

# Maximización física y económica del agua de riego en la producción del cultivo del frijol

## *Physic and economy maximization of water irrigation on dry bean crop production*

M.Sc. Norge Tornés Olivera<sup>1</sup>, Dr.C. Oscar Brown Manrique<sup>II</sup>, M.Sc. Yarisbel Gómez Masjuan<sup>1</sup>,  
Ing. Arnaldo Manuel Guerrero Alega<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Granma (UDG), Departamento de Producción Agrícola, Bayamo. Granma, Cuba.

<sup>II</sup> Universidad de Ciego de Ávila “Máximo Gómez Báez” (UNICA), Ciego de Ávila, Cuba.

**RESUMEN.** La investigación se desarrolló entre los meses de noviembre de 2013 a marzo de 2014 con el objetivo maximizar los niveles físicos y económicos de uso de agua en la producción del frijol mediante la simulación de los rendimientos con el modelo AquaCrop. El área de la investigación pertenece a la UBPC Grito de Yara, la cual se encuentra ubicada a los 20° 25' de Latitud N y a los 76° 53' de Longitud O con una altura de 6 m.s.n.m. Se realizó un total de 7 riegos. Se sembró la variedad Delicia 360, el día 20 de diciembre con un marco de plantación de 0,5 x 0,8 m. Una vez calibrado el modelo AquaCrop, se simularon los rendimientos del cultivo de frijol bajo diferentes niveles de agua disponible para obtener la función de producción con la cual se realizó la maximización física y económica del agua. El volumen de agua que garantiza un máximo físico es de 2 244,37 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> para la obtención de rendimientos de 2 406,51 kg·ha<sup>-1</sup>. El volumen de agua que garantiza el máximo económico es de 2 438,06 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> con lo cual se garantiza una ganancia de 47 010.38 \$·ha<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** agua, simulación del rendimiento.

**ABSTRACT.** The research was developed among the months of November 2013 to March 2014 with the objective to maximize the physical and economic levels of use of water in the production of the bean by means of the simulation of the yields with the model AquaCrop. The area of the investigation belongs to the UBPC Grito de Yara, which is located at the 20° 25' N, 76° 53' W, with a height of 6 m over sea level. A total of 7 irrigations were carried out. The variety Delicia 360 was sowed on December 20th with a spacing of plantation of 0.5 x 0.8 m. Once gauged the model AquaCrop, were simulated the yields of the bean under different low levels of available water to obtain the production function with which was carried out the physical and economic maximization of the water. The volume of water that guarantees a physical maximum is of 2 244.37 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> for the obtaining of yields of 2 406.51 kg·ha<sup>-1</sup>. The volume of water that guarantees the economic maximum is of 2 438.06 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> with a gain of 47 010.38 \$·ha<sup>-1</sup>.

**Keywords:** water, simulation of the yield.

## INTRODUCCIÓN

Si bien es cierto que los sistemas de riego difieren en el nivel de eficiencia en el uso del agua, cada sistema tiene niveles óptimos al cual deberían operar dependiendo de las condiciones de clima, cultivo, suelo, manejo, etc. Dada la reducción de agua para la producción agrícola, la agricultura bajo riego necesita incrementar la productividad por unidad de agua consumida. Por esta razón, los esfuerzos deben dirigirse a encontrar el nivel óptimo de lámina de riego, independientemente del sistema que se utilice para maximizar la productividad del agua y no la productividad del cultivo como se ha realizado convencionalmente (García-Vila *et al.*, 2009; Ucar *et al.*, 2009).

La demanda mundial de alimentos aumenta año tras año debido principalmente al rápido crecimiento de la población humana; sin embargo, la disponibilidad de agua para regar cultivos y satisfacer esta creciente demanda presenta una reducción en su disponibilidad. Esta tendencia inversa (Nazeer y Ali, 2012), obliga a la búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes de sistemas de riego que utilicen menor cantidad de agua y que al mismo tiempo produzcan mejores rendimientos en la producción.

