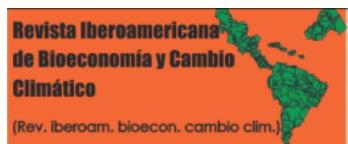


Uso de las Funciones Agua-Rendimiento y la productividad agronómica del agua en la planificación del agua en cultivos de importancia agrícola en Cuba



Use of Water-Yield Functions and agronomic productivity of water in water planning in crops of agricultural importance in Cuba

González Robaina, Felicita; Herrera Puebla, Julián; López Sejas, Teresa; Cid Lazo, Greco; Dios-Palomares, Rafaela; Hernández Rueda, Mauricio; Salazar Antón, Wilber; Romero Soza, Andrea; Editor Académico Prof. Dr. Carlos A. Zuniga González

Felicita González Robaina

dptoambiente4@iagric.cu

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), La Habana. Cuba. , Cuba

Julián Herrera Puebla

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), La Habana. Cuba., Cuba

Teresa López Sejas

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), La Habana. Cuba. , Cuba

Greco Cid Lazo

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), La Habana. Cuba., Cuba

 **Rafaela Dios-Palomares**

rdios@uco.es

Universidad de Córdoba España, Spain

 **Mauricio Hernández Rueda**

mhernandez@ct.unanleon.edu.ni

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León. Centro de investigación en ciencias agrarias y economía aplicada, Nicaragua

 **Wilber Salazar Antón**

wsalazar@ct.unanleon.edu.ni

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León, Nicaragua

Andrea Romero Soza

andera.rivera@unah.edu.hn

CURLA UNAH, Honduras

Editor Académico Prof. Dr. Carlos A. Zuniga

González

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León, Nicaragua

Resumen: Los cambios medioambientales globales hacen pensar en un aumento futuro de la aridez, por ello es necesario buscar alternativas que permitan un uso más eficiente del agua y reducir su consumo, teniendo en cuenta que es un recurso limitado. En la actualidad, aproximadamente el 59,7% del total de agua planificada para todos los usos en Cuba se utiliza en la agricultura, pero no más del 50% de esa agua se convierte directamente en productos agrícolas. El estudio de las funciones agua-rendimiento y su uso dentro de la planificación del agua para riego es una vía importante para trazar estrategias de manejo que contribuyan al incremento en la producción agrícola. Utilizando los datos de agua aplicada por riego y los rendimientos obtenidos en más de 100 experimentos de campo realizados fundamentalmente en suelo Ferralítico Rojo de la zona sur de La Habana y con ayuda de herramientas de análisis de regresión en este trabajo se estiman las funciones agua aplicada-rendimientos para algunos cultivos agrícolas y se analizan las posibles estrategias de optimización del riego a seguir en función de la disponibilidad de agua. Seleccionar una estrategia de máxima eficiencia del riego puede conducir a reducciones de agua a aplicar entre un 21,6 y 46,8%, incrementos de la productividad del agua entre 17 y 32% y de la relación beneficios/costo estimada de hasta un 3,4%. Lo anterior indica la importancia desde el punto de vista económico que puede llegar a alcanzar el uso de esta estrategia en condiciones de déficit hídrico. El conocimiento de las funciones agua aplicada por riego-rendimiento y el uso de la productividad del agua, resultan parámetros factibles de introducir como indicadores de eficiencia en el planeamiento del uso del agua en la agricultura, con lo cual es posible reducir los volúmenes de agua a aplicar y elevar la relación beneficio-costo actual.

Palabras clave: rendimiento, riego, eficiencia.

Abstract: Global environmental changes suggest a future increase in aridity, so it is necessary to look for alternatives that allow a more efficient use of water and reduce its consumption, taking into account that it is a limited resource. Currently, approximately 59.7% of the total planned water for all uses in

Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León, Nicaragua

ISSN-e: 2410-7980

Periodicidad: Semestral

vol. 1, núm. 1, 2015

czuniga@ct.unanleon.edu.ni

Recepción: 10 Septiembre 2014

Aprobación: 10 Diciembre 2014

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/394/3941748010/>

DOI: <https://doi.org/10.5377/ribcc.v1i1.2144>

Autor de correspondencia: dptoambiente4@iagric.cu

Cuba is used in agriculture, but no more than 50% of that water is converted directly into agricultural products. The study of the water-yield functions and their use within the planning of water for irrigation is an important way to draw management strategies that contribute to the increase in agricultural production. Using the data of water applied by irrigation and the yields obtained in more than 100 field experiments carried out fundamentally in Red Ferralic soil of the southern zone of Havana and with the help of regression analysis tools in this work, the applied water functions are estimated. yields for some agricultural crops and possible irrigation optimization strategies to be followed based on water availability are analyzed. Selecting a strategy of maximum irrigation efficiency can lead to reductions in water to be applied between 21.6 and 46.8%, increases in water productivity between 17 and 32% and in the estimated benefit/cost ratio of up to 3.4%. The foregoing indicates the importance from the economic point of view that the use of this strategy can reach in conditions of water deficit. The knowledge of the water functions applied by irrigation-yield and the use of water productivity, are feasible parameters to introduce as indicators of efficiency in the planning of water use in agriculture, with which it is possible to reduce water volumes. to apply and raise the current benefit-cost ratio.

