

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	Coefficiente 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]

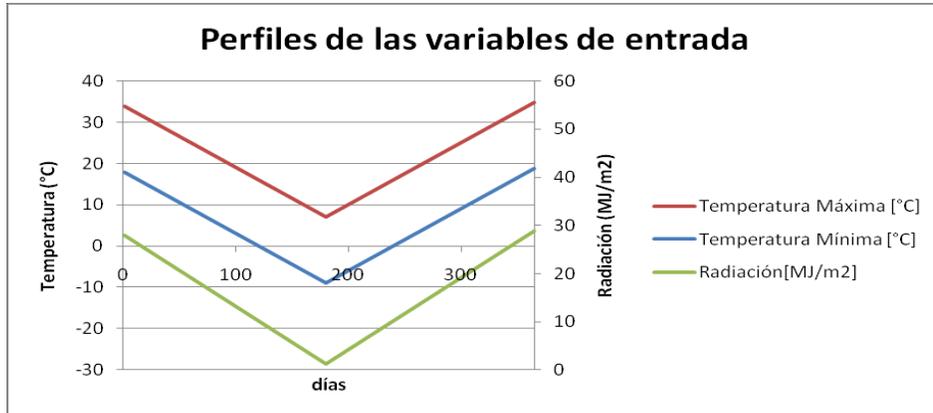


Figura 1. Perfiles de entrada de Temperaturas (Mínima y Máxima) y Radiación

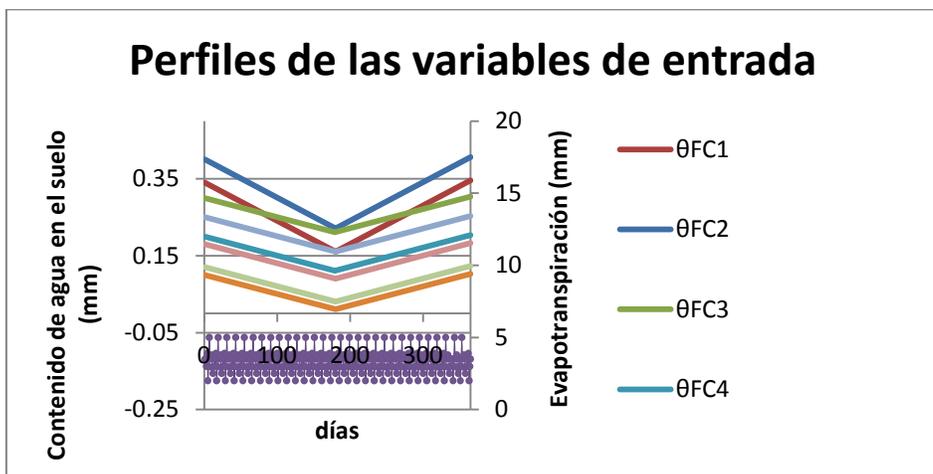


Figura 2. Perfiles de entrada de Evapotranspiración y Contenido de agua del suelo

Optimización mediante Algoritmos Genéticos

Dadas las características del sistema en estudio (presencia de discontinuidades, gran cantidad de variables y parámetros debido a la discretización diaria de la coordenada temporal, etc.) su optimización es una actividad desafiante.

Entre las estrategias disponibles, se consideran apropiadas para estos fines las técnicas estocásticas, de buenas prestaciones para modelos de las características mencionadas.

Dentro de la amplia gama de estrategias estocásticas se optó por los algoritmos genéticos, los cuales se basan en la evolución de poblaciones de individuos sobre la base de reglas inspiradas en el proceso de selección natural.

Estos métodos de búsqueda parten de una población inicial (generada de manera aleatoria), en la cual cada individuo representa un punto dentro del espacio de búsqueda del problema a resolver [10] [11]. A cada individuo se le puede asignar un valor de aptitud o “fitness” (función objetivo), de acuerdo a la calidad de la solución que aporta al problema en relación a su ambiente. La búsqueda se orienta en base a esta medición de fitness, llevando a cabo un proceso evolutivo en el cual nuevos individuos se van generando como producto de la recombinación de las soluciones existentes (cruzamiento de individuos) y de eventos

aleatorios (mutaciones), teniendo más posibilidades de mantener a lo largo de las distintas generaciones aquellas características que aportan soluciones de mejor calidad (proceso de selección).

