

Aplicación del modelo de cultivos STICS a distintos sistemas de trigo

Paula Ludwig¹, Aníbal Blanco¹, Alberto Bandoni¹

¹PLAPIQUI (UNS-CONICET), Bahía Blanca, Argentina

{mludwig, ablanco, abandoni}@plapiqui.edu.ar

Resumen. El presente trabajo reporta la aplicación del modelo de cultivos STICS a diferentes sistemas de trigo típicos de la zona sudoeste de la provincia de Buenos Aires. Se ha desarrollado una implementación propia en lenguaje de programación Fortran del modelo de simulación francés STICS. Este modelo se ha adaptado a las condiciones climáticas y edafológicas de la región, con el objeto de reproducir los resultados reportados en la literatura para la localidad de Bordenabe. Los estudios realizados permiten observar una aceptable aproximación de la información experimental disponible, en particular en lo relativo a los rendimientos obtenidos frente a distintas estrategias de fertilización.

Abstract. This work reports the application of the STICS model to different typical wheat systems in southwest of Buenos Aires province. An own implementation in Fortran programming language of the french simulation model STICS has been developed. This model has been adapted to the region's weather and soil conditions, in order to reproduce reported experimental evidences from Bordenabe city. It is observed an acceptable approximation of the available experimental data, particularly regarding the yield obtained under different fertilization strategies.

Keywords: Trigo, STICS, Modelos de simulación, Irrigación, Fertilización.

1 Introducción

Los modelos de cultivos son herramientas matemáticas que simulan el desarrollo de los cultivos, en función de las condiciones climáticas y del suelo, y permiten predecir su crecimiento, por ejemplo, frente a distintas estrategias de fertilización e irrigación. Poseen, en general, una gran cantidad de parámetros correspondientes a las relaciones que describen la interacción entre el cultivo, el suelo y el clima, teniendo en cuenta las prácticas agronómicas realizadas en las distintas etapas de su desarrollo.

Consisten en una serie de ecuaciones dinámicas, discretizadas habitualmente con un paso diario, que actualizan el valor de las variables de estado en función del estado anterior y de las condiciones actuales. Para detectar la etapa de desarrollo en que se encuentra el cultivo, las variables de estado se van comparando con una serie de valores umbrales, que dependen de distintos criterios agronómicos.

Este tipo de sistemas requieren de una serie de datos de entrada: registros diarios de precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas, humedad, velocidad del viento, radiación, etc., así como las decisiones de tipo cultural relacionadas con las políticas de irrigación y fertilización si las hubiera.

Los modelos de cultivo son de gran utilidad en agronomía, donde la interacción entre el suelo, el clima y las decisiones de manejo determinan el crecimiento del cultivo influyendo en el rendimiento obtenido. Estos modelos permiten estudiar de manera detallada estas interacciones, con el objetivo de tomar decisiones sobre la base de la información que ofrecen.

Dependiendo del uso que se les quiera dar, permiten predecir el desarrollo y crecimiento del cultivo bajo condiciones particulares, calcular los requerimientos de agua para obtener rendimientos aceptables o comparar los resultados obtenidos por el empleo de distintos fertilizantes.

Definiendo una función objetivo de tipo económica, es posible emplear el modelo de simulación para optimizar el rendimiento del cultivo, a través del diseño de un plan de irrigación y/o fertilización, buscando maximizar la ganancia obtenida, como se reporta, por ejemplo, en [1], [2] y [3].

Otra alternativa es su utilización para cuantificar el impacto ambiental de ciertas prácticas agronómicas mediante indicadores ambientales, por ejemplo asociados al empleo de fertilizantes [4].

Debido a su versatilidad, se les pueden acoplar módulos de simulación con fines específicos, como por ejemplo para el estudio de intercropping o modelos hidrológicos.

Finalmente, también desempeñan un rol como herramienta educativa, para mejorar el entendimiento integral del sistema planta-suelo-clima y sus posibles interacciones con las decisiones humanas.

