

Modelado, simulación y control del uso del agua en la agricultura

Javier Arriaga Sevilla

Abril 2015

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA



TESIS DOCTORAL

**Modelado, simulación y control del uso del agua
en la agricultura**

Tesis presentada ante el Departamento de
Ingeniería de Sistemas y Automática,
Escuela Técnica Superior de Ingeniería,
como parte de los requisitos para la obtención del título de

Doctor

por la
Universidad de Sevilla.

de

Javier Arriaga Sevilla

Sevilla, Abril 2015

Directores:

Francisco Rodríguez Rubio
José Luis Muriel Fernández
Ivan Francisco García Tejero

A mis padres

Agradecimientos

La elaboración de una tesis doctoral es, desde sus inicios, una labor ardua en la que confluyen multitud de piezas en movimiento; hubiera sido imposible llevarla a cabo sin la ayuda de muchas personas, ayuda de la que deseo dar fe en las próximas líneas.

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mis padres. Sin su amor, sin su ayuda y sin su santa paciencia, hubiera sido imposible llegar hasta este punto. Lo mismo se puede decir del resto de mi familia, que siempre me animó y espolé para lograr mi objetivo.

Debo expresar la mayor gratitud a mis tres directores de tesis. A Francisco R. Rubio, por no haber tirado la toalla conmigo a pesar de que en muchas ocasiones le di motivos más que sobrados para ello; a José Luis Muriel, por haberme animado de forma constante a seguir adelante y dar estructura al trabajo; y por supuesto, a mi amigo Iván García porque en alguna ocasión casi literalmente me levantó cuando yo mismo estaba dispuesto a abandonar.

No puedo olvidarme de mis compañeros de departamento en el centro IFA-PA de Alcalá del Río: Karl, con el que di los primeros y titubeantes pasos de esta tesis; M^a Antonia y Natalia, siempre presentes y a veces imprescindibles en mi día a día; Aura, Antonio, Victor Hugo, Pepe, Gonzalo, Manolo y tantos otros. Ni de los muchos amigos que he hecho en el centro, amigos que han hecho estos años una experiencia maravillosa: Jorge, Miguel Ángel, Juan Antonio, Almudena, Manuel, Ana María, las hermanas Gómez, Carmen y las maravillosas Nieves y Ana.

En estos años he trabajado en varios lugares, pero si ha habido una constante ha sido la academia, donde Manuel ha sido más que un jefe, un amigo. Gracias.

Finalmente, no puedo dejar de mencionar a mi mejor amiga, una persona a la que conocí a los dieciocho años y que se ha convertido en una parte imprescindible de mi vida. Gracias, María Dolores, porque siempre confiaste en

mí y porque siempre pude contar contigo cuando lo necesité; y te he necesitado mucho más a menudo de lo que me gusta reconocer.

Por supuesto, es necesario agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia y al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) por la beca FPI con la que se financió el desarrollo del trabajo de mi tesis. Además de a la Junta de Andalucía por el proyecto P09-AGR-4782 «El Papel de la Humedad del Suelo en la Conservación de Suelo, Agua y Carbono en Cuencas Agrícolas» y al Ministerio de Ciencia e Innovación por el proyecto del Plan Nacional de I+D AGL2009-12936-C03-02 «Integración de medidas en cuencas agrícolas a diferentes escalas en un modelo de agua y sedimentos.»

Javier Arriaga Sevilla
Sevilla, Abril de 2015.

Índice general

Agradecimientos	v
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xv
Resumen	xvii
Summary	xix
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Estructura de la Tesis	6
1.4. Publicaciones relacionadas	8
1.4.1. Artículos	8
1.4.2. Presentaciones en congresos	9
Parte I Modelado del agua en suelo	11
2. Calibración por Redes Neuronales Artificiales	13
2.1. Introducción	15
2.1.1. Sensores electromagnéticos para la medición de agua en suelo	15
2.1.2. Redes Neuronales Artificiales	19
2.2. Material y métodos	21
2.2.1. Ámbito del ensayo	21
2.2.2. Recogida y tratamiento de muestras	22
2.2.3. Calibración	26
2.3. Resultados y discusión	28
2.3.1. Recopilación de datos	28