Dado que a nivel mundial existe una fuerte presión por reducir el consumo de agua para riego y la creciente demanda

mundial de alimentos, la producción agrícola bajo riego debe orientar sus esfuerzos de investigación a ser cada día más productivo en términos de rendimiento obtenido por unidad de agua utilizada en el proceso (Masanganise *et al.*, 2012; Inzunza-Ibarra, *et al.*, 2010). El objetivo de este trabajo es maximizar los niveles físicos y económicos de uso de agua en la producción del frijol mediante la simulación de los rendimientos con el modelo AquaCrop, es decir, determinar la cantidad de agua que deberían aplicar los productores para obtener bajo condiciones prevalecientes de mercado (precio promedio por tonelada de frijol y costo por metro cúbico de agua para riego) la ganancia máxima por concepto de uso del recurso agua. Al determinar dicho nivel, los productores estarían contribuyendo al uso sostenible del recurso agua, que día tras día es más escaso.

**MATERIALES Y METODOS**

La investigación se desarrolló entre los meses de noviembre de 2013 a marzo de 2014. El área de la investigación pertenece a la UBPC Grito de Yara, la cual se encuentra ubicada a los 20° 25' de Latitud N y a los 76° 53' de Longitud O, con una altura de 6 m.s.n.m. El área de investigación fue una parcela conformada por un total de 9 surcos de 100 m de largo y un ancho de 0,8 m. Se dividió la parcela en tres subparcelas de 33 m de longitud, se utilizaron los surcos centrales de cada subparcela para las mediciones del rendimiento tomándose un total de 150 plantas por parcelas. El caudal utilizado fue de 2 L·s<sup>-1</sup>. La entrega del caudal se garantizó con la utilización de espitas de PVC calibradas para el diámetro de 50 mm. Se realizó un total de 7 riegos. Se sembró la variedad Delicia 360, el día 20 de diciembre con un marco de plantación de 0,5 x 0,8 m. Una vez calibrado el modelo AquaCrop versión 4 (Raes *et al.*, 2012), se simularon los rendimientos del cultivo de frijol bajo diferentes niveles de agua disponible para obtener la función de producción. La opción utilizada fue la de “Requerimientos de Riego Neto” desde 0 hasta 100% del Agua Fácilmente Disponible (AFD) con variación del intervalo del 5% lo que generó un total de 20 pares de valores.

El método de optimización de la función de producción consiste en obtener la función de producción y la función de ganancia; a las cuales se les realiza la maximización física y económica. Para generar el análisis de regresión de la función de producción se usó el programa Statgraphics versión. 5.

La maximización física consiste en determinar la máxima producción física que es posible alcanzar a partir del volumen de agua aplicado. Se obtiene a partir de la primera derivada de la función de producción igualada a cero. La función de producción se puede ajustar a una función cuadrática del tipo polinomial de segundo orden.

Este se puede escribirse como:

$$P(V_a^F) = p_o + p_1(V_a^F) + p_2(V_a^F)^2 \tag{1}$$

donde:  $P(V_a^F)$  es la función de producción (kg·ha<sup>-1</sup>);  $P_o$ ,  $P_1$  y  $P_2$  el coeficientes del polinomio de segundo grado;  $(V_a^F)$  el volumen de agua óptimo que produce la maximización física de la función de producción m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>.

La primera derivada de la función de producción es la función ganancia que se escribe de la siguiente forma:

$$G(V_a^F) = \frac{\partial P_F}{\partial (V_a^F)} \tag{2}$$

Siendo:

$$P'(V_a^F) = p_1 + 2p_2(V_a^F) = 0 \tag{3}$$

Despejando el volumen de la ecuación anterior se obtiene:

$$V_a^F = \frac{-p_1}{2p_2} \tag{4}$$

Para la comprobación de si VaF es un máximo de la función de producción se determina la segunda derivada de la función de producción y se analiza si se produce un cambio de signo; lo cual indica que hay un cambio de pendiente y por consiguiente la existencia de un máximo.

$$P''(V_a^F) = 2p_2 \tag{5}$$

La maximización económica consiste en determinar el volumen de agua, con el cual el producto físico marginal P' (VaE) sea igual a la relación entre el precio del agua y el precio de venta del producto (Pa/Pv).

$$G(V_a^E) = P_v P'_F(V_a^E) - P_a V_a^E \tag{6}$$

Siendo:

$$N = \frac{Pn}{Vn'} \tag{7}$$

donde:

G (VaE) es la función ganancia (\$·ha-1); P' (VaE) la primera derivada de la función de producción evaluada para el volumen de agua económico (kg·ha-1); (VaE) el volumen de agua económico que produce la maximización económica de la función ganancia (m<sup>3</sup>·ha-1).

