

Adecuación de un modelo de simulación de cultivo para la predicción del crecimiento y producción del arroz en el sur de La Habana

Fitting crop simulation model for prediction rice growth and yield of rice crop in the south of Havana

Teresa López Seijas¹, Felicita González Robaina², Aymara García López², Julián Herrera Puebla³ y Greco Cid Lazo³

RESUMEN. Este trabajo presenta los primeros resultados de la adecuación del modelo de simulación STICS, validado anteriormente para los cultivos de maíz y frijol, para la predicción del crecimiento y rendimiento del cultivo del arroz en diferentes épocas del año y bajo diferentes condiciones de manejo del agua en la región del sur de La Habana. Se procesó la información experimental existente para definir los ficheros requeridos por el modelo, incluyendo datos diarios de las variables climáticas así como de las funciones fundamentales del cultivo: *crecimiento de área foliar y producción de materia seca*. Para la optimización de los parámetros del fichero de cultivo para el arroz, se utilizaron los datos de las experiencias de campo de la campaña de frío o época de seca y el módulo de optimización del STICS que tiene como criterio la minimización del error cuadrado medio. Para la validación del fichero optimizado para el arroz se utilizó otro juego de datos tomado de las experiencias de campo de otra época de siembra, la campaña de primavera o época de lluvia. Como resultado más importante está el nuevo fichero de cultivo definido STICS-Arroz, que resume las características generales del cultivo del arroz y las particularidades de la variedad estudiada (J-104). No obstante, para la completa validación del modelo se hace necesario realizar observaciones de campo de las variables relacionadas con el almacenamiento del agua en la zona radical y el consumo del agua por las plantas y esto debe comprenderse en la continuidad del trabajo de investigación-validación.

Palabras clave: predicción área foliar, simulación producción materia seca.

ABSTRACT. This paper presents the results of fitting simulation model STICS, previous validated for maize and beans, for growth prediction of rice under different management conditions in south of Havana. It was used and processed the experimental field information for define the climatic and soil input files and for the output files with the data of the two important crop functions: *leaf area index and dray matter production*. The optimization of crop file parameters was done using the experimental information of winter or dray season and the optimization module of STICS model that uses as optimization criteria the minimum of mean square error. The validation of this crop file parameters was done using data of another season cold and dry season. As a result of this work it was adjusted a new crop file for rice (STICS-Rice), that resume the general characteristics of rice crop and particularities of crop growth faces of the studied variety (J-104). However for complete validation of the model with respect to prediction of irrigation management strategies in this crop, it is necessary due field observations of variables related to water storage in the root zone and plant water consume and this will be understood in the continuity of the investigation and validation work.

Keywords: live area prediction, dry matter production simulation.

INTRODUCCIÓN

A pesar de la gran cantidad de recursos que se destinan a la producción del cultivo del arroz, los rendimientos que

actualmente se obtienen no satisfacen la demanda existente ni se justifican económicamente. Varios son los factores que influyen sobre el desarrollo y producción del cultivo, siendo el suministro del agua un elemento importante, tanto desde el

Recibido 02/02/09, aprobado 29/01/10, trabajo 11/10, investigación.

¹ Dra.C., Inv. Tit., Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD), Apdo. Postal 6090; La Habana, Cuba, E-✉: teresa@iird.cu.

² MSc., Inv., IIRD, La Habana, Cuba.

³ Dr.C., Inv. Tit., IIRD, La Habana, Cuba.

punto de vista fisiológico como económico.

El cultivo del arroz, tiene una importancia primordial para la alimentación del pueblo cubano. En los últimos años, el cultivo del arroz estatal o especializado, se ha visto limitado por la falta de combustible y productos químicos para la nutrición y protección de las plantaciones contra plagas y enfermedades. A partir del año 1996, el Ministerio de la Agricultura, tomó la decisión de potenciar la producción no especializada del arroz, sobre la base de utilizar bajas cantidades de insumos. Actualmente en este tipo de producción de arroz, el 49% de las áreas poseen sistema de riego y por tanto se hacen imprescindibles todas las acciones que se encaminen a potenciar la eficiencia en el uso del agua.

En los últimos años se han realizado por el Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje de conjunto con el Instituto de Investigaciones del Arroz (IIA) y el Instituto de Investigaciones Fundamentales de la Agricultura Tropical (INIFAT), proyectos de investigación para el estudio de los efectos de diferentes manejos del cultivo sobre el comportamiento fisiológico y el rendimiento del arroz. Resulta obvio que continuar estos estudios por la vía tradicional consumiría mucho más tiempo y recursos que si se acude a la utilización de modelos de simulación, partiendo de la información ya almacenada y la optimización de los parámetros fisiológicos necesarios para conformar un nuevo fichero de cultivo. La comprobación de la eficiencia de la simulación puede hacerse a través de observaciones de campo sobre cultivos ya establecidos.

Durante los últimos 10 años se han desarrollado modelos de simulación de base ecofisiológica para un número importante de sistemas de cultivos. Estos se distinguen de los demás modelos empíricos por su representación explícita de los procesos físicos y biológicos tales como la fotosíntesis, producción de materia seca, crecimiento del área foliar, desarrollo de la planta, ciclo de nutrientes y su balance energético (Jones & Boote, 2007).