2.3.2. Cálculo de las redes neuronales artificiales.	30
2.3.3. Evaluación de resultados	33
2.3.4. Modelo de tres sensores.	37
2.4. Conclusiones	40
3. Modelo del contenido de humedad en suelo	41
3.1. Introducción	41
3.2. Material y métodos	44
3.2.1. El modelo del cubo	44
3.2.2. Modificaciones	47
3.2.3. Entorno de simulación	51
3.2.4. Calibración	52
3.3. Resultados	53
3.4. Conclusiones	57
4. Control del contenido de agua en suelo	59
4.1. Introducción	59
4.2. Material y métodos	62
4.2.1. Determinación del punto de operación	62
4.2.2. Diseño de controladores	63
4.3. Resultados	67
4.3.1. Linealización del sistema	67
4.3.2. Control Proporcional	70
4.3.3. Control Proporcional Integral (PI)	70
4.3.4. Control Proporcional Integral Derivativo (PID)	72
4.3.5. Simulación de controladores	73
4.4. Conclusiones	77
Parte II Modelado de los efectos del Riego Deficitario sobre cultivos leñosos	79
Introducción	82
Objetivos	86
5. Efectos del estrés hídrico a largo plazo	87
5.1. Material y métodos	87
5.1.1. Parcela experimental	87
5.1.2. Tratamientos de RD	88
5.1.3. Análisis estadístico y numérico; modelo analítico	89
5.2. Resultados y discusión	95
5.2.1. Relaciones hídricas y respuesta fisiológica del cultivo	95

5.2.2.	Respuesta productiva del cultivo a riego deficitario sostenido y funciones de productividad del agua anuales.	96
5.2.3.	Funciones de pérdida de producción	99
5.3.	Conclusiones	105
6.	Efectos del estrés hídrico a medio plazo	107
6.1.	Material y métodos	107
6.1.1.	Parcela experimental	107
6.1.2.	Diseño experimental. Tratamientos RDC	108
6.1.3.	Modelando la función de producción del cultivo	110
6.1.4.	Modelo aditivo	111
6.1.5.	Modelo por ajuste con términos cruzados	112
6.2.	Resultados y discusión	116
6.2.1.	Producción y tratamientos de RDC	116
6.2.2.	Ajuste sin términos cruzados	118
6.2.3.	Ajuste con términos cruzados	120
6.3.	Conclusiones	126
7.	Planificación de estrategias de riego	129
7.1.	Introducción	129
7.2.	Material y métodos	132
7.2.1.	Planificación a largo plazo	132
7.2.2.	Planificación a medio plazo	140
7.3.	Resultados	141
7.3.1.	Planificación a largo plazo	141
7.3.2.	Planificación a medio plazo	152
7.4.	Propuesta de aplicación mixta	154
7.4.1.	Hipótesis de partida	154
7.4.2.	Metodología	155
7.5.	Conclusiones	157
8.	Riego en almendros	159
8.1.	Introducción	160
8.2.	Material y métodos	161
8.2.1.	Condiciones del experimento	161
8.2.2.	Tratamientos de riego	163
8.2.3.	Mediciones en planta	163
8.2.4.	Análisis de datos y modelado	164
8.2.5.	Diseño del controlador	165
8.3.	Resultados y discusión	167
8.3.1.	Modelo multivariable LTI en tiempo discreto	168

8.3.2. Diseño del controlador	170
8.3.3. Simulación del sistema	172
8.4. Conclusiones	173
9. Conclusiones	175
Bibliografía	179