Los individuos se caracterizan por un determinado genotipo, que representa la estructura de la información que lo caracteriza. Al contenido de información de la esta estructura se la conoce como fenotipo y varía para cada individuo. Aquellos individuos que presenten mejores características tendrán más chances de ser seleccionados para producir una nueva generación (hijos), cuyos fenotipos surgen de la combinación de la de los progenitores.

Para asignar la probabilidad de selección de un individuo en base a su función de aptitud o fitness se pueden utilizar diferentes tipos de muestreos, los cuales asignan una puntuación a cada elemento en comparación con los demás elementos de la población (aptitud relativa). Entre los principales mecanismos de muestreos estocásticos se pueden mencionar: por sorteo, por restos, universal o por ruleta y por torneos.

En cada generación, una parte de la población es sustituida por estos nuevos elementos (siguiendo ciertos criterios de aptitud), pero manteniendo constante el número de individuos que conforman la población. Además, para evitar caer en mínimos locales, se producen de manera aleatoria mutaciones, que dan lugar a individuos diferentes que exploran otras zonas de la región de búsqueda. Es posible ajustar el comportamiento del algoritmo modificando los valores de los operadores de cruzamiento y mutación, como así también el tamaño de la población y el número de generaciones, de acuerdo a la dimensión y las características del modelo en cuestión.

Resultados

El modelo descripto ha sido utilizado para optimizar el beneficio económico anual definido a través de la siguiente función objetivo a maximizar:

$$Fobjetivo = 106 * Y - 0.76 * SumIrrig$$

Donde Y es la producción en ton/ha y SumIrrig la cantidad de agua aportada por riego (mm/ha). El precio de maíz y el costo del agua corresponden al caso de estudio reportado en [9].

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el toolbox de optimización de Matlab 7.6 [11], utilizando la herramienta de algoritmos genéticos.

Se consideran como variables de optimización el agua aportada por irrigación cada día del horizonte de planeamiento (mm/ha). Se asume en un primer ejercicio (caso 1) que es posible aportar cualquier cantidad de agua en cualquier periodo de tiempo. Para obtener un escenario más realista, se asume en un segundo estudio la posibilidad de regar únicamente una vez por semana (caso 2).

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 (sin precipitaciones). El régimen de precipitaciones adoptado se muestra en las figuras 3 y 4.

Los beneficios y rendimientos obtenidos en ambos escenarios con irrigación diaria se presentan en la tabla 4 y con irrigación semanal en la tabla 5:

Tabla 4: Comparación de escenarios para el Caso1 (Irrigación diaria)

Variables	Con precipitaciones	Sin precipitaciones
SumIrrig[mm]	175.39	201.26
Y[ton/ha]	16.35	12.89
Beneficio[€/ha]	1599.80	1213.38

Tabla 5: Comparación de escenarios para el Caso2 (Irrigación semanal)

Variables	Con precipitaciones	Sin precipitaciones
SumIrrig[mm]	178.12	220.47
Y[ton/ha]	16.24	12.25
Beneficio[€/ha]	1586.07	1130.94

Los valores de la función objetivo varían frente a estas dos situaciones, obteniéndose mayores beneficios en ambos casos al tener la contribución de las lluvias, como era de esperarse.

Los resultados obtenidos muestran la importancia de considerar el costo de irrigación al calcular los beneficios netos. La ausencia de precipitaciones conlleva menores rendimientos, los cuales podrían incrementarse con aportes de agua por irrigación, pero el costo asociado a estas prácticas reduce las ganancias.