En trabajos anteriores derivados de proyectos de investigación asociados a Programas Ramales del Ministerio de la Agricultura y de Recursos Hidráulicos, se ha validado y puesto a punto el modelo de simulación STICS y se ha utilizado el modelo de análisis de sensibilidad STICS (Brisson *et al.*, 1997). Para las condiciones edafoclimáticas del sur de La Habana, en los cultivos de maíz y frijol. Los resultados de estos trabajos han permitido definir una primera estrategia de manejo del agua y el fertilizante nitrogenado para estos cultivos, que incluyen las dosis totales de agua y su distribución por fases del cultivo así como las combinaciones óptimas de agua-nitrógeno, asegurando máximos rendimientos y máximas eficiencias de utilización del fertilizante y el agua por el cultivo (López *et al.*, 2000; 2002; 2003).

El objetivo fundamental de este trabajo es adecuar en una primera aproximación el modelo de simulación de crecimiento STICS para la predicción del crecimiento y rendimiento del cultivo del arroz en diferentes épocas del año y bajo diferentes condiciones de manejo del agua en el sur de La Habana y definir sus potencialidades para los estudios de estrategias de riego óptimas en diferentes condiciones de producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo utilizado. Se utiliza la versión 3.12 de STICS, un modelo de simulación de crecimiento de cultivo desarrollado por investigadores del Instituto Nacional de Investigación Agrícola de Francia, INRA, (Brisson *et al.*, 1997).

Información experimental utilizada. Se utilizan los datos de experimentos de campo realizados en áreas del Instituto de Investigaciones del Arroz (IIA) en el año 2001 y que comprenden dos campañas diferentes del cultivo del arroz, una de frío ó época seca (11/02/01-24/07/01) y otra de primavera o época húmeda (18/04/01- 31/08/01).

Conformación de los ficheros de entrada para el trabajo con el modelo:

- **Fichero climático:** se utilizaron los valores diarios registrados en la Estación Climática del IIA en el año 2001 de las variables: temperaturas mínimas y máximas (Tmin y Tmax, en °C), radiación solar neta (Rn, MJ/m²/día), evapotranspiración de referencia (ET_o, en mm) y precipitación (P, en mm).
- **Fichero de suelo:** se utilizó la información disponible de la caracterización del suelo según el Instituto de Suelos (1996), presente en las áreas del IIA que es del tipo Gley Vértico Crómico Nodular Ferruginoso (nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba, 1996) para definir un perfil de 4 capas con las siguientes características: contenido de arcilla medio, 58,4%, contenido de N orgánico en la superficie-0,60%, de calcio- 0,20%, albedo- 0,17, infiltración estabilizada- 25 mm/h, profundidad de humificación- 60 cm, humedad a capacidad de campo (Cc)-31,3% a 20cm; 36,5% a 40cm, 37,3% a 60cm y 37,5% a 80cm; humedad al punto de marchitez permanente (PMP)- 26,9% a 20cm, 28,7% a 40cm, 26,9% a 60cm, 27,4% a 80cm; densidad aparente (da)- 1,18 a 20cm, 1,20 a 40cm, 60cm y 80cm.
- **Fichero de cultivo:** se utilizó inicialmente el fichero de cultivo como fue definido en el modelo STICS para el cultivo del trigo (Brisson *et al.*, 1997).
- **Ficheros de itinerarios técnicos** (manejo del cultivo):
- **Fichero de itinerario técnico 1** - Para el trabajo de **optimización** de los parámetros del fichero de cultivo se utilizó inicialmente la información experimental de la campaña de frío ó época seca (11/02/01-24/07/01). Un resumen de la misma se da a continuación:
 Variedad: de ciclo medio, J-104.
 Ciclo del cultivo: 163 días, ciclo medio
 Fechas de siembra y cosecha: 11/02/01-24/07/01.
 Fechas de cambio en los Estados de Desarrollo: germinación- 2/03/01; cambio de primordio (cp)- 16/04/01 (75 días después de germinado, ddg); crecimiento foliar máximo - 30/05/01 (90 ddg), 50% de pandiculación- 20/06/01 (110 ddg) y cosecha final- 24/07/01 (144 ddg).
 Profundidad radical: 30 cm en la primera etapa (hasta 75 ddg) y 40 cm para el resto del ciclo vegetativo.
 Aportes de agua: la información sobre las dosis de riego aplicadas se tomaron de lo definido en el instructivo técnico

del cultivo del Instituto de Investigaciones del Arroz (2005); para los ciclos de cultivo medios en campañas de frío o época seca y que se pueden resumir en 99 riegos con una lámina total aplicada de 1144 mm.

Aportes de fertilización: la información sobre las dosis de fertilización nitrogenada con urea se tomaron de lo definido en el instructivo técnico del cultivo del Instituto de Investigaciones del Arroz (2005) y fueron las mismas en ambas campañas analizadas (frío y primavera) y se pueden resumir en 3 aplicaciones de 60 kg N/ha a los 7, 30 y 60 días después de la germinación.