Índice de figuras

1.1. Proyecciones de población mundial según la ONU. Fuente: Loren Cobb para Wikimedia Project.	3
2.1. Esquema básico de un condensador de placas planoparalelas. . .	16
2.2. Diagrama básico de una línea de transmisión.	16
2.3. Sensores de humedad de Decagon Devices, Inc. De arriba a abajo: EC-20,10HS y 5TE.	18
2.4. Esquema básico de una red neuronal con n entradas, una salida y una capa oculta de 30 perceptrones.	19
2.5. Vista aérea de la parcela experimental en la finca «Tomejil». . . .	21
2.6. Vista de la parcela desde el nodo central de la red.	22
2.7. Columna de suelo.	23
2.8. Diagrama de la columna de suelo y ubicación de los sensores en ella.	24
2.9. Estufa de secado con balanzas de precisión.	25
2.10. Temperatura en el interior de la estufa a lo largo del experimento.	26
2.11. Medidas de humedad y temperatura en una columna de Laboreo Convencional.	29
2.12. Medidas de humedad y temperatura en columna de Siembra Directa.	30
2.13. Calibración específica para sensor único	31
2.14. Rectas de regresión para la red neuronal artificial para el sensor EC20.	34
2.15. Comparación gráfica de calibraciones.	36
2.16. Distribución de humedad en columnas de suelo.	37
2.17. Rectas de regresión de la RNA multivariable.	38
2.18. Comparación de resultados experimentales y del modelo RNA mixto para suelo con manejo de Laboreo Convencional.	39
2.19. Comparación de resultados experimentales y del modelo RNA mixto para suelo con manejo de Siembra Directa.	39

3.1. Suma de los efectos de las pérdidas	47
3.2. Separación en sectores de la parcela de estudio	51
3.3. Resultado de la identificación de parámetros	55
3.4. Distribución de pérdidas en función del contenido de humedad en suelo según la estación.	56
3.5. Simulación de la parcela de estudio con los parámetros obtenidos para el modelo.	57
4.1. Diagrama de control discreto del sistema linealizado	64
4.2. Comparación de modelos linealizado y completo 1.	69
4.3. Comparación de modelos linealizado y completo 1	70
4.4. Señal de control (verde) y salida (azul) de un sistema con control proporcional para una referencia $y_{obj} = 0,45$	71
4.5. Señal de control (verde) y salida (azul) de la simulación del sistema linealizado con un control PI	71
4.6. Simulación del sistema linealizado con un control PID	72
4.7. Precipitaciones a lo largo de un año	73
4.8. Simulación del sistema con un control P sobre los tres primeros sectores	74
4.9. Simulación del sistema con un control PI sobre los tres primeros sectores	75
4.10. Simulación del sistema con un control PID sobre los tres primeros sectores	76
4.11. Relaciones generalizadas entre agua de riego aplicada, Evapotranspiración y rendimiento del cultivo (adaptada de Fereres y Soriano [2007]).	84
5.1. Distribución de los tratamientos de riego en el ensayo de RDS.	88
5.2. Diferentes momentos durante las recolecciones de los ensayos diseñados (A y B, Ensayo 1; C y D, Ensayo 2; E y F, Ensayo 3).	90
5.3. Coeficientes K_v de funciones de productividad del agua (CWPF) lineales para cada año relacionando la pérdida de producción con la tasa de evapotranspiración aplicada (ET_c).	97
5.4. Curva de superficie para la función de pérdida de producción $y = L(x, t)$; comparación del modelo con los resultados experimentales. RMSE: Raíz del error cuadrático; SSE: Suma de los residuos al cuadrado; r^2 : Coeficiente de determinación.	100
5.5. Función de pérdida de producción $y = L(x, t)$; comparación del modelo simplificado con los resultados experimentales. RMSE: Raíz del error cuadrático; SSE: Suma de los residuos al cuadrado; r^2 : Coeficiente de determinación.	102