Existe una gran cantidad de modelos de cultivos disponibles en la literatura. Entre los más populares se encuentran: [5], [6], [7] y [8]. En este trabajo se adoptó el modelo STICS [6] por considerarse uno de los más completos en términos de número de procesos que considera y por estar muy bien documentado por parte de sus desarrolladores.

El objetivo de este trabajo es adaptar el modelo STICS a las condiciones climáticas y edafológicas de la localidad de Bordenabe (provincia de Buenos Aires) y estudiar su capacidad de aproximación de la información experimental disponible, en particular en lo que respecta a los rendimientos obtenidos frente a distintas estrategias de fertilización. Finalmente se reportan resultados correspondientes a estudios hipotéticos considerando la potencial irrigación de dicho sistema

2 Metodología

2.1 Modelo STICS

El modelo de cultivos utilizado en este trabajo es el simulador STICS ([6], [9]), del cual se ha desarrollado una implementación propia en lenguaje de programación Fortran. El modelo STICS consiste en una serie de ecuaciones agrupadas en módulos que calculan la evolución diaria de las distintas variables de estado, en función de condiciones externas y de su valor acumulado.

Los distintos módulos representan los procesos que tienen lugar en el sistema suelo-planta y su interacción con las condiciones climáticas y las prácticas agronómicas. El crecimiento del cultivo se mide en términos de la biomasa generada, la cual se calcula a partir de una serie de índices que rigen la dinámica del sistema. Específicamente, el índice de área de hoja y el de área de hoja senescente se utilizan para calcular la radiación interceptada y, por su intermedio, el incremento de biomasa.

A medida que aumenta el tiempo termal, el cultivo alcanza diferentes etapas de desarrollo, con distintos requerimientos de agua, siendo más sensible al estrés hídrico en el período entre el día en que alcanza el máximo índice de área de hoja y el día en el cual finaliza el paso crítico para el aborto del grano. Para el caso del trigo, el cultivo presenta las siguientes etapas de desarrollo:

1. Siembra
2. Germinación
3. Emergencia
4. Máxima aceleración del crecimiento de hoja
5. Inicio etapa crítica para el número de granos
6. Máximo índice de área de hoja
7. Inicio del relleno del grano
8. Madurez fisiológica
9. Cosecha

El modelo requiere el cálculo del día en que se producen los cambios de etapas, ya que algunos parámetros presentan distintos valores, dependiendo del estado de desarrollo del cultivo.

En la Fig. 1 se muestra una representación esquemática del modelo STICS y sus distintos módulos y en la Fig. 2 se explica con más detalle las variables intervinientes en cada módulo y su incidencia sobre los restantes.