Se igualan las dos funciones de ganancia:

$$P_o = \frac{Sr}{Ht} = \frac{Sn \cdot Fsr}{Ht} \tag{8}$$

$$Fsr = P_s \cdot \left(\frac{Tp}{Tl}\right) + \frac{Tp}{Tl} \tag{9}$$

$$V_a^E = \frac{\frac{P_a}{P_v} - p_1}{2p_2} \tag{10}$$

Para la comprobación de si VaE es un máximo de la función de ganancia se determina si para diferentes volúmenes de agua superiores e inferiores al valor económico, la función de producción y la función de ganancia se comportan de forman ascendente o descendente alrededor del valor económico encontrado. Los valores del volumen de agua pueden ser el 70% y el 40% por debajo y por encima del económico obtenido.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción es un proceso que implica la transformación de factores en algún producto, siendo la función de producción (también llamada función respuesta) la relación o representación matemática entre el producto obtenido y los distintos factores que se emplean en su obtención (Troncclo y Javier, 2001). El modelo matemático obtenido es el siguiente:

$$P(V_a^F) = 1800,984 + 0,49545(V_a^F) - 0,00010135(V_a^F)^2$$

Mateos *et al.* (1997), consideran que la optimización de los riegos requiere el conocimiento de las funciones de producción pertinentes al consumo de agua, relacionando el rendimiento con alguna medida del uso del agua. El modelo cuadrático también ha sido reportado por (Efetha *et al.*, 2011; Freaitas *et al.*, 2003; López *et al.*, 2006) como la función que mejor describe la respuesta del rendimiento del cultivo del frijol a la aplicación del agua. Los resultados de otros autores como González *et al.* (2013) difieren de los aquí obtenidos al encontrar que el mejor ajuste entre el rendimiento y el agua aplicada como riego responden a funciones de tipo lineal para el cultivo frijol.

La función de ganancias se determinó utilizando un precio de venta del frijol de 19.56 \$·kg<sup>-1</sup> y un precio para el agua de 0.025 \$·m<sup>-3</sup>. La función resultante es la siguiente:

$$G(V_a^E) = 19,56P(V_a^E) - 0,025V_a^E$$

La maximización física se obtuvo a partir del siguiente análisis:

$$V_a^F = 2444,37 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$$

$$P(2444,37) = 2406,51 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$$

El resultado de la maximización física de la producción indica que la función de producción alcanza su máximo de 2 406,51 kg·ha<sup>-1</sup> de frijol a un nivel de insumo de 2 444,37 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> (244,43 mm) aplicados según el requerimiento de la planta, situación que cuando ocurren lluvias en condiciones de campo no se puede controlar, además de producir efectos favorables o desfavorable dependiendo la intensidad y momento en que ocurran, por ejemplo, después de un riego se puede producir un exceso de humedad lo cual perjudicaría el cultivo. Con

estos resultados la productividad del agua sería de 0,98 kg·m<sup>-3</sup>.

López *et al.* (2006), encontraron que la maximización de la productividad del frijol es de 0,92 kg·m<sup>-3</sup> la cual se alcanzó con un volumen de 300 mm.

Para probar que se trata de un máximo y no un mínimo se utilizó la prueba de la segunda derivada, que proporcionó los resultados siguientes:

$$P''(V_a^F) = -0,0002027 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$$

Dado que P''(V\_a^F) es menor que 0, entonces P''(V\_a^F) tiene un valor máximo.