Keywords: performance, irrigation, efficiency.

INTRODUCCIÓN

Los cambios medioambientales globales hacen pensar en un aumento futuro de la aridez, por ello es necesario buscar alternativas que permitan un uso más eficiente del agua y reducir su consumo, teniendo en cuenta que es un recurso limitado.

Los recursos hidráulicos potenciales del archipiélago cubano según García (2006) se evalúan en un total de 38,1 km³, de ellos 6,4 subterráneos y 31,7 superficiales. Mientras que los recursos aprovechables se evalúan alrededor de 24 km³, correspondiendo el 75% a las aguas superficiales y el 25% a las subterráneas y la estructura del uso de las aguas se corresponde con un país que depende de su actividad agropecuaria. Aproximadamente el 59,7% del total de agua planificada para todos los usos en Cuba se utiliza en la agricultura, pero no más del 50% de esa agua se convierte directamente en productos agrícolas.

En semejante contexto dinámico, la agricultura estará obligada a cambiar sus sistemas de producción, donde el agua se debe considerar como un recurso limitado, un factor de producción y un importante input económico. Al hacer esto, la agricultura deberá competir por la escasa agua disponible con otros usuarios y al mismo tiempo reducir la presión sobre el ambiente (FAO, 2011).

Bajo estas condiciones y ante la necesidad de un uso más eficiente de este insumo en un horizonte futuro de escasez del mismo, se hace imprescindible contar con índices de consumo del agua utilizada para el riego de los cultivos con vistas a su adecuada planificación y control.

El mundo se enfrenta a un nuevo reto de producir mas alimento con menos agua. Una de las estrategias mas importantes en este sentido es el incremento de la productividad del agua en la agricultura a través del

NOTAS DE AUTOR

dptoambiente4@iagric.cu

estudio de las funciones agua rendimiento (Santa Olalla y Valero, 1993; Molden et. al, 2003; Dehghanianj et. al., 2009)

Para abordar problemas de manejo y planeamiento de agua en explotaciones agrícolas, la información de partida necesaria es el conocimiento de los consumos de agua de cada cultivo y su respuesta productiva al riego, lo que obliga a recurrir a las funciones que relacionan la producción con el agua consumida o aplicada (Patel y Rajput, 2007; Billib et al., 2009; Kiani y Abbasi, 2012). Pocos autores en Cuba han abordado el estudio de la función agua-rendimiento con el propósito de la planificación y operación del riego, entre ellos se pueden señalar los trabajos de Vigoa (1980), Martínez- Aparicio y Martínez (1986), Vigoa y León (1987), Nieblas (1990) y Luis y Cabrera (1994), quienes coinciden al afirmar que a partir de estas curvas pueden elaborarse reglas, con criterios técnicos económicos, para la distribución del agua disponible entre un grupo de cultivos en condiciones de déficit hídrico.

En este sentido Vigoa (1980), basado en el comportamiento estadístico de diferentes experiencias de riego realizadas en Cuba, bajo distintas condiciones de suelo y clima, propone la función agua- rendimiento como un método idóneo para pronosticar los rendimientos que se deben esperar de la caña de azúcar a partir de la aplicación del regadío, mientras que Vigoa y León (1987), puntualizan la importancia de conocer los incrementos de rendimiento esperados con el uso del riego; datos estos brindados por la curva agua-rendimiento y que son imprescindible para poder valorar económica un sistema de riego y comparar alternativas.

El estudio de las funciones agua-rendimiento y su uso dentro de la planificación del agua para riego es una vía importante para trazar estrategias de manejo que contribuyan al incremento en la producción agrícola. Utilizando los datos de agua aplicada por riego y los rendimientos obtenidos en más de 100 experimentos de campo realizados fundamentalmente en suelo Ferralítico Rojo de la zona sur de La Habana y con ayuda de herramientas de análisis de regresión en este trabajo se estiman las funciones agua aplicada-rendimientos y la productividad agronómica del agua para algunos cultivos agrícolas y se analizan las posibles estrategias de optimización del riego a seguir en función de la disponibilidad de agua (de Sata Olalla 2004).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la información sobre agua aplicada por riego y los rendimientos de los cultivos obtenida en más de 100 experimentos de campo disponibles en la base de datos sobre necesidades hídricas del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (González et al., 2012), y realizados en suelo Ferralítico Rojo de la zona sur de La Habana. Esta zona forma parte de la llanura cárstica Habana- Matanzas, muy plana, con una altura inferior a 30 metros del nivel del mar y donde la agricultura es la actividad económica fundamental, siendo las viandas, hortalizas y granos los principales cultivos.

