

Planeamiento operativo de la irrigación de cultivos mediante la aplicación de algoritmos genéticos

M. P. Ludwig, A. M. Blanco, J. A. Bandoni

PLAPIQUI (UNS-CONICET), Bahía Blanca, Argentina

Resumen

El planeamiento en el tiempo de la dosificación de agua a los suelos cultivados es un problema de gran importancia estratégica para asegurar una actividad agronómica sustentable, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental. En este trabajo se estudia el planeamiento operativo de la irrigación de cultivos, con el objetivo de maximizar el beneficio de la unidad productiva sujeta a restricciones de disponibilidad del recurso agua. Específicamente se aborda el problema de diseño de estrategias óptimas de irrigación, haciendo uso de algoritmos genéticos para explorar el extenso espacio de búsqueda y de un modelo de crecimiento de cultivo para simular la interacción entre las variables.

Se consideran como variables de optimización el agua aportada por irrigación cada día del horizonte de planeamiento (mm/ha). Se asume en un primer caso que es posible aportar cualquier cantidad de agua en cualquier periodo de tiempo y en un segundo estudio la posibilidad de regar únicamente una vez por semana. Asimismo, para cada caso se han planteado dos posibles escenarios: uno con aporte de agua por precipitaciones y otro que representa un año de sequía. Los resultados obtenidos muestran la importancia de considerar los efectos de las precipitaciones y de la irrigación artificial sobre los beneficios netos de la actividad agronómica.

Abstract

Planning in the time of the water application to cultivated lands is a problem of great strategic importance to assure a viable agronomic activity, from an economic and environmental point of view. The operative planning of crops irrigation is studied in this work, in order to maximize the productive unit profit subject to restrictions of water availability. Specifically, the design of optimal irrigation strategies is addressed, using genetic algorithms to explore the extensive search space and a crops growth model to simulate the interaction between the variables of interest.

The amount of water contributed by irrigation (mm/ha) every day of the planning horizon is considered as optimization variable. In a first case it is assumed that is possible to supply any amount of water in any period of time and a second study assumes the possibility of watering solely once per week. In addition, for each case two possible scenarios have been considered: one with water contribution by precipitations and another that represents a year of drought. Obtained results show the importance of considering the effect of the rain and the irrigation on the net benefits of the agronomic activity.

Palabras Clave

Planeamiento optimo, Modelos de cultivos, Irrigación, Algoritmos Genéticos.

Introducción

Por sus implicancias medioambientales, la administración eficiente del agua es uno de los mayores desafíos de la sociedad moderna, en particular para el sector agroalimentario, uno de los principales demandantes de este recurso.

A la hora de estimar los requerimientos de agua para la irrigación de los cultivos se deben tener en cuenta tres aspectos fundamentales, los cuales plantean perspectivas opuestas que requieren ser sopesadas al momento de la toma de decisiones [1]: i) desde el punto de vista del crecimiento del cultivo se debe minimizar el estrés hídrico, especialmente durante las primeras etapas de desarrollo, ii) se debe evitar la acumulación de químicos usualmente transportados por el agua (sales, pesticidas, etc.) en la zona radicular, iii) para minimizar la cantidad de agua asignada a riego es necesario realizar un empleo eficiente del agua disponible, mediante el cálculo de la precipitación efectiva.

Por estas razones, el planeamiento en el tiempo de la dosificación de agua a los suelos es un problema de gran importancia estratégica para asegurar una actividad agronómica sustentable, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

Para estimar la cantidad de agua necesaria para un adecuado desarrollo del cultivo se han desarrollado distintos modelos que reproducen el comportamiento del sistema vegetal frente a diferentes condiciones climáticas, características del suelo y otros parámetros externos. Los “modelos de cultivos” son esencialmente modelos biofísicos que permiten calcular el crecimiento del cultivo en función del agua y fertilizante proporcionados, teniendo en cuenta sus necesidades a lo largo de las diferentes etapas de desarrollo.

Existe una gran cantidad de modelos de cultivos disponibles en la literatura. Entre los más populares se encuentran: [2], [3] y [4].