- **Fichero de itinerario técnico 2** - Para el trabajo de **validación** de los parámetros optimizados del fichero de cultivo se utilizó posteriormente la información experimental de la campaña de primavera ó época húmeda (18/04/01 – 31/08/01). Un resumen de la misma se da a continuación:

Variedad: de ciclo medio, J-104.

Ciclo del cultivo: período húmedo, 125 días, ciclo medio

Fechas de siembra y cosecha: 18/04/01- 31/08/01.

Fechas de cambio en los estados de desarrollo: germinación- 28/04/01; cambio de primordio (cp)- 21/06/01 (54 ddg); crecimiento foliar máximo - 22/07/01 (85 ddg); 50% de pandiculación- 14/08/01 (108 ddg) y cosecha final- 31/08/01 (125 ddg).

Profundidad radical: 30 cm en la primera etapa (hasta 54 ddg) y 40 cm para el resto del ciclo vegetativo.

Aportes de agua: la información sobre las dosis de riego aplicadas se tomaron de lo definido en el instructivo técnico del cultivo para los ciclos de cultivo medios en campañas de primavera o época húmeda y se resumen en un total de 62 riegos con una lámina total de 827 mm.

Optimización de parámetros para la conformación del fichero de cultivo arroz

Se optimizaron inicialmente los valores de la duración de los estados de desarrollo del cultivo, fundamentalmente los estados iniciales de establecimiento y aceleración del crecimiento foliar y los estados finales de maduración – cosecha. Se optimizaron también los parámetros que intervienen en la modelación de las dos funciones fundamentales del cultivo dentro del modelo STICS: el Índice de Área Foliar (LAI) y la producción de Materia Seca en planta y en granos (MS pl. y MS gr.).

Para el caso del LAI se optimizaron los parámetros que más influyen en esta variable según lo definido por Brisson *et al.* (2000): **dlaimax** - valor máximo del LAI en el estado de máximo crecimiento foliar y **vlaimax** - velocidad de crecimiento máxima de la superficie foliar de una planta por grado.

Para la MS pl. se optimizaron también los parámetros que más influyen en esta variable según lo definido por Brisson *et al.* (2000): **extin**- coeficiente de extinción de la radiación global, **efcroiveg** - eficiencia de conversión máxima durante la fase vegetativa, **efcroirepro** - eficiencia de conversión máxima durante la fase reproductiva.

Para la MS gr. Igualmente se optimizaron los parámetros que más influyen en esta variable según lo definido por Brisson *et al.* (2000): **nbjgrain** - período de latencia que determina el número de granos por planta, **cgrain** - número promedio de granos que se forman por g de materia seca (MS) por día acumulado durante los nbjgrain precedentes al llenado de los granos, **vitircarb** y **vitirazo** - aumento diario del índice de cosecha carbono y nitrógeno respectivamente.

El proceso de optimización consistió en variar los parámetros señalados anteriormente hasta reducir al mínimo el error cuadrático medio entre valores simulados y observados de las variables: LAI, materia seca en planta y en granos y para estas simulaciones se utilizó el **fichero de itinerario técnico 1** que corresponde a la información experimental de la campaña de frío ó época seca.

Validación de los parámetros optimizados del fichero de cultivo arroz

Para el proceso de validación se utilizó otro juego de datos de observaciones y el **fichero de itinerario técnico 2** que corresponden a la información experimental de la campaña de primavera ó época húmeda. La validación de los parámetros optimizados para el fichero del cultivo del arroz se realizó a partir de la comparación gráfica y estadística entre valores simulados y observados de las variables: LAI, materia seca en planta y en granos, materia fresca en granos (rendimiento).

Análisis estadístico. En ambos procesos, optimización y validación, se utilizaron los estadígrafos **error cuadrático medio y error medio absoluto** para la comparación de los valores observados y simulados que brindan información sobre la capacidad predictiva del modelo.

Por otra parte se utilizaron también los estadígrafos coeficiente de correlación y prueba t-Student para muestras independientes que permiten definir la significación de las diferencias entre valores observados y simulados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la optimización de parámetros para la conformación del fichero de cultivo arroz

En la Tabla 1 se resumen los resultados del trabajo de optimización de la duración de los estados de desarrollo definidos inicialmente en el modelo STICS para el cultivo del trigo, a partir de los valores observados para el arroz en la campaña experimental de frío o época seca.

Como se puede observar hay un alargamiento general del ciclo del cultivo, que pasa de 96 días a 145 días y en particular de la duración del estado de desarrollo inicial, el establecimiento, que aumenta de 35 días a 68 días. Por otra parte hay una modificación del esquema del modelo de los estados de desarrollo finales – senescencia, maduración y cosecha – que se reducen en un último estado de maduración-cosecha de una duración de 36 días.