A través del análisis de regresión se determinaron las posibles relaciones entre los valores de rendimiento (R) y el agua aplicada por riego (I). En todos los casos analizados se tuvo en cuenta, para la selección del modelo de mejor ajuste, la significación de los coeficientes de regresión estimados (95% de confiabilidad), los coeficientes de determinación (R^2), la desviación estándar de los errores (S), así como el comportamiento de los residuos (ei). El coeficiente R^2 describe la proporción de la varianza que es explicada por el modelo y varía entre 0 y 1, indicando mejores ajustes cuanto más próximo a 1 sea su valor, mientras S muestra el grado de dispersión de los valores observados sobre la línea de regresión estimada.

Para el cálculo de la productividad agronómica del agua aplicada (WPI) de los cultivos estudiados, en este trabajo, el numerador se expresó en términos de rendimiento del cultivo (kg) y en el denominador se usó el agua utilizada por riego (m^3), ambos referidos a una hectárea, según muestra la siguiente ecuación 1 (Molden et al., 2003):

$$WPI_{(kg\text{m}^{-3})} = \frac{R_{(kg)}}{I_{(m^3)}} \quad [1]$$

Donde: WPI - productividad agronómica del agua utilizada por riego (I)

Estrategias para la aplicación de los resultados

La optimización del riego puede hacerse con criterios muy diferentes. Cada situación es un caso especial, aunque cabe destacar la existencia de cuatro posibles estrategias: maximizar la producción por unidad de superficie, maximizar la producción por unidad de agua aplicada por riego, maximizar el beneficio económico de la explotación agrícola, y ahorrar o minimizar las necesidades energéticas (Martín de Santa Olalla y Valero, 1993).

A partir de las funciones cuadráticas obtenidas entre el agua aplicada por riego y el rendimiento para los diferentes cultivos en este documento ($R = fI^2 + gI + h$), se presenta un análisis de dos de las posibles estrategias anteriormente mencionadas (Tabla 1), considerando un sistema de riego por aspersión semiestacionario con una eficiencia de aplicación del 85%.

TABLA 1.
Posibles estrategias a seguir en función de la disponibilidad de agua.

Estrategia	Descripción	Observación
1	Maximizar la producción por unidad de superficie.	Cuando el agua no está limitada y los costos del riego son bajos, se justifica desde el punto de vista económico buscar el óptimo agronómico
2	Maximizar la producción por unidad de agua aplicada por riego.	En condiciones de déficit hídrico o cuando los costos del riego aumentan, la estrategia a seguir es lograr la máxima eficiencia del riego.

Se determinó la ecuación de costo propuesta por Kiani y Abbasi (2012) como la función lineal que describe el incremento del costo total con el aumento de la cantidad de agua aplicada por riego. La zona de ganancias comprende el área entre esta función lineal y la función agua-rendimiento, mientras que los extremos describen las zonas de pérdidas ver ecuación 2.

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P_c h - b_0}{P_c f}} \quad (2)$$

Donde: C -costo total de producción por hectárea ($\$/\text{ha}^{-1}$), I -agua aplicada (mm), b_0 y b_1 coeficientes de regresión.

Se calcularon los valores óptimos igualando a cero la primera derivada de las funciones cuadráticas obtenidas ($I_{\text{óptimo}} = -g/2f$) y se compararon los valores de agua aplicada, rendimiento y productividad del agua

para las dos estrategias propuestas, los cuales representados por sus valores de costo y beneficio, permitirán además compararlos económicoamente.

Para el cálculo del valor máximo de agua aplicada por riego (I_{max}) en la estrategia dos se utilizó la fórmula propuesta por Kiani y Abbasi (2012) que involucra a las dos funciones antes mencionadas:

Donde: P_c - precio del cultivo por toneladas (\$ t.₁); b_o , h , f - coeficientes de regresión.

Para la determinación de los ingresos brutos, se multiplicaron los rendimientos alcanzados en cada uno de los cultivos (t ha.₁), por los precios unitarios de los productos obtenidos (\$ t.₁), según resolución 298 del Ministerio de Finanzas y Precios (MFP, 2012). Los costos totales por riego se obtuvieron a partir del precio vigente del agua (0,18 \$ m.₃), considerando además el salario devengado por los regadORES (5,53 \$ hora.₁) y el costo de bombeo (4,56 \$ hora.₁). Para el cálculo de los costos variables se utilizó la ficha de costo de los cultivos vigente y emitida por la Dirección de Precios del MInisterio de la Agricultura de Cuba (MINAG, 2012).

RESULTADOS

La función agua-rendimiento cuando el agua es expresada como riego o riego más lluvia toma formas diferentes según el tipo de cultivo y la cantidad en que esta agua aplicada sea capaz de satisfacer plenamente las necesidades de consumo o sobrepasarlas.