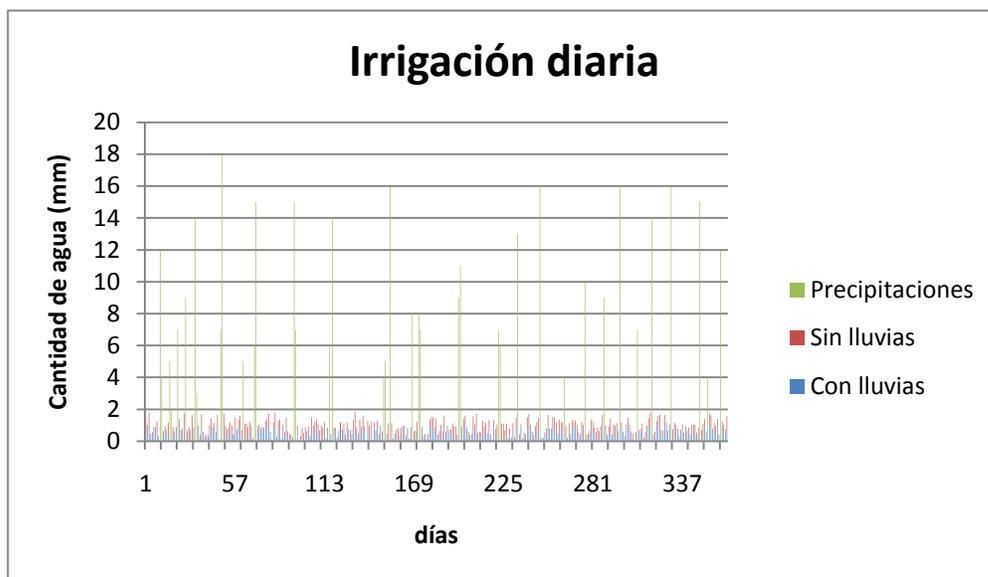


Figura 3. Comparación: Irrigación diaria en presencia y ausencia de precipitaciones

Las cantidades de agua requeridas diariamente para ambos escenarios del caso 1 se muestran en la figura 3, mientras que las cantidad de agua aportadas semanalmente para el

caso 2 se presentan en la figura 4. En ambas figuras se representa el perfil de precipitaciones adoptado.

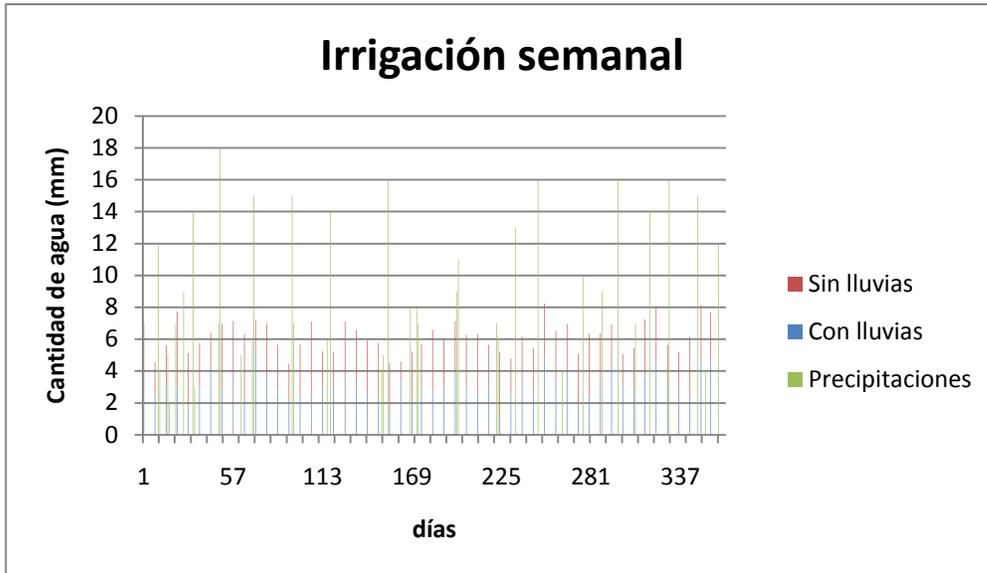


Figura 4. Comparación: Irrigación semanal en presencia y ausencia de precipitaciones

En las figuras 5 y 6 se muestran el perfil de crecimiento de la biomasa y la profundidad de las raíces, cuya evolución varía en mayor o menor grado de acuerdo a la presencia o ausencia de precipitaciones. El índice de biomasa es mucho más sensible al estrés hídrico que la profundidad de las raíces, variable que alcanza el mismo valor final para todos los casos, aunque el tiempo requerido para llegar a éste es ligeramente superior en ausencia de lluvias. Mientras que el índice de biomasa evoluciona a un valor final superior cuando no sufre el efecto de la falta de agua, lo cual repercute en el rendimiento obtenido al momento de la cosecha.