TABLA 1. Comparación de la duración de los Estados de Desarrollo (ED) simulados y observados en:

a- en la optimización de los valores observados para el cultivo del arroz en la campaña de frío o época seca

Estados de Desarrollo (ED)		Campaña de invierno o época seca (proceso de optimización del fichero de cultivo STICS-Trigo)					
		Días del cultivo			Duración ED (días)		
		Obs.	Simul	Optim.	Obs.	Simul	Optim.
PLT	siembra	-18,0	-18,0	-18,0			
LEV	germinación	1,0	1,0	1,0	19,0	19,0	19,0
AMF	establecimiento	67,0	36,0	69,0	66,0	35,0	68,0
LAX	LAI máx.	91,0	56,0	95,0	24,0	20,0	26,0
DRP	Llenado de granos	105,0	66,0	109,0	14,0	10,0	14,0
SEN	senescencia	145,0	71,0	145,0	40,0	5,0	36,0
FIR	fin índice cosecha	145,0	90,0	145,0	0,0	19,0	0,0
MAT	madurez	145,0	90,0	145,0	0,0	0,0	0,0
REC	cosecha	145,0	96,0	145,0	0,0	6,0	0,0

b- en la validación de estos valores en la campaña de primavera o época húmeda

Estados de Desarrollo (ED)		Campaña de primavera o época húmeda (proceso de validación del fichero de cultivo STICS-Arroz)			
		Días del cultivo		Duración ED (días)	
		Obs.	Simul	Obs.	Simul
PLT	siembra	-10,0	-10,0		
LEV	germinación	1,0	1,0	11,0	11,0
AMF	establecimiento	55,0	50,0	54,0	49,0
LAX	LAI máx.	86,0	83,0	31,0	33,0
DRP	Llenado de granos	110,0	108,0	24,0	25,0
SEN	senescencia	125,0	125,0	15,0	17,0
FIR	fin índice cosecha	125,0	126,0	0,0	1,0
MAT	madurez	125,0	127,0	0,0	1,0
REC	cosecha	125,0	128,0	0,0	1,0

En la Figura 1A se muestra la comparación gráfica de los valores del Índice de Área Foliar (LAI) simulados para el ciclo del cultivo del arroz utilizando como parámetros los definidos en el fichero de trigo del modelo STICS, y los observados para este cultivo en la campaña experimental de la época seca.

Como puede observarse hay un aumento considerable de los valores máximos del LAI así como una variación en la pendiente de la curva de crecimiento del mismo, lo que corresponde a un cambio en la velocidad de crecimiento foliar en los estados iniciales del cultivo. Por otra, parte el cambio en la duración del ciclo del cultivo y en particular el alargamiento del estado de establecimiento y máximo crecimiento foliar, también influyen en las diferencias observadas para la

variable LAI.

La comparación gráfica y estadística de los valores observados y optimizados demuestran la significación y precisión de los mismos (Figura 1B y Tabla 2) y permitió definir los valores propios de estos parámetros en el fichero del cultivo del arroz. Como se observa en la Tabla 2 se logró disminuir considerablemente el error cuadrático medio para las tres variables estudiadas a partir de la optimización de los parámetros del cultivo. No obstante la variable LAI presentó el peor comportamiento con los valores más altos de MSE y MAE. En cuanto a la significación estadística de la prueba t-Student se logra la no significación de las diferencias con la optimización de los parámetros del cultivo.

TABLA 2. Resultados de la comparación estadística de los valores simulados, observados y optimizados de las variables LAI, MS planta y MS granos para el cultivo del arroz en:

a- en la campaña de frío o época seca (proceso de optimización)

Variable	Campaña de invierno o época seca (proceso de optimización del fichero de cultivo STICS-Trigo)							
	Error Cuadrático Medio		Error Medio Absoluto		Coeficiente Correlación		Prueba t-Student	
	simul-obs	optim-obs	simul-obs	optim-obs	simul-obs	optim-obs	simul-obs	optim-obs
LAI	121,50	3,11	8,21	1,32	0,02	1,00	0,0068	0,4212
MS planta	3,44	0,056	3,73	0,15	-0,15	1,00	0,4710	0,4572
MS granos	11,25	0,08	2,65	0,18	-0,63	1,00	0,0331	0,4552

b- en la campaña de primavera o época húmeda (proceso de validación)

**Campaña de primavera o época húmeda
(proceso de validación del fichero de cultivo STICS-Arroz)**

Variable	Error Cuadrático Medio	Error Medio Absoluto	Coefficiente Correlación	Prueba t-Student
	simul-obs	simul-obs	simul-obs	simul-obs
LAI	5,47	2,65	0,994	0,478
MS planta	0,19	0,18	0,986	0,479
MS granos	0,015	0,10	0,997	0,491