De este modo en la Tabla 2 se muestran respuestas de tipo lineal para los cultivos frijol, sorgo, ajo, cebolla, boniato, malanga y piña, mientras que para los cultivos maíz, soya, pimiento, tomate, papa, plátano y banano la relación entre el agua aplicada como riego y rendimiento se explicó mejor a través de funciones cuadráticas.

TABLA 2.

Rangos de agua aplicada, modelos agua aplicada por riego (I)-rendimiento, coeficiente de determinación (R^2), desviación estándar de los errores (S) para los cultivos estudiados.

Cultivo	I (mm)	R = c I + e	R ²	S
Frijol	33-350	R = 0,0085 I	0,87	0,34
Sorgo invierno	82-301	R = 0,0051 I + 2,89	0,73	0,31
Ajo	80-292	R = 0,0378 I	0,94	0,66
Cebolla	100-370	R = 0,053 I	0,93	1,27
Tomate (octubre-diciembre)	38-225	R = 0,085 I + 23,77	0,95	1,30
Boniato	0-200	R = 0,057 I + 13,94	0,69	3,07
Malanga	17-566	R = 0,0435 I + 10,26	0,71	5,5
Piña	0-1 813	R = 0,0085 I + 85,8	0,98	1,09
$R = f I^2 + g I + h$				
Maíz invierno	20-310	R = -0,000007 I ² + 0,64	0,77	
		0,042 I		
Maíz primavera	180-230	R = -0,000098 I ² + 0,79	0,42	
		0,046 I		
Soya invierno	30-260	R = -0,000072 I ² + 0,77	0,32	
		0,026 I		
Soya primavera	25-135	R = -0,00046 I ² + 0,74	1,01	
		0,083 I		
Soya verano	15-160	R = -0,00032 I ² + 0,82	0,83	
		0,067 I		
Pimiento (noviembre-abril)	55-422,4	R = -0,00022 I ² + 0,85	3,7	
		0,15 I		
Pimiento (marzo-mayo)	66-228,2	R = -0,00028 I ² + 0,88	1,4	
		0,16 I		
Tomate (diciembre-marzo)	60-290	R = -0,0008 I ² + 0,96	2,35	
		0,45 I		
Papa	70-378,2	R = -0,00033 I ² + 0,78	4,07	
		0,2 I		
Plátano	200-100	R = -0,000035 I ² + 0,84	5,9	
		0,058 I		
Banano	90-724	R = -0,00002 I ² + 0,96	2,04	
		0,061 + 8,2		

En cada una de las ecuaciones seleccionadas, los coeficientes de regresión y el modelo resultaron significativos a un nivel de confianza de 95% y fueron capaces de explicar en más del 70% la variabilidad total del rendimiento, con excepción del boniato que solo alcanzó 69%. Todas las funciones obtenidas mostraron resultados aceptables de los parámetros estadísticos evaluados. Los suelos Ferralíticos Rojo, en general, presentan buenas condiciones de drenaje interno (Cid et al., 2011), por tanto, la naturaleza lineal obtenida para estos cultivos induce a pensar que existe un potencial para el incremento de los rendimientos sobre la base de un incremento de la cantidad de agua aplicada y de la eficiencia de la técnica empleada.

Por lo general, la función agua aplicada-rendimiento es lineal sólo cuando se considera en un rango de riego deficitario, donde toda el agua aplicada es usada como ET y puede existir entonces similitud con la función evapotranspiración(ET) - rendimiento (Al-Jamal et al., 2000).

Los trabajos de Botzan (1970), Hexem y Heady (1978), English (1990), Al-Jamal et al. (2000), Imtiyaz et al. (2000), Martín de Santa Olalla et al. (2004), Kumar et al. (2007) y Jiménez (2010) señalaron al polinomio de segundo orden como el de mejor ajuste para las relaciones agua aplicada por riego- rendimiento.

La respuesta no lineal en estos cultivos indica que no toda el agua fue usada por los mismos, y una parte de ella se pierde por drenaje libre. En estos casos, las funciones cuadráticas permiten estimar los niveles óptimos de riego para maximizar los rendimientos (Orozco y Pérez, 2006). No obstante, estos valores estarán

siempre en función del comportamiento de las lluvias dentro de la estación de riego. En este sentido, Nieblas (1990) recomienda el cálculo del régimen de riego para varios años y utilizar aquel que corresponde al 75% de probabilidad de ocurrencia.

Para la papa la función cuadrática $R = -0,00033 I^2 + 0,2 I$ fue la de mejor ajuste, con valores óptimos de riego y rendimiento de 298,5 mm y 30,3 t ha⁻¹, respectivamente (Figura 1). Esta función cuadrática, para el caso específico de este cultivo en las condiciones de Cuba, refleja que la necesidad de mantener una temperatura adecuada en el suelo obliga a aplicar agua (expresado como mayor frecuencia de riegos) por encima del requerimiento del cultivo, sin que se traduzca en un incremento en los rendimientos.