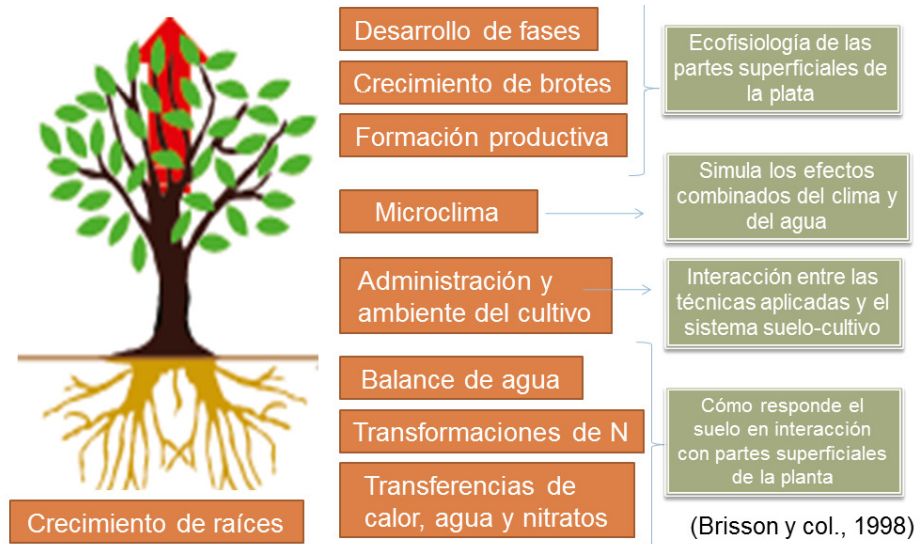


Fig. 1. Esquema del modelo STICS

Módulos del modelo de cultivo STICS

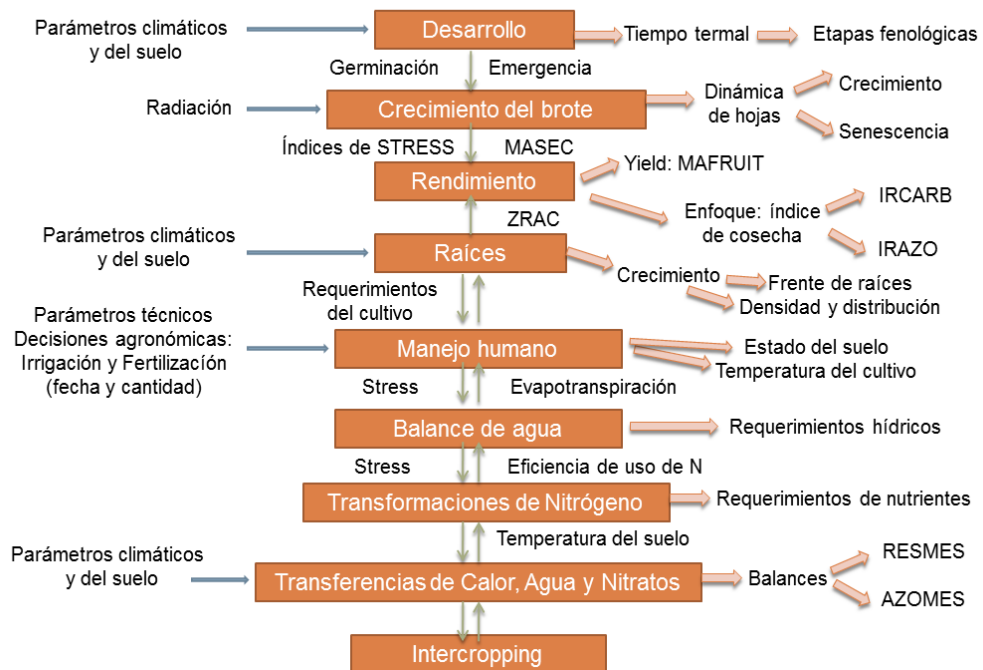


Fig. 2. Módulos del modelo de cultivo STICS

Entre los factores climáticos, se tienen en cuenta los perfiles de temperatura mínima y máxima, la radiación, la evapotranspiración y las precipitaciones. Todas estas variables traen aparejadas un grado significativo de incertidumbre en sus valores.

El suelo se describe como una serie de capas horizontales, cada una de las cuales está caracterizada por su contenido de agua. El espesor de estas capas está relacionado con la profundidad de las raíces a lo largo del tiempo, la cual determina la porción de suelo en el que la planta puede extraer agua.

Para describir la influencia del aporte de agua se emplean funciones de “reducción” destinadas a representar el efecto del estrés hídrico en el crecimiento y desarrollo del cultivo. Para estimarlo se considera la relación diaria entre la transpiración real y la potencial y sobre su base se calculan los factores de reducción que afectan los índices de área de hoja, de cosecha y biomasa, y por lo tanto el rendimiento y la producción.

El balance de agua tiene en cuenta las pérdidas de agua por evaporación y transpiración del cultivo, la cantidad de agua acumulada en el suelo y el aporte de agua por precipitaciones e irrigación. Para calcular los requerimientos de agua se considera la capacidad de la planta para extraer el agua del suelo a través de las raíces y la cantidad realmente disponible de agua en cada capa.

El balance de nutrientes tiene en cuenta los distintos procesos de transformación de nitrógeno: mineralización, inmovilización, nitrificación, volatilización, desnitrificación, lixiviado y absorción de nitrógeno por parte del cultivo. Los aportes de nutrientes provienen del fertilizante, de los residuos empleados y otras fuentes de menor incidencia, como el contenido de minerales en el agua de lluvia o irrigación.