Una vez determinada la función de ganancias, la maximización económica se realizó determinando el nivel de uso de insumo en el cual el producto físico marginal sea igual a la relación de precios.

$$P'(V_a^E) = 0,49545 - 0,0002027(V_a^E) = \frac{0,0025}{19,56} = 0$$

$$V_a^E = 2438,06 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$$

El resultado anterior indica que el máximo económico se alcanza al utilizar un nivel de 2 438,06 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> (243,80 mm). Con este nivel de insumo aplicado mediante riego, la ganancia a obtener sería de:

$$P(2438,06) = 1800,984 + 0,49545(2438,06) - 0,00010135(2438,06)^2$$

$$P(V_a^E) = 2406,50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$$

$$G(V_a^E) = 19,56(2406,50) - 0,025(2438,06)$$

$$G(V_a^E) = 47010,38 \text{ \$} \cdot \text{ha}^{-1}$$

El resultado anterior indica que la ganancia máxima a obtener por concepto de la producción y venta del frijol sería de 47 010,38 \$·ha<sup>-1</sup> asumiendo que el total de agua es aplicada como riego; sin embargo, la precipitación pluvial no se contabiliza como costo, por esta razón a medida que menos cantidad de agua se necesite regar, mayor serán las ganancias. Hay que tener en cuenta que en la producción de frijol no solo se incurre en costo de agua, por lo tanto las ganancias reales serán menores.

La decisión de hasta cuánta agua aplicar para el riego del cultivo para diseñar u operar un sistema de riego, tomando como criterio la máxima productividad del agua o el máximo rendimiento del cultivo, puede depender de varios factores, si el agua es un recurso escaso, desde el punto de vista físico o desde el punto de vista económico (alto costo de extracción por ejemplo), es recomendable considerar su empleo para lograr una mayor productividad y poder maximizar el retorno por unidad de agua y no por unidad de superficie. El beneficio económico obtenido por la cosecha y el costo del sistema de riego, también pasa a ser un índice determinante en esta decisión (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005; Figueredo *et al.*, 2008; Nleya *et al.*, 2001).

En la Tabla 1 se presenta la comprobación del máximo global mediante la variación del volumen. Puede observarse que con la variación de los valores del volumen de agua de un 70% y 40% por debajo y por encima del económico obtenido, la producción y en consecuencia la ganancia sigue siendo menor, lo que demuestra que se trata del máximo económico global y no parcial.

**TABLA 1. Comprobación del máximo global mediante variación del volumen**

Volumen evaluado		Función de producción		Función de ganancia	
V (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	1706,64	P <sub>1</sub>	2351,36	G (\$·ha <sup>-1</sup> )	45949.90
V (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	2438,06	P <sub>2</sub>	2406,51	G (\$·ha <sup>-1</sup> )	47010.38
V (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	3413,29	P <sub>3</sub>	2311,37	G (\$·ha <sup>-1</sup> )	45125.08