Estos modelos de simulación, vinculados a sistemas de optimización de gran escala, permiten, en teoría, calcular estrategias óptimas de dosificación de agua y fertilizantes, tanto en el tiempo como en el espacio. Concretamente se busca responder preguntas del tipo [5]: cuándo iniciar la irrigación?; cuándo detener la irrigación?; cómo tener en cuenta las lluvias?; qué volúmenes de agua / fertilizante aplicar en cada periodo?. Se persigue maximizar el beneficio neto de la producción del cultivo (ganancias menos costos), mientras se satisface restricciones físicas (capacidades de los sistemas de riego, disponibilidad de agua, etc.) y medioambientales (nivel de contaminantes en aguas subterráneas, niveles de salinidad y nutrientes de los suelos, etc.).

Si bien existe una amplia literatura sobre modelos de cultivos, su empleo en el proceso sistemático de toma de decisiones es bastante limitado. Algunos desarrollos interesantes se encuentran en: [6], [7] y [8].

Debido a la gran extensión del espacio de búsqueda y a la alta no linealidad del modelo de crecimiento del cultivo, el problema es computacionalmente complejo. Otro aspecto que dificulta el desarrollo de este tipo de sistemas es un entorno incierto, determinado esencialmente por el factor climático.

En este trabajo se abordará en particular el planeamiento operativo de la irrigación de cultivos, cuyo objetivo principal es maximizar el beneficio de la unidad productiva sujeta a restricciones de disponibilidad del recurso agua.

Para explorar el espacio de planes de irrigación se propone el empleo de un optimizador estocástico basado en un algoritmo evolutivo. De esta forma es posible manejar eficientemente la alta no linealidad de las ecuaciones que describen el crecimiento del cultivo, en particular funciones no diferenciables de tipo $\max(\cdot)$ y $\min(\cdot)$, incrementando las

chances de convergencia a óptimos globales. Para demostrar las prestaciones de la metodología propuesta se empleará un modelo de cultivo para cereales obtenido de literatura.

Elementos del Trabajo y Metodología

El modelo de simulación de cultivo utilizado es el propuesto en [2] y extendido en [9]. A continuación se lo describe brevemente y se lo reproduce en forma completa en el apéndice de este trabajo.

En la Tabla 1 se proporciona la descripción de las 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 [2], ajustados para un modelo de crecimiento de maíz, correspondiente a un caso de estudio desarrollado en el área de Toulouse, en el sudoeste de Francia. En las figuras 1 y 2 se representan los perfiles de las variables climáticas que requiere el modelo.

Modelo matemático

El modelo de simulación de cultivos consiste en una serie de ecuaciones agrupadas en módulos que calculan la evolución diaria de las distintas variables de estado, en función de las condiciones externas y de su valor acumulado.

Los distintos módulos representan el funcionamiento dinámico del sistema suelo-planta y su interacción con las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas. 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. 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.

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 4 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 define la profundidad del suelo en el cual la planta puede extraer agua.

Para describir la influencia del aporte de agua se emplean funciones de “reducción” que intentan representar el efecto del estrés hídrico en el crecimiento y desarrollo del cultivo. Para medirlo se considera la relación diaria entre la transpiración real y la potencial, en base a esta relación se calculan los factores de reducción que afectan los índices de área de hoja, de cosecha y biomasa, los que afectan a su vez 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 de suelo.

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, donde el índice de cosecha se ve afectado por la reducción del aporte de agua. El cultivo presenta 7 etapas de desarrollo:

1. Siembra
2. Emergencia
3. Máximo índice de área de hoja
4. Florecimiento
5. Fin del paso crítico para el aborto del grano
6. Inicio de la rápida senescencia de las hojas
7. Madurez

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. Para ello se denotan con los subíndices del 1 al 7 a aquellos días en los cuales el cultivo pasa de una etapa a la siguiente. La producción obtenida se calcula como el producto del índice de cosecha en el d_7 (día en el cual alcanza la etapa de madurez) por la biomasa acumulada hasta esa fecha.

La necesidad de establecer comparaciones del valor actual de cada variable con respecto a un valor de referencia para determinar en qué etapa de desarrollo se encuentra el cultivo, introduce una gran cantidad de funciones discontinuas de tipo si-entonces (if-then). El suministro de agua al sistema tiene en cuenta los aportes de agua por lluvias y por irrigación, siendo éstas últimas variables que admiten manipulación para diseñar diferentes planes de riego.

Debido a la presencia de un número elevado de discontinuidades en el modelo, potenciado por una gran cantidad de variables y ecuaciones, consecuencia de la discretización diaria de la temporada agronómica, el modelo es sumamente desafiante desde el punto de vista de la optimización numérica.