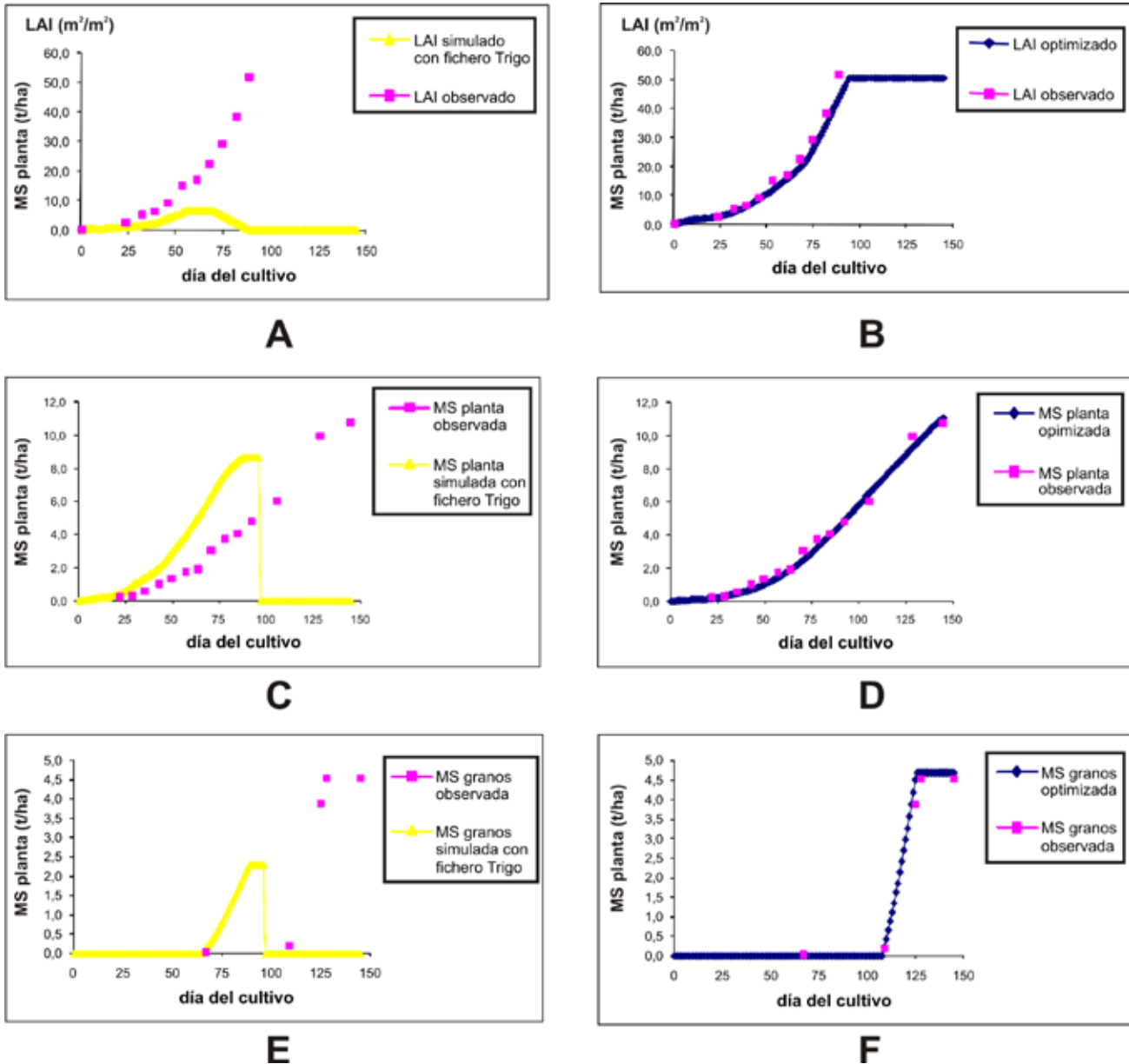


FIGURA 1. Comparación de los valores simulados y observados de las variables A y B- Índice de Área Foliar, B y C- Materia Seca en la planta (MS planta) y C y D- Materia Seca en los granos (MS granos) para el cultivo del arroz utilizando el fichero de cultivo STICS-Trigo y STICS-Arroz (proceso de optimización).

En la Figura 1 (C-D y E-F) se muestra la comparación gráfica del comportamiento de los valores de producción de materia seca en la planta (MS planta) y materia seca en los granos (MS granos) simulados para el ciclo del cultivo del arroz utilizando como parámetros los definidos en el fichero STICS-Trigo, y los observados para este cultivo en la campaña experimental de la época seca.

Como puede observarse de nuevo el alargamiento del ciclo del cultivo influye en este caso en la disminución de la producción de materia seca en planta en los estados iniciales y en el comienzo de la producción de materia seca en los granos.

Para la producción de materia seca en planta, aunque se observan valores finales algo superiores para el cultivo del arroz, en general no se presentan diferencias estadísticamente significativas para esta variable (Tabla 2a). No ocurre lo mismo para la producción de materia seca en granos que si difiere estadísticamente de la simulada con los parámetros del fichero STICS-Trigo, lo que se asocia a las diferencias en la evolución del peso y número de granos del cultivo del arroz con respecto al trigo.

Los parámetros optimizados para esta variable (eficiencia de conversión máxima de la radiación en las diferentes fases del cultivo y la producción de granos por gramo de materia seca en planta, así como con los índices de acumulación de carbono y nitrógeno) permitieron definir los valores propios del fichero del cultivo del arroz para estas funciones y la comparación gráfica y estadística (Figura 1 (D y F) y Tabla 2a) de

los valores observados y optimizados evidencia la significación y precisión de los mismos a pesar de que se contaba con pocos valores observados de la variable producción de materia seca en granos.

Como se puede apreciar en la Tabla 2a se obtuvo que para la variable materia seca en planta, aún con la utilización de los parámetros definidos para el cultivo del trigo no se obtienen diferencias significativas entre los valores observados y simulados. Para la variable materia seca en granos si se logra la no significación de las diferencias con la optimización de los parámetros del cultivo.