## CONCLUSIONES

- El volumen de agua que garantiza un máximo físico es de 2 444,7 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> con lo cual se obtienen rendimientos de 2 406,51kg·ha<sup>-1</sup>.
- El volumen de agua que garantiza el máximo económico es de 2 438,06 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> con lo cual se garantiza una ganancia de 47 010.38 \$·ha<sup>-1</sup>.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EFETHA, A., T. HARMS. y M. BANDARA: "Irrigation management practices for maximizing seed yield and water use efficiency of Othello dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Southern Alberta, Canada", *Irrigation Science*, ISSN: 0342-7188, 29:103-113, 2011.
- FIGUEREDO, S. F., E. J. POZZEBON., J. A. FRIZZONE, J. A. AZEVEDO., A. F GUERRA. y E. M. SILVA: "Gerenciamento da irrigação do feijoeiro baseado em critérios técnicos e econômicos no cerrado", *Irriga*, ISSN: 1808-3765, 13(): 378-391, 2008.
- FREITAS, P. S., L. REZENDE, R. MANTOVANI e C. EVERARDC: "Viabilidade de insercao dos efeitos da uniformidade de irrigacao em modelos de crescimento de culturéis", *Rev.Bras. Eng. Agríc. Ambient.*, ISSN:1807-1929, 7(3): 437-444, 2003.
- GARCÍA-VILA, M., E. FERERES, L. MATEOS, F. ORGAR & P. STEDUTO: "Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop", *Agronomy Journal*, ISSN: 1435-0645, 101: 477-487, 2009.
- GONZÁLEZ, F. R., J. HERRERA., T. LÓPEZ. y G. CID.: "Funciones agua rendimiento para 14 cultivos agrícolas en condiciones del sur de La Habana", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 22(3): 2013.
- INZUNZA-IBARRA, M. A., E. A. CATALÁN-VALENCIA, I. SÁNCHEZ-COHEN, M. VILLA-CASTORENA y A. ROMÁN-LÓPEZ: "Modelo de Producción de Trigo Bajo Déficit Hídrico en Dos Periodos de Crecimiento", *Terra Latinoamericana*, E-ISSN: 2395-8030, 28: 335-344, 2010.
- LÓPEZ, A. R., M. A. IZUNZA, E. A. CATALÁN y S. MODOZA.: "Función de producción del frijol mediante la línea fuente de aspersión", *Agrofaz*, ISSN: 1665-8892, 6(1):30-35, 2006.
- MARTÍN DE SANTA OLALLA, M. F., F. LÓPEZ. y A. CALERA.: *Modelos para evaluación del uso y la productividad del agua de riego*, pp. 487-519, En: Agua y Agronomía. Capítulo XIII. Ediciones Mundi Prensa, ISBN: 84-84-76-246-7, Madrid, España, 2005.
- MASANGANISE, B., T. C. MHIZHA. & E. MASHONJOWA.: "Model Prediction of Maize Yield Responses to Climate Change in North-Eastern Zimbabwe", *African Crop Science Journal*, ISSN: 1021-9730, 20(2): 505-515, 2012.
- MATEOS, L., E. C. MANTOVANI & F. J. VILLALOBOS: "Cotton response to non-uniformity of conventional sprinkler irrigation", *Irrigation Science*, ISSN: 0342-7188, 17:47-52, 1997.
- NAZEER, M. y H. ALI: "Modeling the response of onion crop to deficit irrigation", *Journal of Agricultural Technology*, ISSN: 1686-914, 8(1): 393-402, 12012.
- NLEYA, T. M., A. E. SLINKARD., A. VANDENBERG: "Differential performance of pinto bean under varying levels of soil water", *Can J Plant Sci.*, ISSN: 1665-8892, 81:233-239, 2001.
- RAES, D., STEDUTO, P., T. C. HSIAO & E. FERERES: "AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description", *Agronomy Journal*, ISSN: 1435-0645, 101: 438-477, 2012.
- TRONCCLSO, C. y L. JAVIER: "Estimación de la función de producción del viñedo chileno de riego", *Agricultura Técnica*, ISSN: 0365-2807, 61(1): 70-81, 2001.
- UCAR, Y., A. KADAYIFCI., H. İ. YILMAZI, G. İ. TUYLU. & N. YARDIMCI.: "The effect of deficit irrigation on the grain yield of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in semiarid regions", *Spanish Journal of Agricultural Research*, ISSN: 1695-971-X, 7(2): 474-485, 2009.

**Recibido:** 25/02/ 2015.

**Aprobado:** 14/03/2016.

**Publicado:** 19/04/2016.

Norge Tornés Olivera, Jefe de Departamento de Producción Agrícola, Universidad de Granma (UDG), Bayamo. Granma, Cuba. Correo electrónico: [ntorne-so@udg.co.cu](mailto:ntorne-so@udg.co.cu)

Oscar Brown Manrique, Correo electrónico: [obrown@unica.cu](mailto:obrown@unica.cu)

Yarisbel Gómez Masjuan, Correo electrónico: [yarisbet@udg.co.cu](mailto:yarisbet@udg.co.cu)

Arnaldo Manuel Guerrero Alega, Correo electrónico: [arnaldo@udg.co.cu](mailto:arnaldo@udg.co.cu)