En este trabajo se aplica una metodología de optimización estocástica basada en algoritmos genéticos para explorar el espacio de búsqueda de planes de irrigación, con el objetivo de optimizar el beneficio de la actividad agronómica.

Tabla 1: Variables de estado del modelo

Variable	Descripción
TT(d)	Tiempo termal desde la emergencia hasta el día d [$^{\circ}\text{C}$ día]
LAI(d)	Índice de área de hoja en el día d
FSEN(d)	Fracción de hojas senescentes en el día d
B(d)	Biomasa sobre el suelo en el día d [ton/ha]
R(d)	Profundidad de las raíces en el día d [cm]
H(d)	Índice de cosecha en el día d

S1(d)	Contenido de agua en la capa 1 del suelo en el día d [mm]
S2(d)	Contenido de agua en la capa 2 del suelo en el día d [mm]
S3(d)	Contenido de agua en la capa 3 del suelo en el día d [mm]
S4(d)	Contenido de agua en la capa 4 del suelo en el día d [mm]

Tabla 2: Parámetros ajustables en el modelo:

Parámetro	Valor	Descripción
gpm2	25.0	Peso específico de la hoja [g/m ²]
himax	0.55	Máximo índice de cosecha
inidep	10.0	Raíz inicial en la emergencia [cm]
lai0	0.0016	Índice de área de hoja en la emergencia
maxdep	130.0	Máxima profundidad de raíces [cm]
p1evap	0.075	Efecto del agua disponible en la capa 1 en la evaporación total
p1logi	0.6847	Parámetro en la ecuación logarítmica para índice de área de hoja
p1sen	0.00161	Parámetro para la expresión de fracción de área de hoja senescente
p2evap	1.2	Efecto del agua disponible en la capa 1 en la evaporación total
p2logi	0.01	Parámetro en la ecuación logarítmica para índice de área de hoja [(°C días)-1]
p2sen	6.0	Parámetro para la expresión de fracción de área de hoja senescente
p3evap	-0.3	Efecto del agua disponible en la capa 1 en la evaporación total
pke	0.125	Determina distribución de pérdidas de agua por evaporación con profundidad[cm-1]
r1hi	0.6	Efecto de la transpiración en el incremento del índice de cosecha
r1rue	1.0	Efecto de la transpiración en el incremento de biomasa
r1sf	0.60	Efecto de la transpiración en el incremento del índice de cosecha
r1tran	0.4	Efecto del agua disponible en la transpiración
r2hi	0.8	Efecto de la transpiración en el incremento del índice de cosecha
r2rue	1.0	Efecto de la transpiración en el incremento de biomasa
r2sf	0.80	Efecto de la transpiración en el incremento del índice de cosecha
r2tran	0.6	Efecto del agua disponible en la transpiración
ratedep	0.163	Tasa de crecimiento de la profundidad de las raíces [cm/(°C días)]
ratehi	0.015	Máxima tasa diaria de crecimiento del índice de cosecha [día-1]
rue1	2.8	Eficiencia de uso de radiación antes del inicio de la rápida senescencia [g/MJ]
rue2	1.5	Eficiencia de uso de radiación después del inicio de la rápida senescencia [g/MJ]
xtinc	0.70	Coeficiente de extinción para la absorción de la radiación

Tabla 3: 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]
RAIN(t)	Lluvias en el día d [mm]
IRRIG(t)	Cantidad de irrigación en el día d [mm]
SOILD	Profundidad del suelo [cm]
DENS	Densidad de plantación [plantas/m ²]
θFC1(t)	Contenido de agua a la capacidad de campo en la capa 1 [mm/mm]
θFC2(t)	Contenido de agua a la capacidad de campo en la capa 2 [mm/mm]
θFC3(t)	Contenido de agua a la capacidad de campo en la capa 3 [mm/mm]
θFC4(t)	Contenido de agua a la capacidad de campo en la capa 4 [mm/mm]
θWP1(t)	Contenido de agua al punto de marchitarse en la capa 1 [mm/mm]
θWP2(t)	Contenido de agua al punto de marchitarse en la capa 2 [mm/mm]
θWP3(t)	Contenido de agua al punto de marchitarse en la capa 3 [mm/mm]
θWP4(t)	Contenido de agua al punto de marchitarse en la capa 4 [mm/mm]