El suministro de agua al sistema tiene en cuenta los aportes de agua por lluvias y por irrigación, admitiendo esta última una manipulación para diseñar diferentes planes de riego. De igual manera, es posible manipular el aporte de nutrientes por fertilización de manera tal de optimizar los rendimientos.

A continuación se detallan algunas de las variables y parámetros más significativos para dar una idea de las prestaciones del modelo, dado que por razones de espacio es imposible reproducirlo en detalle en su totalidad. Se recomienda al lector interesado consultar la referencia [9].

En la Tabla 1 se proporciona la descripción de algunas de las principales variables de estado del modelo y en la Tabla 2 la de sus parámetros junto con los valores correspondientes. En la Tabla 3 se definen los datos de entrada empleados en este estudio. Se utilizan en general los parámetros proporcionados en [9], ajustados para un modelo de crecimiento de trigo. Los datos edafológicos y climáticos fueron obtenidos de distintas fuentes para representar el caso de estudio reportado por Galantini y col. [10] para el área de Bordenabe, en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires.

Tabla 1: Algunas variables de estado del modelo

Variable	Descripción
UDEVCULT(d)	Tiempo termal desde la emergencia hasta el día d [°C día]
LAI(d)	Índice de área de hoja en el día d

ZRAC(d)	Profundidad de las raíces en el día d [cm]
MASEC(d)	Biomasa sobre el suelo en el día d [ton/ha]
IRCARB(d)	Índice de cosecha de carbono en el día d
IRAZO(d)	Índice de cosecha de nitrógeno en el día d
TCULT(d)	Temperatura del cultivo en el día d [°C]
TSOL(d)	Temperatura del suelo en el día d [°C]

Tabla 2: Algunos parámetros ajustables en el modelo:

Parámetro	Valor	Descripción
AWBSg	15.4	Parámetro dependiente del tipo de residuo orgánico
CODEFERTt	1	Código que define el tipo de fertilizante
COEFBg	0.0815	Parámetro que define el efecto de la radiación sobre la eficiencia de conversión
DAFs	1.3	Densidad aparente de tierra fina [g/cm ³]
DENSITet	227	Densidad de siembra [granos/m ²]
FTEMRg	0.103	Parámetro del efecto térmico en la mineralización de residuos [1/K]
IPLTt	181	Día juliano de siembra
NORGs	0.14	Contenido de nitrógeno del suelo en la capa superior [%]
PRODENTs	20	Espesor de la capa denitrificadora [cm]
PROFHUMs	30	Espesor de la capa activa para la mineralización [cm]
TRG	0.48	Radiación global que afecta al cultivo [MJ/m ² día]
WHg	0.105	Cociente N/C de materia orgánica humificada
YRESg	0.62	Coefficiente de partición para mineralización de residuos

Tabla 3: Algunas variables de entrada del modelo

Variable	Descripción
TMIN(t)	Temperatura mínima del aire en el día d [°C]
TMAX(t)	Temperatura máxima del aire en el día d [°C]
RAD(t)	Radiación solar en el día d [MJ/m ²]
ETP(t)	Evapotranspiración potencial en el día d [mm]
TRR(t)	Lluvias en el día d [mm]
AIRG(t)	Cantidad de irrigación en el día d [mm]
ANIT(t)	Cantidad de fertilizante aplicado en el día d [kg N/ha]
TVENT(t)	Velocidad del viento [m/s]

2.2 Validación: Trigo en la localidad de Bordenabe – año 1998

El modelo STICS ha sido aplicado a un caso de estudio con Trigo, representando las condiciones típicas del Sudoeste Bonaerense, particularmente tomando datos de estudios realizados en la localidad de Bordenabe, provincia de Buenos Aires [10].

En la Fig. 3 se muestran los perfiles de precipitaciones y evapotranspiración correspondientes al año de estudio (datos tomados de los registros históricos de la estación meteorológica INTA Bordenabe).