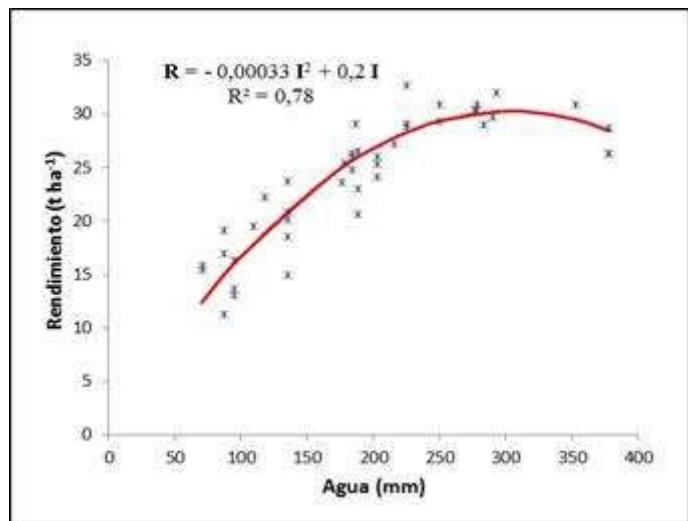


FIGURA 1.
Relación entre el agua aplicada por riego (I) y rendimiento para la papa.
Fuente: elaboración propia

Para este mismo cultivo Ferreira y Gonçalves (2007), en los dos años estudiados, en clima seco y caliente de Portugal, encontraron incrementos lineales del rendimiento con el aumento del agua total aplicada entre 69 y 91 kg ha⁻¹ mm⁻¹, valores similares a los informados para ambientes cálidos pero comparativamente bajos a los de zonas templadas (120-250 kg ha⁻¹ mm⁻¹) y que estos autores explican fundamentalmente por las altas pérdidas por evaporación del suelo entre la plantación y la emergencia que ocurren en esa región.

En la Figura 2 se resume una comparación entre las funciones rendimiento versus agua aplicada para maíz, soya, sorgo, cebolla, ajo y pimiento. Los resultados experimentales obtenidos conducen a una gama amplia de funciones con trazados gráficos muy diferentes, que dependieron en gran medida de las cantidades de agua aplicada en cada experimentación.

Si los aportes de agua van desde una cantidad moderada hasta aportes excesivos, parece posible explicar la correlación por una curva sigmoidal que presenta las tres fases de consumo: moderado, óptimo y excesivo; en caso contrario, es imposible obtener valores óptimos (Farré y Faci, 2006).

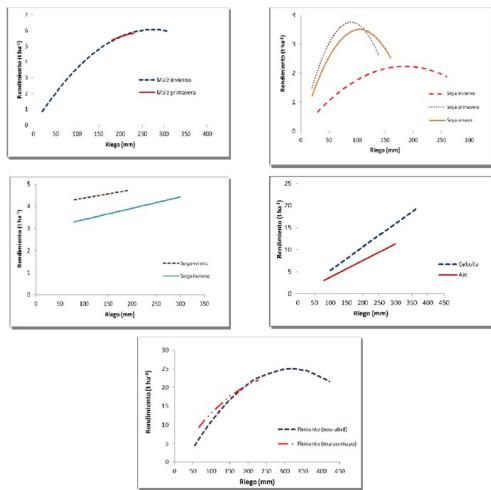


FIGURA 2.

Comparación entre diferentes funciones rendimiento versus agua aplicada de maíz, soya, sorgo, cebolla, ajo y pimiento en las diferentes épocas analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Musick y Dusek (1971) obtuvieron una relación sigmoidal entre la producción de grano y el agua aplicada por riego para el maíz en ambientes áridos, donde los consumos de agua son elevados. Según estos autores, a medida que aumenta la aplicación de agua por riego, el suplemento de cosecha que se obtiene por cada unidad de agua disminuye, hasta llegar a un punto en que todo incremento de la aplicación no se traduce en suplemento alguno de la cosecha, e incluso puede producir una disminución de la producción y no cubrir el gasto adicional en agua.

Stewart et al. (1974) afirmaron que si la eficiencia del riego fuera del 100% (el volumen de agua de riego se utilizaría totalmente en el proceso de ET), las funciones rendimiento versus ET y rendimiento versus agua aplicada por riego serían idénticas. La forma convexa de la función rendimiento versus agua aplicada pone de manifiesto la disminución de la eficiencia del riego a medida que se aumenta las aplicaciones de agua.

Kumar et al. (2007) presentaron al polinomio de segundo orden como la mejor opción para describir la relación entre el agua aplicada por riego y el rendimiento de la cebolla cultivada en suelo arenoso con condiciones semiáridas en la India en dos años de investigación. Sin embargo, el efecto lineal en las ecuaciones obtenidas siempre fue positivo, mientras que el efecto cuadrático fue negativo. Estos resultados indican que el incremento en el rendimiento de la cebolla no fue proporcional al incremento de la cantidad de agua.