5.6. Función de pérdida de producción $y = L(x, t)$; comparación del modelo completo con los resultados experimentales. RMSE: Raíz del error cuadrático; SSE: Suma de los residuos al cuadrado; r^2 : Coeficiente de determinación.	104
6.1. Distribución de los tratamientos de riego en el ensayo de RDC.	109
6.2. Tasa de pérdida de producción (en tanto por uno) en función del estrés hídrico aplicado, definido como la cantidad de agua aplicada dividida por la ET_c . f : fase de floración; g : fase de crecimiento del fruto; r : fase de maduración.	119
6.3. Componentes por separado de la pérdida de producción en función del estrés hídrico, definido como la relación entre el agua suministrada en un periodo fenológico y la ET_c . f, g, r representan respectivamente las fases de floración, crecimiento del fruto y maduración.	121
6.4. Efecto de aplicar estrés hídrico en diferentes fases sobre la tasa de pérdida de producción. Dicho estrés se define como la relación entre el agua suministrada en un periodo fenológico y la ET_c . f, g, r representan respectivamente las fases de floración, crecimiento del fruto y maduración.	123
6.5. Comparación gráfica entre los resultados del modelo (mod) y los experimentales (exp) para los cuatro tratamientos a lo largo de tres campañas.	125
7.1. Dos modelos diferentes para la pérdida de producción a largo plazo para un estrés hídrico del 10%.	131
7.2. Diagrama de bloques básico de un sistema con control por realimentación del error.	135
7.3. Diseño del controlador en tiempo discreto.	137
7.4. Curva de superficie para la función de pérdida de producción.	142
7.5. Pérdida de producción de fruto para tres niveles diferentes de estrés hídrico: 0,50; 0,35 y 0,25.	143
7.6. Análisis en el lugar de las raíces del controlador PI diseñado por autoajuste.	145
7.7. Diagrama Simulink®. del diseño del controlador. Obsérvese el saturador para la consigna x	146
7.8. Simulación del sistema controlado con un PI Discreto.	147
7.9. Análisis en el lugar de las raíces del sistema controlado con un PID discreto.	148
7.10. Simulación del sistema controlado con un PID Discreto.	149

7.11. Resultado de simular la aplicación al cultivo de una distribución óptima y una distribución uniforme de estrés hídrico.	151
7.12. Muestra de la interfaz de la aplicación web.	152
7.13. Resultado de la aplicación tras introducir una restricción del 20%.	153
7.14. Resultado de aplicar la secuencia óptima aplicando Riego Deficitario Controlado optimizando por periodos fenológicos.	156
8.1. Experimento con almendros jóvenes. Puede observarse la colocación del dendrómetro y los cables de las sondas de humedad en suelo.	162
8.2. Preinstalación de células de carga en el lugar del ensayo.	164
8.3. Diagrama del regulador lineal cuadrático gaussiano con filtro de Kalman. w es la entrada oculta y v el ruido a la salida.	166
8.4. Diagrama Simulink® del sistema completo incluyendo el regulador.	167
8.5. Ajuste lineal de TDG frente a Extracción.	169
8.6. Comparación entre resultados experimentales y del modelo para ambos tratamientos. Cx: tratamiento control; RDx: tratamiento de riego deficitario.	171
8.7. Resultados de la simulación: salida controlada (TDG) y señal de control (riego/ ET_0).	172

Índice de tablas

2.1. Datos de las columnas de suelo usadas; LC: laboreo convencional. SD: siembra directa.	29
2.2. RMSE resultado de emplear una RNA entrenada con un sensor con los datos de los demás. Columna izquierda: sensor para el que se entrenó. Fila superior: columnas para las que se obtuvieron los datos.	32
2.3. Coeficiente de determinación del modelo (análoga a 2.2).	32
2.4. Resultados del entrenamiento de las RNA agrupando los datos por tipo de sensor.	33
2.5. Resultado de emplear la calibración global de los sensores sobre los datos de cada sensor. El error RMSE se mide en m^3/m^3	35
2.6. Resultado de aplicar el modelo multivariable a las columnas de suelo. r^2 : término de mejora de la eficiencia con respecto a los resultados de la tabla 2.5.	38
3.1. Esquema de la parcela adjunta. Las altitudes se miden en metros.	53
5.1. Agua aplicada, Balance hídrico y tratamientos de riego. El periodo de riego se mide en días del año (DDA).	96
5.2. Producción media de frutos (kg/árbol) a lo largo del experimento. Diferentes letras muestran diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).	96
5.3. Valores estimados de K_v y coeficiente de determinación R^2 para funciones CWPF en función de ET_c y ψ_{stem}	98
5.4. Cálculo de las estadísticas de la bondad del ajuste en los escenarios de estrés hídrico analizados.	101
6.1. Definición de los tratamientos de riego.	108
6.2. Efectos del RDC sobre la producción y la productividad del agua en los tres periodos de monitorización de un año.	116
6.3. Errores e índices de eficiencia para modelos con funciones polinómicas de distintos grados.	124

