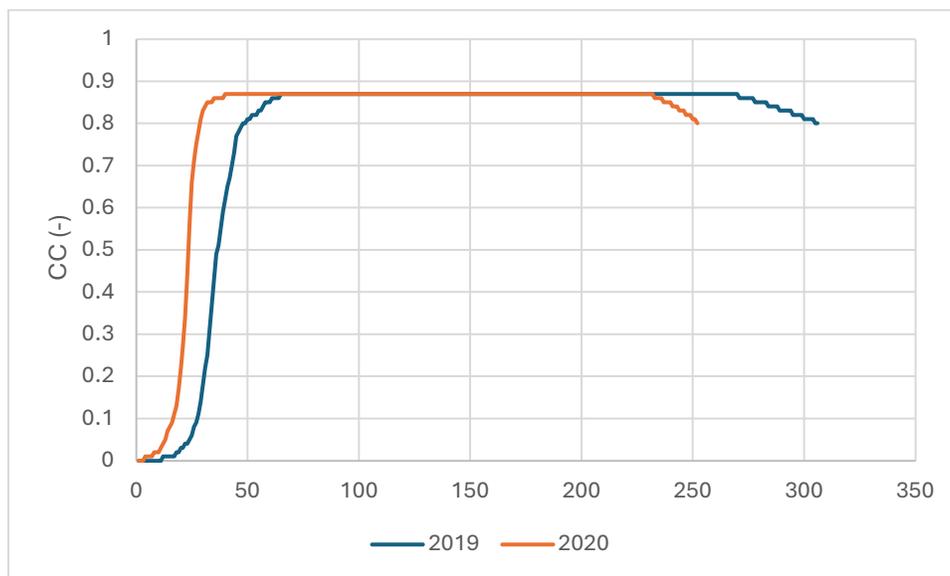


Figura 6. Cobertura vegetal (CC) del espárrago en ambos ciclos 2019 y 2020.

La simulación de la biomasa con Aquacrop-OS ofrece una herramienta valiosa para evaluar el crecimiento de los cultivos y su respuesta a las condiciones ambientales y de manejo. Al utilizar datos climáticos y características del suelo, el modelo puede predecir la acumulación de biomasa a lo largo del ciclo de crecimiento del cultivo. Estos resultados son fundamentales para comprender cómo las variaciones en el riego, la temperatura y otros factores afectan el desarrollo del dosel y la producción total de biomasa. La precisión de estas simulaciones permite a los agricultores ajustar las prácticas de manejo para maximizar la eficiencia del uso del agua y mejorar los rendimientos de los cultivos. La biomasa simulada en la simulación se muestra en la figura 7, obteniendo 27.40 t/ha en 2019 y 26.72 t/ha en 2020.

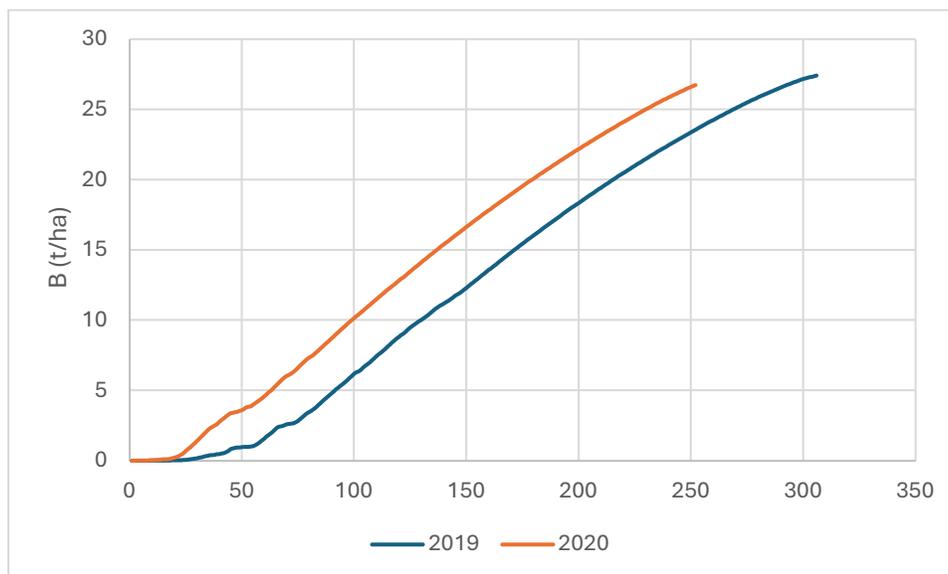


Figura 7. Biomasa del espárrago en ambos ciclos 2019 y 2020.

La evapotranspiración es un componente esencial en el modelo Aquacrop, ya que representa la combinación de la evaporación del agua desde el suelo y la transpiración de las plantas. Es crucial para estimar la demanda hídrica del cultivo y el balance de agua en el sistema. Aquacrop utiliza la evapotranspiración para calcular la cantidad de agua necesaria para mantener el crecimiento óptimo del cultivo y prevenir el estrés hídrico. Además, este valor permite ajustar el riego y evaluar la eficiencia del uso del agua, lo que es fundamental para simular el rendimiento de los cultivos bajo diferentes condiciones climáticas y de manejo.

Conclusiones

El modelo Aquacrop-OS demostró ser una herramienta eficaz para estimar con precisión la cobertura vegetal, la producción de biomasa y el rendimiento de los turiones de espárrago en condiciones áridas. Además, permite optimizar el uso del agua, reduciendo el riego necesario sin comprometer los rendimientos del cultivo, lo que puede ser una solución sostenible para la agricultura en regiones con limitaciones hídricas. En futuras investigaciones, se pretende implementar algoritmos de optimización para reducir la cantidad de riego, sin comprometer el rendimiento del cultivo.

Literatura citada

Cruz-Bautista, F., López-Cruz, I. L., Rodríguez, J. C., Ochoa-Meza, A., Ruíz-García, A., & Er-Raki, S. (2023). Irrigation optimization in green asparagus (*Asparagus officinalis* L.) using the AquaCrop model and evolutionary strategy algorithms.

Irrigation and Drainage, January, 1–15. <https://doi.org/10.1002/ird.2853>

Feng, D., Li, G., Wang, D., Wulaziebieke, M., Cai, M., Kang, J., Yuan, Z., & Xu, H. (2022). Evaluation of AquaCrop model performance under mulched drip irrigation for maize in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107372>

Foster, T., Brozović, N., Butler, A. P., Neale, C. M. U., Raes, D., Steduto, P., Fereres, E., & Hsiao, T. C. (2017). AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181, 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015>

Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water De fi cient Field Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>

Huang, J., Huang, H., Ma, H., Zhuo, W., Huang, R., Gao, X., Liu, J., Su, W., Li, L., Zhang, X., & Zhu, D. (2018). Review on data assimilation of remote sensing and crop growth models. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(21), 144–156. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.21.018>

Jones, H. G., & Tardieu, F. (1998). Modelling water relations of horticultural crops: A review. *Scientia Horticulturae*, 74(1–2), 21–46. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00081-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00081-8)

Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E., Janssen, S., Keating, B. A., Munoz-Carpena, R., Porter, C. H., Rosenzweig, C., & Wheeler, T. R. (2017). Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural Systems*, 155, 269–288. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.021>

Kişî, Ö. (2006). Generalized regression neural networks for evapotranspiration modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 51(6), 1092–1105. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.6.1092>

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>

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(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>

Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L., Izzi, G., & Hoogeveen, J. (2008). AquaCrop : A new model for crop prediction under water deficit conditions.



Options Méditerranéennes, 292(80), 285–292.