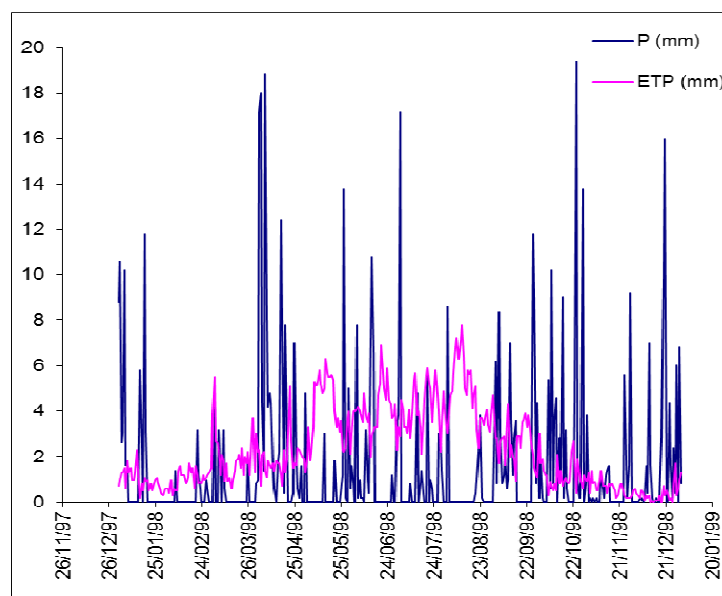


Fig 3. Perfiles de entrada correspondientes a lluvias y evapotranspiración.

Una descripción detallada del clima y las condiciones del suelo del lugar puede encontrarse en [10].

Los parámetros han sido elegidos en función de las características propias del lugar. La variedad de trigo empleada en el estudio es la denominada Cochicó – INTA (ciclo intermedio), tomando como fecha de siembra el 30 de junio de 1998. Se han empleado los siguientes valores de referencia de algunas propiedades químicas de los suelos de la región: MOT (%) = 3.62, Nt (%) = 0.296 y pH = 7.0 [10].

Para validar el modelo se propuso reproducir los valores de la producción de materia seca total aérea (kg/ha) y de su correspondiente contenido de Nitrógeno (kg/ha) durante el ciclo del trigo en dos secuencias diferentes: Trigo-Trigo y Trigo-Pastoreo, y en dos modos culturales: fertilizado y no fertilizado (Tabla 4). Para los casos con fertilización, la dosis de fertilizante corresponde a 37 kg P₂O₅/ha y 64 kg N/ha, al momento de la siembra.

Los resultados se reportan para diferentes estadios del cultivo expresados de acuerdo a la escala de Feekes.

Tabla 4: Comparación de los valores obtenidos con el modelo con respecto a los experimentales para Trigo-Trigo (TT) y Trigo-Pastoreo (TP)

Rota- ción	Fertiliza- ción	Escala de Feekes	Materia seca (kg/ha)			Contenido de N (kg/ha)		
			Ref [10]	Modelo	Error %	Ref [10]	Modelo	Error %
TT	No fertili- zado	2	72	69	0,03	2,9	2,8	0,001
		5-6	492	476	0,16	15,1	14,5	0,006
		10	1985	1945	0,4	29,6	28,3	0,013
		10.5.4	4498	4434	0,64	38,2	37,6	0,006
		11.4	4567	4493	0,74	37,3	36,8	0,005
	Fertiliza- do	2	104	101	0,03	5,4	5,1	0,003
		5-6	868	833	0,35	28,6	28,1	0,005
		10	4479	4422	0,57	73,5	73,1	0,004
		10.5.4	5778	5711	0,67	61,2	60,8	0,004
		11.4	7614	7544	0,7	70,3	69,9	0,004
TP	No fertili- zado	2	53	50	0,03	2,2	1,9	0,003
		5-6	604	589	0,15	18,0	17,1	0,009
		10	2084	2023	0,61	27,9	27,1	0,008
		10.5.4	4759	4702	0,57	41,6	40,9	0,007
		11.4	4725	4622	1,03	40,4	39,1	0,013
	Fertiliza- do	2	52	49	0,03	2,6	2,1	0,005
		5-6	812	798	0,14	27,7	27,1	0,006
		10	3623	3589	0,34	58,8	57,9	0,009
		10.5.4	4984	4911	0,73	59,9	59,1	0,008
		11.4	5462	5377	0,85	49,9	48,7	0,012

La comparación entre los datos experimentales y las simulaciones con el modelo STICS adaptado a las condiciones locales, muestran un razonable ajuste, como puede observarse en las columnas Error %. La aceptable predicción obtenida alienta el empleo del modelo desarrollado para el estudio de diferentes escenarios.