6.4. Tasas de pérdida de producción (kg/kg) medidas (med.) y previstas (prev.) con respecto a la producción del tratamiento control según tratamiento y año.	125
7.1. Errores del modelo según tratamiento	142
7.2. Distribución de riegos óptima (en <i>mm</i>): resultados de aplicar año a año la secuencia calculada para RDS con RDC. Las pérdidas se miden en tanto por uno (kg/kg). El reparto óptimo es: 79 mm en floración, 187 mm en crecimiento y 51 mm en maduración. . . .	156

Resumen

La agricultura en Europa, y más concretamente en regiones periféricas como Andalucía, supone un elemento fundamental para el desarrollo económico, especialmente en las zonas rurales, actuando como elemento vertebrador y de cohesión tanto a nivel social como productivo. Dentro de las innumerables limitaciones con las que se encuentra el agricultor, la disponibilidad de agua es quizá una de las más determinantes, no sólo desde el punto de vista de la disponibilidad, sino también de la incertidumbre que genera un contexto de cambio climático global con una creciente demanda que amenaza con sobrepasar los recursos disponibles. Esta incertidumbre resulta patente tanto en los sistemas productivos de secano como en los de regadío, presentándose como necesaria la introducción de diferentes herramientas y modelos que permitan alcanzar una gestión más eficiente y sostenible de los recursos hídricos, además de la posibilidad de plantear distintos escenarios futuros y elaborar respuestas adecuadas adelantándose a los acontecimientos.

El presente trabajo de tesis doctoral ofrece diferentes enfoques de la problemática de la escasez de agua, en base a: i) la introducción de diferentes sensores que posibiliten el modelado y control del sistema Agua-Suelo-Planta-Atmósfera al ofrecer medidas de distintas variables de los componentes del sistema. ii) el planteamiento de modelos matemáticos y computacionales que permitan una caracterización y representación de una realidad compleja como es el citado sistema. iii) la propuesta de varios sistemas de planificación y control automático de distintas variables de interés (el contenido de agua, su productividad, la producción del cultivo y otras variables relacionadas con la fisiología del cultivo).

Para ello, los trabajos experimentales se han desarrollado en un sistema de agricultura extensiva de secano, representativa de casi un 70% de los agroecosistemas andaluces, y en dos cultivos leñosos de regadío que cuentan con una elevada presencia en nuestra Comunidad Autónoma: el cultivo de cítricos y el del almendro. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que

es posible encontrar representaciones matemáticas relativamente sencillas de procesos naturales muy complejos y aparentemente caóticos. Estas representaciones han permitido en gran medida modelar el comportamiento del agua en el suelo en condiciones de secano, y comprobar que dichos modelos eran capaces de recoger las características inherentes de cada sistema, como por ejemplo el sistema de laboreo empleado, la profundidad del horizonte radicular o las propiedades físicas del medio. Por otra parte, en cuanto a los sistemas de regadío, los modelos obtenidos permiten extraer conclusiones no sólo sobre la influencia del aporte de agua en la producción final de los cultivos, sino también sobre la capacidad de adaptación de dichos cultivos a situaciones prolongadas de escasez. Estos modelos permiten a su vez discriminar el potencial efecto de un determinado nivel de estrés hídrico sobre los diferentes periodos fenológicos del cultivo; además, permiten concluir que el tiempo necesario para la adaptación de un cultivo y la estabilización de sus producciones a una situación prolongada de estrés hídrico depende tanto del tiempo como del nivel de estrés aplicado a lo largo de sucesivas campañas.

Asimismo, los modelos hacen posible la planificación a largo plazo de estrategias de riego deficitario y sistemas de control automático para optimizar la implementación de dichas estrategias y maximizar los valores de producción final. En este sentido, se propone el empleo de técnicas clásicas de control como los controladores Proporcional-Integral-Diferencial o control mediante observador por filtro de Kalman.