En la Tabla 3 se resumen los parámetros generales modificados para el fichero del cultivo del arroz con respecto al fichero STICS-Trigo. Este resultado permite definir un nuevo cultivo a trabajar en la simulación con el modelo STICS, y el fichero adicionado resume las características generales del cultivo del arroz y las particularidades de la duración de los estados de desarrollo de la variedad estudiada (J-104). A partir de este fichero puede trabajarse la optimización de parámetros particulares que varíen para otras variedades del cultivo del arroz.

TABLA 3. Resumen de los parámetros optimizados para el fichero de cultivo del arroz con respecto al fichero STICS-Trigo

Parámetro	Definición	Unidad	Valor Fichero Trigo	Valor Fichero Arroz
Codeplante	Código de 3 letras que designa la planta		ble	arz
Stdrpsen	Duración de la fase de comienzo del llenado – comienzo de la senescencia	Unidad térmica (días. $T_{\text{aire media}}$)	100	200
Stsenfir	Duración de la fase de comienzo de la senescencia – fin de la evolución del índice de cosecha.	Unidad térmica (días. $T_{\text{aire media}}$)	450	0
stfirmat	Duración de la fase índice de cosecha constante.	Unidad térmica (días. $T_{\text{aire media}}$)	0	0
Dlaimax	Valor máximo del LAI en el estado de máximo crecimiento foliar.	-	$4.4 \cdot 10^{-4}$	$20 \cdot 10^{-4}$
Vlaimax	Velocidad de crecimiento máxima de la superficie foliar de una planta por grado	$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1} (T_{\text{cultivo}} - T_{\text{cultivo min}})$		
Extin	Coefficiente de extinción de la radiación global		0.6	0.03
efcroiveg	Eficiencia de conversión máxima durante la fase vegetativa	$\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$	3.8	3.3
Efcroirepro	Eficiencia de conversión máxima durante la fase reproductiva	$\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$	3.8	3.3
Nbjgrain	Período de latencia que determina el número de granos por planta	días	30	14
Cgrain	Número promedio de granos por g de materia seca (MS) por día durante nbjgrain	$\text{No}_{\text{granos}} \cdot \text{g}^{-1}_{\text{MS}} \cdot \text{día}^{-1}$	1043	1600
Vitircarb	Aumento diario del índice de cosecha carbono	$\text{g}_{\text{granos}} \cdot \text{g}^{-1}_{\text{MS}} \cdot \text{día}^{-1}$	0.011	0.03
Vitirazo	Aumento diario del índice de cosecha nitrógeno	$\text{g}_{\text{Ngranos}} \cdot \text{g}^{-1}_{\text{MS}} \cdot \text{día}^{-1}$	0.0225	0.03
Psisto	Potencial foliar umbral de cierre estomático	bar (positivo)	15	10
Zprlim	Profundidad radical máxima del perfil de referencia (Figura 8)	cm	160	80
Zpente	Profundidad a la que la densidad radical óptima se reduce a la mitad	cm	100	70
Croirac	Crecimiento del frente radical	$\text{cm} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{día}^{-1} (T_{\text{cultivo}} - T_{\text{cultivo min}})$	0.12	0.15
H ₂ Ograin	Tenor en agua de los granos en la cosecha	$\text{g h}_2\text{o} \cdot \text{g MS}^{-1}$	0.14	0.10
1:ARMINDA:	parámetros definidos para la variedad 1 ARMINDA que para el caso del	Unidad térmica		
Stlefamf	Fichero Arroz será la J-104:	(días. $T_{\text{aire media}}$)	181	80
Stamflax	duración del estado desde la germinación hasta el establecimiento del		200	50
Stlaxdrp	cultivo.		135	25
Pgrainmax	duración desde el establecimiento hasta el máx. valor de LAI.		$50 \cdot 10^{-2}$	$30 \cdot 10^{-2}$
	duración desde el máx. valor de LAI hasta comienzo llenado de los granos.			
	peso máximo del grano.			

Resultados de la validación de los parámetros optimizados del fichero de cultivo arroz

En las Figuras 2 (A, B y C) se muestra la comparación gráfica de los valores simulados utilizando el nuevo fichero de cultivo definido para el arroz con los valores observados de las variables de crecimiento y producción del cultivo en una época de siembra diferente (campaña de primavera o época húmeda) y con un manejo del riego diferenciado al anterior.

Como puede apreciarse existe una excelente correspondencia para las tres variables entre los valores observados y simulados y el análisis estadístico de los mismos así lo evidencia (Tabla 2b). No obstante la variable LAI sigue presentando los valores más altos de los errores MSE y MAE aunque comparables a los obtenidos con la optimización. En este sentido se puede señalar que el Índice de Área Foliar es un indicador altamente variable y de difícil cuantificación debido al trabajo de procesamiento manual para la estimación de las áreas fo-

liares, por lo que los errores experimentales se incrementan considerablemente.