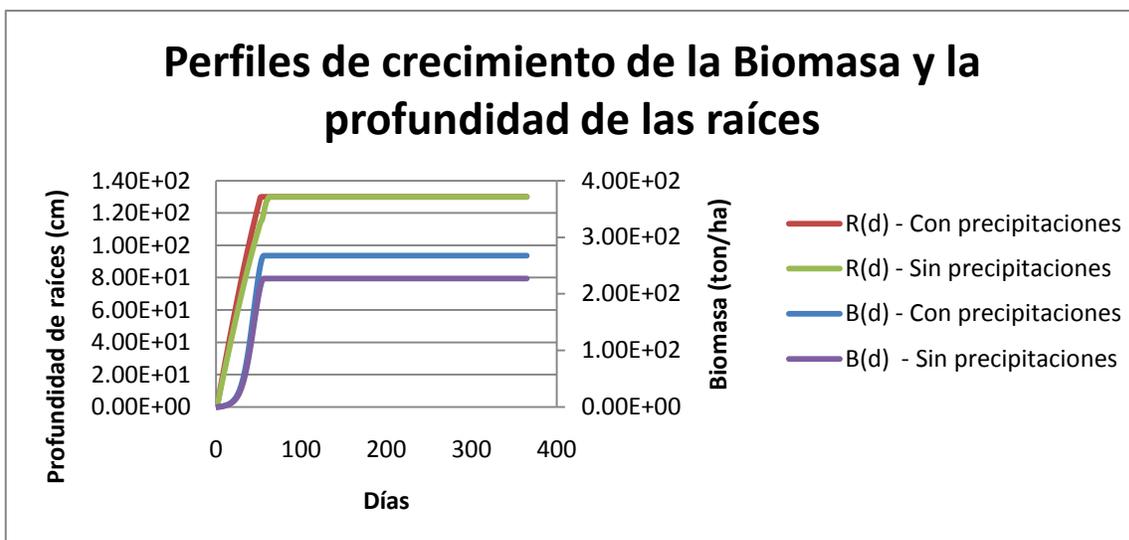


Figura 5. Evolución de algunas variables significativas en presencia y ausencia de precipitaciones para el Caso 1.

La figura 5 corresponde al Caso 1 de irrigación diaria, mientras que la figura 6 presenta los resultados obtenidos con una irrigación semanal (Caso 2).

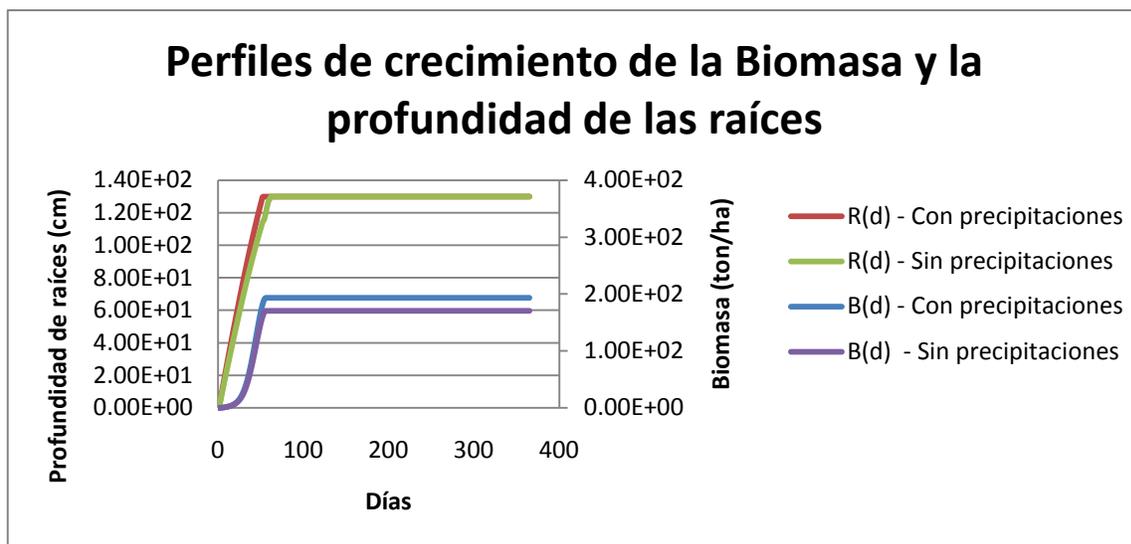


Figura 6. Evolución de algunas variables significativas en presencia y ausencia de precipitaciones para el Caso2.

Al comparar ambas figuras se observa el efecto de la disponibilidad diaria de agua para riego en la biomasa obtenida, mientras que la profundidad de las raíces no se ve afectada por la frecuencia con la cual que se produce irrigación.