Teniendo en cuenta el conjunto de resultados obtenidos en este trabajo, se puede concluir que el empleo de técnicas de ingeniería de modelado, simulación y control resulta una alternativa viable para el mundo agrícola, y que sin duda puede ofrecer respuestas a las diferentes problemáticas del sector.

Summary

Agriculture in Europe, and especially in peripheral regions like Andalusia, is a foundation for economic development, especially in rural areas, acting as the backbone and cohesion element for society and economy. Among the many constraints the farmer finds himself under, water availability is one of the most, not just in regard to availability, but also to the uncertainty generated by a context of global climate change and a growing demand that threatens to overcome the available resources. This uncertainty is apparent both in rain fed and irrigated production systems, stating the necessity of introducing different tools and models to achieve a more efficient and sustainable management of water resources, raising the possibility of different future scenarios and the development of appropriate responses beforehand. The present Ph.D. Thesis offers different approaches to the problem of water scarcity, based on: i) the introduction of different sensors that makes possible the modelling and control of the Water-Soil-Plant-Atmosphere system through providing information about several variables and system components. ii) the approach to mathematical and computational models that allow the characterization and representation of complex realities as the abovementioned model. iii) the proposal of different planning and automatic control systems for several variables of interest (water content, productivity, crop production and other variables related to the crop physiology).

In order to fulfill this objective, experimental work was developed in an extensive rain fed agricultural system, which represents almost a 70% of the andalusian agro-ecosystems and in two woody irrigated crops with a high presence in our region: citrus and almond trees. From the results obtained it can be concluded that it is possible to find simple mathematical representations of complex and seemingly chaotic natural processes. These representations allowed to model the behaviour of soil water under rain fed conditions and to attest that those models were able to take into account the system inherent characteristics, such as the tillage system used, the depth of the root horizon or the

soil physical properties. Moreover, in terms of irrigation systems, the obtained models allow to reach conclusions not just regarding the influence of water intake in the crop final production but also the crop adaptability to prolonged shortages. These models make possible to discriminate the potential effect of a given water stress level during different phenological stages; they also support the conclusion that the time needed by the crop to adapt itself and stabilize its production under prolonged water stress situations depends both on the time and the applied level of stress in the successive campaigns.

The models also enable long-term planning of deficit irrigation strategies and automatic control systems to optimize the implementation of these strategies, thus maximizing the final productive value. In this regard, the use of conventional control techniques such as Proportional-Integral-Differential regulators and control using a Kalman filter observer are proposed.

From the obtained results, it can be concluded that the use of engineering techniques as modelling, simulation and control is a viable option for the agricultural world and it can certainly provide answers to several problems of the sector.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El agua no es solamente el recurso natural más limitado que existe: es el combustible de la economía, motor de desarrollo y fuente de vida, tal vez incluso sinónimo de ésta.

Ha sido el agua y su disponibilidad la que ha marcado históricamente la aparición, consolidación y decadencia de las primeras civilizaciones. La civilización egipcia floreció gracias al cultivo de los terrenos inundables del Nilo, y organizaba su vida pública en función de los ciclos de inundación de éste. Las civilizaciones del sudeste asiático, con China a la cabeza, ya concentraban a gran parte de la población mundial gracias al aprovechamiento del cultivo de regadío por inundación en la antigüedad. Incluso las civilizaciones consideradas como las más antiguas del mundo, la Sumeria y la Babilonia, surgieron en el célebre «creciente fértil» que se encontraba entre el río Tigris y el Éufrates.

Fue la sobreexplotación de los recursos hídricos en ese fértil territorio de la antigüedad, precisamente, lo que llevó a la desertización del territorio y a la inevitable decadencia de los imperios que en él se asentaban. Desde entonces, naciones e imperios han prosperado y han caído por múltiples motivos. En su ensayo «Colapso», Diamond [2005] describe cinco factores que llevaron al colapso a sociedades pasadas:

- Daño ambiental.
- Cambio climático.
- Vecinos hostiles.
- Pérdida de comercio.
- Respuesta de la sociedad a problemas ambientales.