Por otra parte, al comparar los resultados obtenidos en esta campaña de primavera con la campaña anterior de frío se puede apreciar como el modelo predice adecuadamente las modificaciones en el ciclo del cultivo y su efecto sobre el crecimiento foliar y la producción del cultivo. Como se observa en la Tabla 1b, para la campaña de la época húmeda el ciclo general del cultivo se acorta a 128 días (de 145 días en la época de frío) y el estado de desarrollo desde el máximo crecimiento foliar hasta el comienzo del llenado de los granos se alarga a 33 días (de 25 días en la época de frío). Este comportamiento coincide con los resultados de diversos autores, que han trabajado desde la década del 80 hasta la fecha, el efecto de las condiciones climáticas en distintas épocas de siembra sobre el crecimiento y producción del arroz en diferentes regiones de Cuba (Alfonso e Iglesias, 1984; Alfonso *et al.*, 1989).

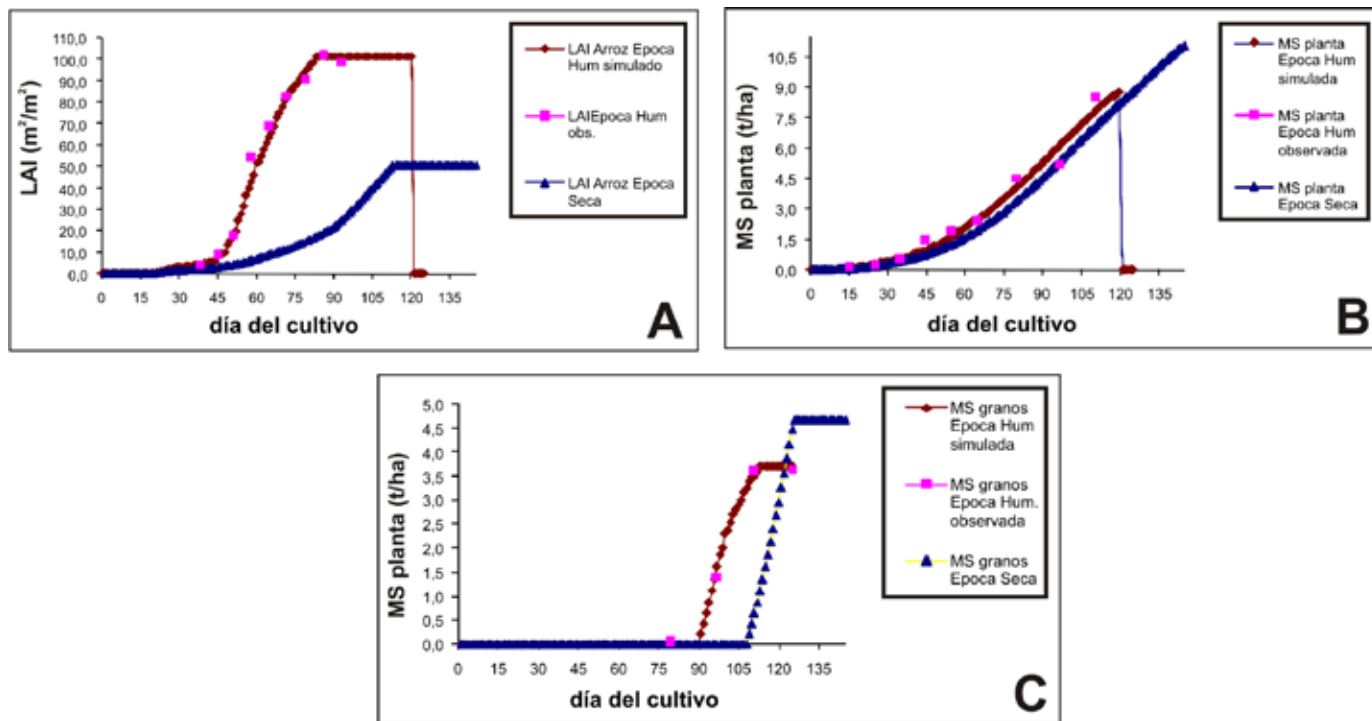


FIGURA 2. Comparación de los valores simulados utilizando el fichero de cultivo del arroz con los valores observados en la campaña de primavera o época húmeda de las variables: A – Índice de Área Foliar, LAI; B- Materia Seca en la planta (MS planta); C- Materia Seca en los granos (MS granos).

En sentido general se puede decir que el fichero de cultivo definido en el proceso de optimización predice adecuadamente el incremento para esta campaña de primavera del crecimiento foliar del cultivo (Figura 2A), dado el aumento de las temperaturas y las precipitaciones, así como los menores valores de producción de materia seca en planta y en grano (Figuras 2B y 2C).

Los resultados de la comparación estadística de las simulaciones para esta campaña con los valores observados (Tabla 2b) demuestran la significación de la validación de los parámetros del cultivo optimizados anteriormente y los definen como

validos para ser utilizados en la simulación del crecimiento y producción del cultivo del arroz en las condiciones de suelo, clima y manejo del sur de La Habana.

CONCLUSIONES

- La optimización de los parámetros del modelo STICS relacionados con los valores máximos del LAI y la velocidad de crecimiento foliar, la eficiencia de conversión máxima de la radiación en las diferentes fases del cultivo, la producción de granos por gramo de materia seca y los índices de acumula-

ción de carbono y nitrógeno, permitieron definir los valores propios del fichero de cultivo del arroz para las condiciones de suelo, clima y manejo del sur de La Habana.