En la Tabla 3 se presentan los valores de productividad agronómica del agua aplicada por riego (WPI) para los cultivos estudiados.

Esta relación es muy dependiente del comportamiento de las lluvias dentro de la temporada de riego y resulta difícil, al realizar los experimentos a campo abierto, separar el aporte de las lluvias, escasa o no, a la satisfacción de las necesidades de agua de los cultivos. Esto explica los altos valores de productividad del agua obtenidos para la mayoría de los cultivos.

Aunque los valores de productividad aquí presentados, se obtuvieron para variedades diferentes a las utilizadas actualmente en la producción, como es el caso del tomate Campbell 28, el pimiento Medalla de Oro, la cebolla Red Creole y la papa, sí constituyen una importante referencia por el hecho de no existir precedentes de este cálculo para el país, además debe tenerse en consideración que estos cultivos son patrones que se utilizaron para crear algunas de las variedades utilizadas en la actualidad. Se obtuvieron también valores de productividad para cultivos como el garbanzo, malanga, boniato, yuca, papayo no publicados hasta la fecha en la literatura internacional.

TABLA 3.
Rangos de valores de productividad agronómica del agua
aplicada por riego (WPI) calculada para los cultivos estudiados.

Cultivo		WPI (kg m ⁻³)
Granos	Maíz	2,03-16,43
	Soya	0,69-12,2
	Sorgo	1,4-5,48
	Frijol	0,6-1,91
	Garbanzo	0,34-1,27
Hortalizas	Pimiento	3,1-26,2
	Tomate	12,9-45,4
	Cebolla	3,76-16,6
	Ajo	3,37-4,22
Viandas	Papa	6,25-26,7
	Boniato	10,3-88,5
	Malanga	5,9-11,3
	Plátano	1,37-33,01
Frutales	Yuca	10,5-18,5
	Banano	5,5-26,9
	Papayo	5,8-19,7
	Piña	4,4-11,2

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4 se presenta un análisis de dos de las posibles estrategias a seguir en función de la disponibilidad de agua. Al preparar esta tabla se seleccionaron las funciones cuadráticas obtenidas para maíz, soya, pimiento, tomate, papa y plátano expuestas anteriormente en la Tabla 2; con ellas se calcularon los valores óptimos mostrados en la Tabla 4 y los mismos se comparan con los valores de agua aplicada, rendimiento y productividad del agua utilizada para cada estrategia. Se muestran además los resultados del análisis económico aplicado a las dos estrategias.

Como se puede observar, los valores de productividad agronómica del agua utilizada son mayores en un 23% como promedio en la estrategia de máxima eficiencia del agua aplicada como riego. Los cultivos con mayor porcentaje de diferencia entre las dos estrategias analizadas son la soya, el maíz y el tomate.

Si la estrategia seleccionada es la de máxima eficiencia del riego (Tabla 4), se pueden llegar a obtener reducciones de agua a aplicar entre un 21,6 y 46,8% y aunque la selección implicaría reducción de rendimientos entre 5 y 22%, se elevarían los valores de productividad del agua entre 17 y 32% con incrementos en la relación beneficios/costo estimada de hasta un 3,4%. Lo anterior indica la importancia desde el punto de vista económico que puede llegar a alcanzar el uso de esta estrategia en condiciones de déficit hídrico.

Por ejemplo, en el cultivo del maíz con la estrategia de máxima eficiencia del riego se disminuye el agua a aplicar en un 30,8% y si bien la selección conlleva a una reducción del rendimiento del 9,5%, la productividad del agua se incrementa en un 23,5% con una relación beneficios/costo estimada de 3,38, superior en 2,5% a la estrategia de maximizar la producción por unidad de superficie. Lo anterior puede observarse al analizar la Figura 3.

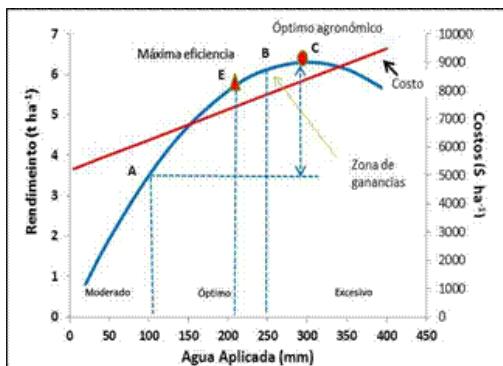


FIGURA 3.
Relación entre rendimiento, el costo total y agua aplicada en el maíz.

Fuente: Elaboración propia.