De estos cinco factores, tres están fuertemente correlacionados con la disponibilidad de recursos hídricos. Obviamente el cambio climático y el daño ambiental afectan a otras variables (v.g., el ejemplo de la Isla de Pascua, donde la madera era la base de toda la tecnología de su civilización y sus habitantes cortaron hasta el último árbol). Sin embargo, prácticamente todas esas variables están a su vez fuertemente correlacionadas con el agua: la ausencia de árboles afecta a la capacidad del suelo para retener el agua, lo que provoca fuertes escorrentías en épocas de lluvias que arrastran tierra fértil consigo, produciendo desertización. El cambio climático, que históricamente siempre ha sido natural e irreversible (y esto último parece que lo sigue siendo), afecta inevitablemente a la disponibilidad de agua. Y la respuesta a los problemas ambientales acaba siendo lo que determina si las sociedades sobreviven, para lo cual han de responder a una pregunta: cómo gestionar el agua disponible.

Según el informe de 2010 de las Naciones Unidas (DESA [2013]), revisado en 2012, se estima que la población humana en el año 1800 era de unos mil millones de personas. Doscientos años después, a pesar de haber vivido varias guerras mundiales, la población se había multiplicado por seis hasta los seis mil millones. Diez años después, había crecido hasta los siete mil millones. Este crecimiento exponencial, que se hace más acusado a partir de la década de los sesenta del pasado siglo, implica una necesidad de cultivo de alimentos que también ha de ser exponencialmente creciente, lo que implica un mayor uso de agua; o, al menos, un mejor uso de ella. Las proyecciones del citado informe indican tres escenarios posibles: una estabilización de la población en torno a los diez mil millones; una caída de la población que volvería a los seis mil doscientos millones a finales de este siglo; y la continuación de este crecimiento exponencial que nos llevaría a los dieciséis mil millones a final de siglo. En cualquiera de los tres escenarios, la presencia de un cambio climático cuyos efectos podrán ser mitigados pero en ningún caso neutralizados (Field y otros [2014]) afectará inequívocamente a la actividad agrícola y a la disponibilidad de agua. La figura 1.1 muestra esta evolución y tres proyecciones diferentes que muestran posibles futuros.