En la figura 7 se presentan los perfiles de crecimiento del índice de área de hoja para cada uno de los casos estudiados (1: para irrigación diaria y 2: para irrigación semanal), en sus dos versiones (a: en presencia de precipitaciones y b: en ausencia de precipitaciones). Se obtienen los mejores resultados para el caso 1.a, seguido del caso 2.a, lo cual deja en evidencia la importancia del aporte de agua en el crecimiento del cultivo, dado que el índice de área de hoja es utilizado para medir la recepción de la radiación y llevar a cabo el proceso de fotosíntesis.

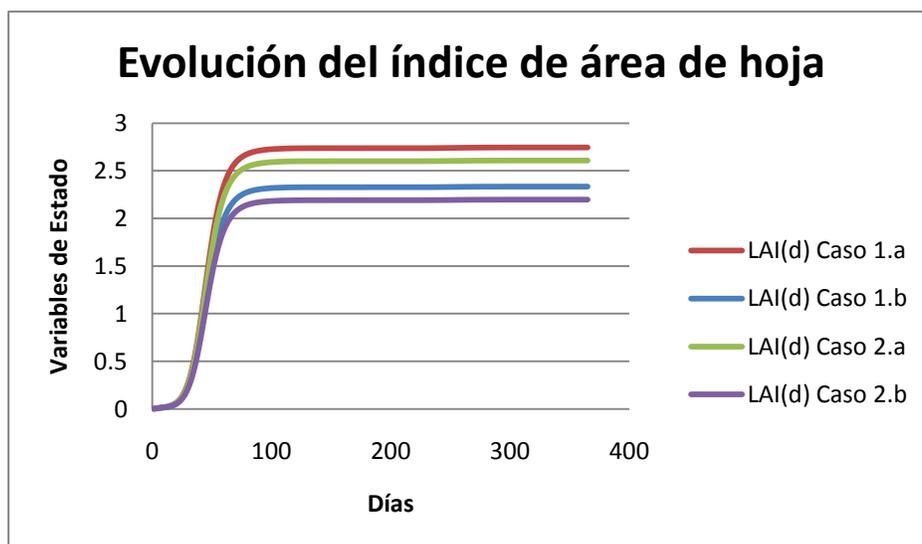


Figura 7. Perfil de crecimiento del índice de área de hoja para los casos estudiados.

Discusión

Desde el punto de vista de la resolución, las principales dificultades encontradas en el desarrollo de la metodología propuesta son la alta no linealidad presente en el modelo de cultivo y la gran extensión del espacio de búsqueda. El empleo de un optimizador estocástico que emplea algoritmos genéticos permitió manejar adecuadamente las discontinuidades generadas por las funciones no diferenciables descriptas en el trabajo, lo cual hubiera dificultado el desempeño de técnicas clásicas de optimización determinística.

Cabe mencionar además que los casos presentados en este trabajo asumen el conocimiento de las variables climáticas a lo largo de todo el horizonte de planeamiento y por lo tanto constituyen idealizaciones con el objeto de estudiar escenarios extremos, tanto en lo que respecta a la disponibilidad de agua por precipitaciones como al acceso a agua para riego. 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 a lo largo del horizonte de tiempo.

En la práctica es necesario considerar la incertidumbre en la variable climática, así como las eventuales restricciones en la disponibilidad del recurso. Para tener en cuenta estos elementos se procurará desarrollar en el futuro una metodología de planeamiento operativo para la irrigación de cultivos utilizando una estrategia basada en ideas de “control predictivo”.

Esta técnica consiste en calcular el programa de riego en un horizonte de tiempo prolongado (meses) utilizando estimaciones futuras de los principales parámetros del modelo, por ejemplo los pronósticos del tiempo. En la práctica se implementa solo la solución correspondiente a los primeros periodos (días) del horizonte considerado en los cuales la incertidumbre de las estimaciones empleadas es baja. El modelo se ejecuta nuevamente para todo el horizonte cuando se dispone de información actualizada y se vuelve a implementar únicamente la solución correspondiente a los primeros días. De esta forma es posible “avanzar en la línea del tiempo” minimizando el impacto de la incertidumbre de las predicciones utilizadas.

Al analizar los resultados obtenidos queda en evidencia la importancia considerar el efecto de las precipitaciones así como el de la irrigación artificial en el balance costo/beneficio de la actividad agronómica. Si bien no es posible predecir las condiciones climáticas, la utilización de estas herramientas posibilita contar con mayor cantidad de información a la hora de tomar decisiones en lo que respecta estrategias de irrigación.