En esta figura el tramo comprendido entre el punto A y C, que corresponden a las aplicaciones óptimas de riego, es donde la utilización del agua por el cultivo es óptima y donde se obtienen las producciones más económicas mediante el riego. En el punto E se logra la máxima producción por unidad de agua aplicada por riego, con $2077 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

A medida que aumenta la cantidad de agua aplicada por encima del punto C, $3000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, el incremento de cosecha que se obtiene por cada unidad de agua disminuye, es decir el incremento en agua no se traduce en un aumento de la producción. Antes de alcanzar el óptimo agronómico (punto C) se puede alcanzar el óptimo económico (punto B) a partir del cual el incremento del rendimiento que se obtiene al aumentar la dotación hídrica no cubre el gasto suplementario en agua, y depende en gran medida de situaciones particulares de mercado.

Sin lugar a dudas lo anterior constituye un dilema a resolver en el momento de la planeación del riego, y el decisor debe tener claro si su meta es maximizar la producción por unidad de superficie o maximizar la eficiencia del agua, sin embargo queda claro que ante escasez de agua la meta debería ser el maximizar su eficiencia por unidad de área, lo cual incluso podría permitir un incremento del área regada para la misma cantidad de agua y con ello incrementar la producción. La disponibilidad de agua y su costo de aplicación, el gasto energético que significa y el costo de la fuerza de trabajo son todos factores a tener en cuenta en el momento de la toma de decisiones.

En estos análisis se parte del supuesto de que solo el agua es el factor limitante, pero si otros factores de la agrotecnia del cultivo, la sanidad vegetal o la fertilización, entran a jugar la ley del mínimo de Liebig (Russell y Russell, 1967) y es entonces el factor limitante el que determina el rendimiento, para lo que habría entonces que definir otras curvas de función agua-rendimiento.

TABLA 4.
Valores de rendimiento, agua aplicada, productividad del agua aplicada
por riego y análisis económico según la estrategia seleccionada.

Cultivo Rendimiento (t ha-1)	Norma total (m3 ha-1)	Productividad (kg m-3)	Precio Unitario (\$ t-1)	Beneficio (\$ ha-1)	Costo de bombeo	Costo del agua Costo Total	Salario variables	Otros Costos B/C	(\$ ha-1)
ESTRATEGIA: ÓPTIMO AGRONÓMICO									
Maíz	6,30	3000	2,1	4400	27720,00	195,56	540,00	229,95	7441,55
Soya	2,30	1806	1,3	7700	17710,00	110,81	306,00	169,96	4919,87
Pimiento	25,6	3409	7,5	500	12800,00	254,25	702,00	389,97	8259,62
Tomate	63,30	2813	22,5	500	31650,00	183,38	506,34	281,26	11033,04
Papa	30,30	2985	10,2	990	29997,00	194,60	537,30	298,48	8699,84
Plátano	24	8286	2,9	1980	47520,00	539,90	1494,48	828,10	27786,01
ESTRATEGIA: MÁXIMA EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA									
Maíz	5,70	2077	2,7	4400	25080,00	135,41	373,86	207,69	6697,39
Soya	1,83	960	1,91	7700	14091,00	62,57	172,80	95,97	3985,09
Pimiento	23,8	2500	9,5	500	11900,00	195,56	540,00	299,95	7681,44
Tomate	56,60	1900	29,8	500	28300,00	123,86	343,00	189,98	9819,40
Papa	28,3	2250	12,6	990	28017,00	146,68	405,00	224,98	8003,85
Plátano	20,90	6500	3,22	1980	45342,00	423,75	1170,00	649,95	26396,71
									28640,41
									1,58

Fuente: Elaboració propia.

CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos de funciones rendimiento versus agua aplicada por riego conducen a una gama amplia de funciones con trazados gráficos muy diferentes, la respuesta dependerá en gran medida de la amplitud de los rangos del agua aplicada.

Se presentan los rangos de productividad agronómica del agua obtenidos para 17 cultivos en este estudio, relación que es muy dependiente del comportamiento de las lluvias dentro de la temporada de riego.

Seleccionar una estrategia de máxima eficiencia del riego puede conducir a reducciones de agua a aplicar entre un 21,6 y 46,8%, incrementos de la productividad del agua entre 17 y 32% y de la relación beneficios/costo estimada de hasta un 3,4%. Lo anterior indica la importancia desde el punto de vista económico que puede llegar a alcanzar el uso de esta estrategia en condiciones de déficit hídrico.

El conocimiento de las funciones agua aplicada por riego-rendimiento y el uso de la productividad del agua, resultan parámetros factibles de introducir como indicadores de eficiencia en el planeamiento del uso del agua en la agricultura, con lo cual es posible reducir los volúmenes de agua a aplicar y elevar la relación beneficio-costo actual.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Jamal, M. S., Sammis, T. W., Ball, S., & Smeal, D. (2000). Computing the crop water production function for onion. *Agricultural Water Management*, 46(1), 29-41.
- Billib, M., Bardowicks, K., & Arumí, J. L. (2009). Integrated water resources management for sustainable irrigation at the basin scale. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69, Nr. SUPPL. 1, 69-80.
- Botzan, M. (1970). Determination quantitatives de la consommation déau des sols irrigués. *L'irrigazione*, 112, 3-8.
- Cid, G., López, T., González, F., Herrera, J., & Elena Ruiz, M. (2011). Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2), 42-46.