En la siguiente sección se presentan estudios de simulación para analizar los rendimientos que se pueden llegar a obtener frente a distintas estrategias de irrigación y fertilización.

3 Resultados

Para estudiar el comportamiento del modelo en modo predictivo se planteó la posibilidad de irrigar el sistema descripto. A continuación se comparan los siguientes escenarios: (i) con aporte de agua por lluvias únicamente (escenario A) y (ii) con aporte de agua por lluvias e irrigación (escenario B), para los modos culturales analizados en la sección anterior: con y sin fertilización (Casos 1 y 2, respectivamente). Para los casos con fertilización, la dosis de fertilizante corresponde a 37 kg P₂O₅/ha y 64 kg N/ha, al momento de la siembra. En el caso con irrigación, se adoptó arbitrariamente con fines ilustrativos un plan de irrigación consistente en el suministro de una cantidad total de

agua de 109 mm, aplicada en momentos estratégicos durante las fases más sensibles al estrés hídrico, de acuerdo al detalle de la Fig. 4. En todos los casos, el aporte de agua por precipitaciones corresponde al perfil proporcionado en la Fig. 3.

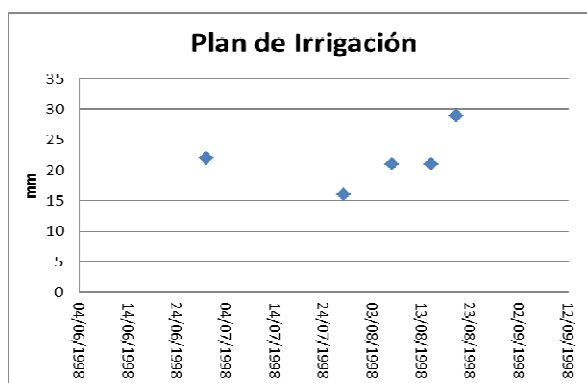


Fig. 4. Plan de irrigación empleado en las simulaciones.

Los rendimientos obtenidos en ambos casos sin irrigación (escenario A) se presentan en la Tabla 5 y con irrigación (escenario B) en la Tabla 6. El escenario sin irrigación, corresponde al caso base descrito en la sección 2.2 (Tabla 4). En la Tabla 5 se reportan únicamente los valores simulados de la Tabla 4. En coincidencia con lo esperado y con la evidencia experimental reportada en [10], se pueden observar incrementos en los rendimientos finales por la aplicación del fertilizante.

Tabla 5: Comparación de rendimientos obtenidos para los casos sin irrigación (escenario A).

Variabes	Caso 1 (fertilizado)	Caso 2 (sin fertilizar)
Materia seca grano[kg/ha]	3078	1825
Materia seca cosechada[kg/ha]	7544	4493
Contenido N[kg/ha]	69.9	36.8

Al analizar los rendimientos obtenidos en los casos con irrigación (Tabla 6), se puede observar un incremento en los valores finales de materia seca y contenido de nitrógeno, frente a los correspondientes sin irrigación.

Tabla 6: Comparación de rendimientos obtenidos para los casos con irrigación (escenario B).