Si bien se utilizaron parámetros ajustados para un caso de estudio realizado en Francia, se considera que el enfoque propuesto se podría aplicar a sistemas agronómicos de nuestro país. Para ello es esencial disponer de información experimental de campo para validar el modelo del cultivo. En un futuro se planea aplicar la metodología al caso de frutales, tomando como sistema de estudio el complejo productivo irrigado de la región del alto valle de Río Negro y Neuquén.

También cabe destacar que el modelo empleado asume que el nitrógeno y otros nutrientes no son factores limitantes del crecimiento del cultivo. En trabajos futuros se pretende incorporar la componente de fertilización, para tener ambas prácticas agrícolas en cuenta en

el proceso de toma de decisiones. De esta manera se podrían desarrollar estrategias de irrigación y fertilización óptimas. Esta etapa implicará implementar modelos de crecimiento de cultivos más sofisticados [12].

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por las siguientes instituciones: Universidad Nacional del Sur (UNS), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y Agencia Nacional para la Promoción Científica y Técnica (ANPCyT) de Argentina.

Referencias

- [1] Bos, M., R. Kselik, R. Allen, D. Molden (2009); Water Requirement for Irrigation and the Environment. Springer, p. 174.
- [2] Wallach D., B. Goffinet, J. E. Bergez, P. Debaecke, D. Leenhardt and J. N. Aubertot (2001); Parameter Estimation for Crop Models: A New Approach and Application to a Corn Model, *Agronomy Journal*, 93 (4) pp 757-766.
- [3] Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Baret, F. Bussiére, (1998); 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.
- [4] Williams, J. R., C. A. Jones, J. R. Kiniry, D. A. Spanel (1989); The EPIC Growth Model, *Trans. American Soc. Agric. Eng.*, 32 Pp. 479-511
- [5] Bergez J. E., J. M. Deumier, B. Lacoix, P. Leroy, D. Wallach (2002); Improving Irrigation Schedules by Using a biophysical and a decisional model; *European Journal of Agronomy*, 16 Pp. 123-135.
- [6] Bergez J. E., F. García and L. Lapasse (2004); A Hierarchical Partitioning Method For Optimizing Irrigation Strategies; *Agricultural Systems*, 80 Pp. 235-253.
- [7] Bontemps, C., S. Couture (2002); Evaluating Irrigation Water Demand. In P. Pashardes, T. Swanson, A. Xepapadeas (eds.), *Current Issues in the Economics of Water Resources Management: Theory, Applications and Policies*, Pp. 69-83.
- [8] Ortega, J.F., J. A. de Juan, J. M. Tarjuelo, E. López (2004); MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management. *Irrig. Sci*, 23 Pp. 61-75.
- [9] Bergez J. E., P. Debaecke, J. M. Deumier, B. Lacoix, D. Leenhardt, P. Leroy, D. Wallach (2001); MODERATO: An Object-oriented Decision Tool for Designing Maize Irrigation Schedules; *Ecological Modeling*, 137 Pp. 43-60.
- [10] Michalewicz, Z. (1996); *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer, 3rd Ed.
- [11] The MathWorks, <http://www.mathworks.com>. Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox User's Guide.
- [12] Brisson, N., M. Launay, B. Mary, N. Beaudoin (2008); Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model. *Editions Quae*, p. 297.

Datos de Contacto:

M. P. Ludwig, A. M. Blanco, J. A. Bandoni
PLAPIQUI (UNS-CONICET). Camino "La Carrindanga" – km. 7, (8000) Bahía Blanca, ARGENTINA
Tel.: +54 291 4861700, Fax.: +54 291 4861600
{mludwig, ablanco, abandoni}@plapiqui.edu.ar

APÉNDICE: Modelo matemático

Variables de estado:

$$TT(d) = TT(d-1) + \Delta TT(d) \quad [1]$$

$$LAI(d) = LAI(d-1) + \Delta LAI(d) \quad [2]$$

$$FSEN(d) = FSEN(d-1) + \Delta FSEN(d) \quad [3]$$

$$B(d) = B(d-1) + \Delta B(d) \quad [4]$$

$$R(d) = R(d-1) + \Delta R(d) \quad [5]$$

$$H(d) = H(d-1) + \Delta H(d) \quad [6]$$

$$S1(d) = S1(d-1) + \Delta S1(d) \quad [7]$$

$$S2(d) = S2(d-1) + \Delta S2(d) \quad [8]$$

$$S3(d) = S3(d-1) + \Delta S3(d) \quad [9]$$

$$S4(d) = S4(d-1) + \Delta S4(d) \quad [10]$$

TIEMPO TERMAL Y DESARROLLO DE LA PLANTA:

$$\Delta TT(d) = \max \left[\frac{TMIN(d) + Tm(d)}{2} - 6, 0 \right] \quad [11]$$

$$Tm(d) = \min [TMAX(d), 30] \quad [12]$$

ÍNDICE DE ÁREA DE HOJA:

Área de hoja:

$$lplant(d) = \frac{p1 \log i}{1 + \left(\frac{p1 \log i}{lai0} - 1 \right) \times \exp l(d)} \quad [13] \quad \Delta lplant(d) = lplant(d+1) - lplant(d) \quad TT(d) \leq tt_{2-3} \quad [15]$$
$$\Delta lplant(d) = 0 \quad TT(d) > tt_{2-3}$$

$$\exp l(d) = \exp(-p2 \log i \times TT(d-1)) \quad [14]$$

$$reduc1(d) = reduc(ATPT(d), r1sf, r2sf) \quad [16]$$

Función $Reduc(x; p1, p2)$: función de reducción debido al estrés hídrico

$$reduc(x; p1, p2) = 0 \quad x < p2 - p1$$

$$reduc(x; p1, p2) = \frac{p1 - p2 + x}{p1} \quad p2 - p1 \leq x \leq p2$$

$$\text{Área de hoja activa:} \quad reduc(x; p1, p2) = 1 \quad x > p2$$

$$\Delta LAI(d) = DENS * \Delta lplant(d) * reduc1(d) \quad [17]$$

$$\Delta FSEN(d) = p1sen * \exp 3(d) \quad [19]$$

$$\exp 3(d) = \exp \left(\frac{p2sen \times TT(d)}{tt_{2-7}} \right) \quad [18]$$

$$\Delta LAI(d) = (1 - FSEN(d)) * LAI(d) \quad [20]$$

PROFUNDIDAD DE RAÍCES:

$$\Delta R(d) = \min(\text{ratedep} * \Delta TT(d), \text{max dep} - R(d-1), \text{SOILD} - R(d-1)) \quad [21]$$

MATERIA SECA SOBRE EL SUELO:

Incremento de materia seca:

$$rue(d) = rue1 \quad TT(d) \leq tt_{2-6} \quad [22]$$
$$rue(d) = rue2 \quad TT(d) > tt_{2-6}$$

$$reduc2(d) = reduc(ATPT(d), r1rue, r2rue) \quad [23]$$

13

$$\exp 4(d) = \exp(-xtinc \times ALAI(d)) \quad [24] \quad \Delta B(d) = 0.48 * RAD(d) * rue(d) * (1 - \exp 4(d)) * reduc2(d) \quad [25]$$

ÍNDICE DE COSECHA:

$$HPOT = hi \max^* \sum_{d=d_{\max}}^{d_{cri}} \frac{reduc(ATPT(d); r1hi, r2hi)}{d_{cri} - d_{\max} + 1} \quad [26]$$

$$Y = H(d_{mat}) * B(d_{mat}) \quad [28]$$

$$\Delta H(d) = \min(ratehi, HPOT - H(d-1)) \quad TT(d) \geq tt_{2-5} \quad [27]$$

$$\Delta H(d) = 0 \quad TT(d) < tt_{2-5}$$

PROCESOS DEL SUELO:

Contenido de agua disponible por capas:

$$Q1(d) = S1(d) - \theta WP1(d) * TH1(d) \quad [29]$$

$$Q3(d) = S3(d) - \theta WP3(d) * TH3(d) \quad [31]$$

$$Q2(d) = S2(d) - \theta WP2(d) * TH2(d) \quad [30]$$

$$Q4(d) = S4(d) - \theta WP4(d) * TH4(d) \quad [32]$$

Contenido de agua máximo disponible por capas:

$$Qx1(d) = (\theta FC1(d) - \theta WP1(d)) * TH1(d) \quad [33]$$

$$Qx3(d) = (\theta FC3(d) - \theta WP3(d)) * TH3(d) \quad [35]$$

$$Qx2(d) = (\theta FC2(d) - \theta WP2(d)) * TH2(d) \quad [34]$$

$$Qx4(d) = (\theta FC4(d) - \theta WP4(d)) * TH4(d) \quad [36]$$

Fracción de máxima cantidad de agua disponible por capas:

$$FAW1(d) = \frac{Q1(d)}{Qx1(d)} \quad [37]$$

$$FAW3(d) = \frac{Q3(d)}{Qx3(d)} \quad [39]$$

$$FAW2(d) = \frac{Q2(d)}{Qx2(d)} \quad [38]$$

$$FAW4(d) = \frac{Q4(d)}{Qx4(d)} \quad [40]$$

EVAPORACIÓN DEL AGUA DEL SUELO:

Evapotranspiración potencial y evaporación real:

$$PE(d) = ETP(d) * \exp(-xtinc * ALAI(d)) \quad [41]$$

$$AE(d) = PE(d) * (p1evap + p2evap * \exp 6(d)) \quad [43]$$

$$PT(d) = ETP(d) - PE(d) \quad [42]$$

$$\exp 6(d) = \exp\left(\frac{p3evap}{FAW1(d)}\right) \quad [44]$$

Pérdidas relativas de capas 1 y 2:

$$f1(d) = FAW1(d) * (1 - \exp 7(d)) \quad [45]$$

$$f2(d) = FAW2(d) * (\exp 8(d) - \exp 7(d)) \quad [47]$$

$$\exp 7(d) = \exp\left(\frac{-pke * TH2(d)}{10}\right) \quad [46]$$

$$\exp 8(d) = \exp\left(\frac{-pke * TH1(d)}{10}\right) \quad [48]$$

Cantidad de agua evaporada de las capas 1 y 2 del suelo:

$$AE1(d) = \min\left(\frac{f1(d)}{f1(d) + f2(d)} * AE(d), Q1(d)\right) \quad [49]$$

$$AE2(d) = \min\left(\frac{f2(d)}{f1(d) + f2(d)} * AE(d), Q2(d)\right) \quad [50]$$

TRANSPIRACIÓN:

Transpiración real:

$$FAW23(d) = \frac{Q2(d) + Q3(d)}{Qx2(d) + Qx3(d)} \quad [51]$$

$$reduc4(d) = reduc(FAW23(d), r1tran, r2tran) \quad [52]$$

$$AT(d) = \min(PT(d) * \text{reduc4}(d), Q2(d) + Q3(d)) \quad [53]$$

$$ATPT(d) = \frac{AT(d)}{PT(d)} \quad [54]$$

Demandas relativas de transpiración de las capas 2 y 3 del suelo:

$$TD2(d) = \frac{TH2(d)}{(TH2(d) + TH3(d)) * AT(d)} \quad [55]$$

$$AT2(d) = TD2(d) \quad [57]$$

$$TD3(d) = \frac{TH3(d)}{(TH2(d) + TH3(d)) * AT(d)} \quad [56]$$

$$AT3(d) = TD3(d) \quad [58]$$

BALANCE DE AGUA:

$$INPUT1(d) = RAIN(d) + IRRIG(d) \quad [59]$$

$$DRAIN1(d) = STEMP1(d) - Qx1(d) \quad [67]$$

$$INPUT2(d) = DRAINAGE1(d) \quad [60]$$

$$DRAIN2(d) = STEMP2(d) - Qx2(d) \quad [68]$$

$$INPUT3(d) = DRAINAGE2(d) \quad [61]$$

$$DRAIN3(d) = STEMP3(d) - Qx3(d) \quad [69]$$

$$INPUT4(d) = DRAINAGE3(d) \quad [62]$$

$$DRAIN4(d) = STEMP4(d) - Qx4(d) \quad [70]$$

$$STEMP1(d) = S1(d-1) + INPUT1(d) - AE1(d) - AT1(d) \quad [63]$$

$$DRAINAGE1(d) = \max(0, DRAIN1(d)) \quad [71]$$

$$STEMP2(d) = S2(d-1) + INPUT2(d) - AE2(d) - AT2(d) \quad [64]$$

$$DRAINAGE2(d) = \max(0, DRAIN2(d)) \quad [72]$$

$$STEMP3(d) = S3(d-1) + INPUT3(d) - AE3(d) - AT3(d) \quad [65]$$

$$DRAINAGE3(d) = \max(0, DRAIN3(d)) \quad [73]$$

$$STEMP4(d) = S4(d-1) + INPUT4(d) - AE4(d) - AT4(d) \quad [66]$$

$$DRAINAGE4(d) = \max(0, DRAIN4(d)) \quad [74]$$