- English, M. (1990). Deficit irrigation. I: Analytical framework. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 116(3), 399-412.
- FAO (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. Cómo gestionar los sistemas en peligro. Roma, Italia, 50pp.
- Farré, I., & Faci, J. M. (2006). Comparative response of maize (*Zea mays L.*) and sorghum (*Sorghum bicolor L. Moench*) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural water management*, 83(1-2), 135-143.
- Ferreira, T. C., & Gonçalves, D. A. (2007). Crop-yield/water-use production functions of potatoes (*Solanum tuberosum, L.*) grown under differential nitrogen and irrigation treatments in a hot, dry climate. *Agricultural water management*, 90(1-2), 45-55.
- González Robaina, F., Herrera Puebla, J., Hernández Barreto, O., López Seijas, T., & Cid Lazo, G. (2012). Base de datos sobre necesidades hídricas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(2), 42-47.
- Hexem, R. W., & Heady, E. O. (1978). Water production functions for irrigation agricultura. State University Press: Ames, Iowa.
- Imtiyaz, M., Mgadla, N. P., Chepete, B., & Manase, S. K. (2000). Response of six vegetable crops to irrigation schedules. *Agricultural water management*, 45(3), 331-342.
- Jiménez, M.; De Juan, J.A.; Tarjuelo, J.M.; Ortega, J.F.(2010): "Effect of irrigation uniformity on evapotranspiration and onion yield", *Journal of Agricultural Science*, 148, 139-157.
- Kiani, A. R., & Abbasi, F. (2012). Optimizing water consumption using crop water production functions. *Crop Production Technologies*, 73-92.
- Kumar, S., Imtiyaz, M., Kumar, A., & Singh, R. (2007). Response of onion (*Allium cepa L.*) to different levels of irrigation water. *Agricultural water management*, 89(1-2), 161-166.
- Luis, R., & Cabrera, G. (1994). Respuesta de la caña de azúcar a variaciones de la humedad en el suelo en tres etapas de desarrollo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 15(2): 53-62.
- Martínez-Aparicio, A., Martínez, B. (1986). Método para la optimización de la distribución de agua en un grupo de cultivos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 9(1): 71-73.
- de Santa Olalla, F. M., Domínguez-Padilla, A., & Lopez, R. (2004). Production and quality of the onion crop (*Allium cepa L.*) cultivated under controlled deficit irrigation conditions in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management*, 68(1), 77-89.
- Martin de Santa Olalla, F.; Valero, J. A. (1993). En: Agronomía del riego. Capítulo VII. Las funciones de producción versus agua, pp. 448-519. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, España.
- MFP. Ministerio de Finanzas y Precios (2012). Resolución 298.
- MINAG. (2012). Balance de uso del agua para el riego. Informe anual, La Habana.
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R., & Makin, I. (2003). A water-productivity framework for understanding and action. *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement*, 1.
- Musick, J. T., & Dusek, D. A. (1971). Grain sorghum response to number, timing, and size of irrigations in the Southern High Plains. *Transactions of the ASAE*, 14(3), 401-404.
- Nieblas, A. (1990). Planificación óptima del riego bajo condiciones de déficit de recursos en la Empresa de cultivos varios. Tesis al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana "Fructuoso Rodríguez Pérez".
- Orozco, J.R; Pérez, O.Z. (2006). Tensión de humedad del suelo y fertilización nitrogenada en plátano (*MusaAAA Simmonds*) cv. Gran Enano", *Revista Agrociencia*, 40 (2): 149-162.
- Patel, N., & Rajput, T. B. S. (2007). Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato. *Agricultural water management*, 88(1-3), 209-223.
- Rusell, E. J., y Russell, E. W. (1967). Las condiciones del suelo y el desarrollo de las plantas. La Habana: Editora Revolucionaria; 1967.
- Stewart, J. I., Hagan, R. M., & Pruitt, W. O. (1974). Functions to predict optimal irrigation programs. *Journal of the irrigation and Drainage Division*, 100(2), 179-199.

- Vigoa, H. R. (1980). La determinación práctica de la función agua-rendimiento”, Revista Ingeniería Hidráulica, ISPJAE, 1: 10-15.
- Vigos, H.R., León, M.A., (1987). En: La caña de azúcar en Cuba. Capítulo VII. Riego y Drenaje, pp. 409-551. Editorial Científico-Técnica, La Habana.
- García-Tornel, F. C. (2006). Sureste español: regadío, tecnologías hidráulicas y cambios territoriales. Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales, 10.
- Dehghanianj, H., Nakhjavani, M. M., Tahiri, A. Z., & Anyoji, H. (2009). Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions. Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage, 58(1), 105-115.