Variabes	Caso 1 (fertilizado)	Caso 2 (sin fertilizar)
Materia seca grano[kg/ha]	3289	2107
Materia seca cosechada[kg/ha]	8794	5376
Contenido N en mat. seca[kg/ha]	75.6	42.5

En el caso 1 (con fertilización), la materia seca cosechada asciende a 8794 kg/ha, mientras que sin irrigación se obtienen 7544 kg/ha. En el caso 2 (sin fertilización), se

pasa de valores finales de materia seca cosechada de 4493 kg/ha sin irrigación a 5376 kg/ha con irrigación. Este aumento en la producción se debe únicamente al aporte de agua en momentos críticos para el desarrollo del cultivo (Fig. 4), ya que el resto de las variables no han sido modificadas a fin de poder estimar el efecto de la irrigación artificial.

4 Conclusión

En este trabajo se realizó una validación preliminar del modelo STICS aplicado a un sistema de trigo de la zona semiárida de la provincia de Buenos Aires y se efectuó un ejercicio de simulación tendiente a identificar los posibles beneficios de aplicar irrigación artificial.

Al analizar los resultados obtenidos es posible concluir que el modelo empleado, adecuadamente parametrizado para el sistema bajo estudio, puede predecir aceptablemente el efecto de la fertilización con respecto a la evidencia experimental [10], así como reproducir las tendencias esperadas por aplicación de irrigación artificial.

Se entiende, por lo tanto, que el modelo puede ser de utilidad para estudiar estos sistemas de producción frente a diferentes escenarios climáticos y diversas prácticas culturales. Aunque no es posible predecir las condiciones climáticas con exactitud en un horizonte prolongado, la utilización de estas herramientas proporciona una gran cantidad de información útil para guiar el proceso de toma de decisiones agronómicas.

En trabajos futuros se planea aplicar el modelo STICS, acoplado a un optimizador estocástico, al diseño de estrategias óptimas de irrigación y fertilización con respecto a indicadores económicos e incluyendo la componente ambiental, en particular la incidencia de la sobrefertilización sobre la contaminación de suelos y aguas.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por las siguientes instituciones: Universidad Nacional del Sur (UNS) y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Referencias

1. Bergez J. E., F. García and L. Lapasse: A Hierarchical Partitioning Method For Optimizing Irrigation Strategies; *Agricultural Systems*, 80 Pp. 235-253. (2004)
2. Ludwig, M. P., Blanco, A.M., Bandoni, J.A: Planeamiento operativo de la irrigación de cultivos mediante la aplicación de algoritmos genéticos. Congreso Argentino de Agrolinformática (2011)
3. Ortega, J.F., J. A. de Juan, J. M. Tarjuelo, E. López: MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management. *Irrig. Sci*, 23 Pp. 61-75. (2004)

4. Peña-Haro, S., Llopis-Albert, C., Pulido-Velazquez, M. Pulido-Velazquez, D.: Fertilizer standards for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture: El Salobral-Los llanos case study, Spain. *Journal of Hydrology*, 392 pp 174–187 (2010)
5. Bergez J. E., P. Debaecke, J. M. Deumier, B. Lacoix, D. Leenhardt, P. Leroy, D. Wallach: MODERATO: An Object-oriented Decision Tool for Designing Maize Irrigation Schedules; *Ecological Modeling*, 137 Pp. 43-60. (2001)
6. Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Baret, F. Bussiére: STICS: a Generic Model for the Simulation of Crops and their Water and Nitrogen Balances. I. Theory and Parameterization Applied to Wheat and Corn; *Agronomie*, 18 Pp. 311-346. (1998)
7. Wallach D., B. Goffinet, J. E. Bergez, P. Debaecke, D. Leenhardt and J. N. Aubertot: Parameter Estimation for Crop Models: A New Approach and Application to a Corn Model, *Agronomy Journal*, 93 (4) pp 757-766. (2001)
8. Williams, J. R., C. A. Jones, J. R. Kiniry, D. A. Spal: The EPIC Growth Model, *Trans. American Soc. Agric. Eng.*, 32 Pp. 479-511. (1989)
9. Brisson, N., M. Launay, B. Mary, N. Beaudoin: Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model. *Editions Quae*, p. 297. (2008)
10. Galantini, J. A., Landriscini, M. R., Rosell, R. A.: Patrones de acumulación, balance y partición de nutrientes en diferentes sistemas de producción con trigo. *Ría*, 29 Pp. 99-112. (2000)