- El nuevo fichero de cultivo definido como resultado de este trabajo STICS-Arroz (arz.plt) resume las características generales del cultivo del arroz y las particularidades de la duración de los estados de desarrollo de la variedad estudiada (J-104). A partir de este fichero puede trabajarse la optimización de parámetros particulares que varíen para otras variedades del cultivo del arroz.
- Los resultados de la validación de este fichero en la simulación del crecimiento y producción del cultivo del arroz en una época de siembra diferente (campaña de primavera

o época húmeda) y con un manejo del riego diferenciado demuestran la significación de los parámetros del cultivo optimizados y los definen como válidos para ser utilizados en la simulación del crecimiento y producción del cultivo del arroz en las condiciones de suelo, clima y manejo del sur de La Habana.

- No obstante, para la completa validación del modelo con respecto a sus potencialidades para la predicción de estrategias de manejo del agua en este cultivo, se hace necesario realizar observaciones de campo de las variables relacionadas con el almacenamiento del agua en la zona radical y el consumo del agua por las plantas y esto debe comprenderse en la continuidad del trabajo de investigación-validación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSO, R.; J. IGLESIAS: "Resultados preliminares de la tolerancia a la sequía en líneas y variedades de arroz". *Ciencias Técnicas en la Agricultura, Arroz*, 7(1): 93-108, 1984.
- ALFONSO, R., B. CAMARA; M. SANTIESTEBAN: Comportamiento de nueve variedades comerciales y pre comerciales de arroz bajo condiciones de sequía, *Ciencias Técnicas en la Agricultura. Arroz*, 12(2): 13-20, 1989.
- BRISSON, N.; M. BRUNO; P. GATE; F. RUGET; F. DEVIENNE; B. NICOUILLAND; R. ANTONIOLETTI; S. RECOUS; X. TAYOT; D. PLENET; C. DURR; G. RICHARD; N. BEAUDOIN; J.M. MACHET; R. DELÉCOLLE: *Notice utilisateur, Modèle STICS*, 35pp., INRA, AGPM-Agrotransferts-CETIOM-CIRAD-ITCF, France, 1997.
- BRISSON, N.; M. BRUNO; P. GATE; F. RUGET; F. DEVIENNE; B. NICOUILLAND; R. ANTONIOLETTI; S. RECOUS; X. TAYOT; D. PLENET; C. DURR; G. RICHARD; N. BEAUDOIN; J.M. MACHET; R. DELÉCOLLE: *Analyses de Sensibilisât du Modèle STICS*, INRA, AGPM-Agrotransferts-CETIOM-CIRAD-ITCF, France, 2000.
- CUBA, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DEL ARROZ: *El cultivo del arroz en Cuba: caracterización del programa popular del arroz, en las provincias centrales*, IIA-MINAG, La Habana Cuba, 2002.
- CUBA, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DEL ARROZ: *Breve descripción de la situación del cultivo del arroz en Cuba*, IIA-MINAG, La Habana, Cuba, 2003.
- CUBA, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DEL ARROZ: *Instructivo Técnico del Cultivo del Arroz*, 30pp., MINAG, La Habana, Cuba, 2005.
- CUBA, INSTITUTO DE SUELOS, MINAG: *Nueva versión de la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba*, 102pp., Editorial Academia, La Habana, 1996.
- JONES & BOOTE: *Los Modelos de Cultivo DSSATy sus Usos*, ABE6933/AGR 6932, Universidad de la Florida, Gainesville, EE.UU., 2007.
- LÓPEZ, T.; F. GONZÁLEZ; G. CID: *Factibilidad del uso de modelos de simulación de crecimiento en la definición de estrategias para el riego deficitario en los cultivos de Maíz y Frijol en suelo Ferralítico del sur de La Habana*, Informe final del Proyecto 06-02 del P.R. Riego y Drenaje, MINAG, La Habana, Cuba, 2000.
- LÓPEZ, T.; F. GONZÁLEZ; G. DUEÑAS; G. CID; Y. CHATERLÁN: *Simulación del flujo del agua en la zona no saturada para la región del sur de La Habana*, Informe final del proyecto 01-11 del Programa Ramal del Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas (CENHICA), IRH, La Habana, Cuba, 2002.
- LÓPEZ, T.; F. GONZÁLEZ; G. DUEÑAS; G. CID; Y. CHATERLÁN: *Mejoramiento del manejo del agua y la fertilización nitrogenada en suelos Ferralíticos del sur de La Habana*. Informe final sub proyecto 11-06 del Programa Ramal de Recursos Naturales, MINAG, La Habana, Cuba, 2003.
- LÓPEZ, T.; F. GONZÁLEZ; G. DUEÑAS; H. OZIER-LAFONTAINE; J. SIERRA: "Predicción de pérdidas de agua y lixiviación de nitratos en suelos Ferralíticos Rojos cultivados bajo riego en el sur de La Habana", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(3): 1-6, 2006a.
- LÓPEZ, T.; F. GONZÁLEZ; G. DUEÑAS; Y. CHATERLÁN; G. CID; J. SIERRA; H. OZIER-LAFONTAINE: "Modelación del manejo óptimo del agua en suelos Ferralíticos del sur de La Habana", *Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(4): 37-41, 2006b.