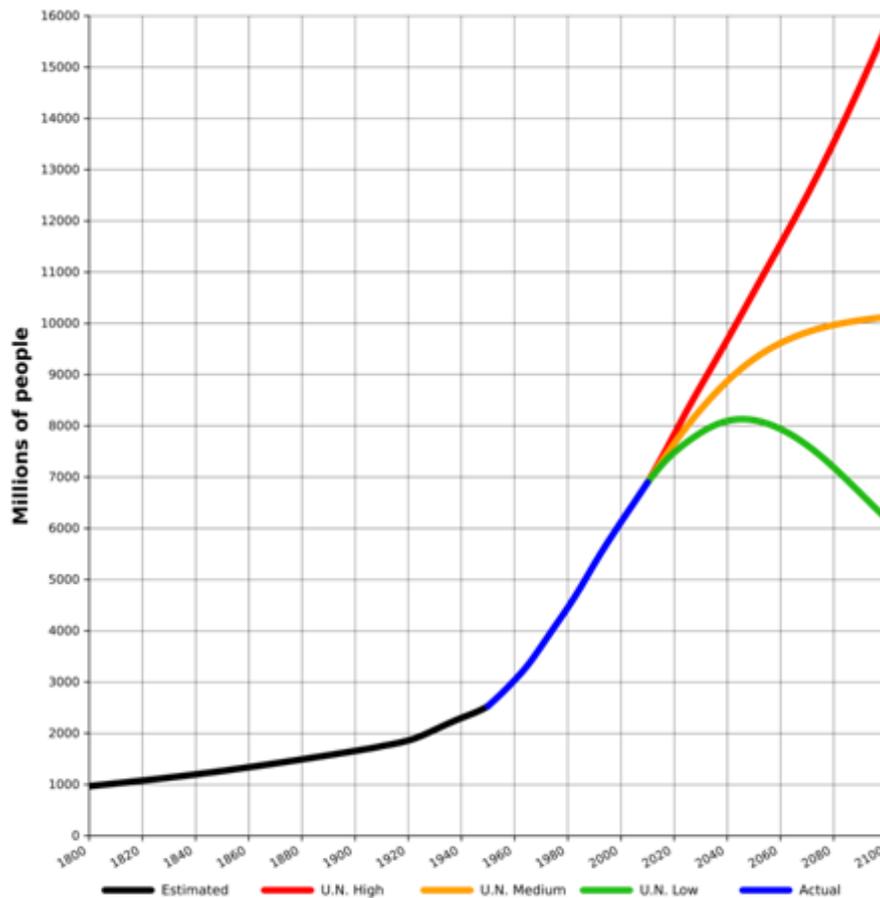


Figura 1.1: Proyecciones de población mundial según la ONU. Fuente: Loren Cobb para Wikimedia Project.

Incluso en el mejor de los escenarios posibles, con la población estancada o en un lento retroceso, y con un cambio climático atemperado, el problema de la distribución de agua no es futuro: es presente. Según la FAO (Alexandratos y otros [2012]) la escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial, y las proyecciones de demanda de agua y alimentos para el futuro indican que el problema de la escasez no puede hacer sino aumentar.

Por lo tanto, se puede concluir que el agua es el mayor tesoro de una civilización, y su gestión ha de ser una de las principales prioridades de cualquier gobierno. Con la población mundial experimentando un crecimiento exponencial es fundamental saber qué cantidad de agua se debe emplear en la producción

de cultivos agrícolas y, más importante aún si cabe, saber la cantidad de agua de la que se dispone.

1.2. Objetivos

En concordancia con los antecedentes expuestos se planteó en este trabajo de Tesis como objetivo general el análisis y, en su caso, el modelado de los procesos implicados en el ciclo del agua a través del sistema continuo Suelo-Planta-Atmósfera (*SPA continuum*). Ello permitiría una mejor comprensión de las relaciones entre estos componentes del sistema SPA a través de los cuales circula el agua, desde su almacenamiento en el suelo (procedente de la precipitación y/o riego), su absorción por la planta y su devolución a la atmósfera en forma de vapor por evaporación directa desde el suelo y a través de la transpiración de la planta.

El conocimiento y modelado de estos procesos y la definición de sus relaciones contribuirán, sin duda, al diseño de estrategias sostenibles para la optimización del uso de los recursos hídricos, tanto en los sistemas productivos agrarios de secano bajo distintos tratamientos de manejo del suelo, como especialmente en los de regadío. Se pretende, como producto final, que el usuario disponga de nuevas tecnologías que racionarían de forma efectiva el uso del agua disponible y le faciliten la toma de decisiones a la hora de establecer sistemas de manejo del suelo y calendarios de riego que adapten la oferta real del recurso a la demanda exigida por los cultivos.

Como primer objetivo parcial, se pretende la evaluación y modelado del estado hídrico en la zona no saturada del suelo en sus componentes espacial y temporal mediante el uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA) como herramienta en ensayos de calibración de sensores. Una vez conseguida una calibración fiable de los sensores de humedad, pueden emplearse como fuentes de señales de información para su aplicación a modelos.

La aplicación del *modelo del cubo*¹ permitirá conocer la dinámica de la relación suelo-agua, y con ella el grado de disponibilidad para la planta, mediante el análisis de los procesos estocásticos implicados. Diversas modificaciones sobre este modelo permitirán su transformación en un modelo de parámetros distribuidos para aplicarlo a nivel de parcela; una vez conseguido este objetivo, se

¹Introducido por Rodríguez-Iturbe [2000].

pretende introducir en el mundo de la agronomía diversos sistemas de control clásico con el objetivo de estudiar su rendimiento en ensayos de distintos tipos de manejo.

Una vez que el agua es captada desde el suelo por la planta, segundo componente vivo del sistema, se propone el estudio para establecer las necesidades hídricas reales de cultivos frutales de interés en Andalucía como cítricos y almendros, escogidos además por sus distintas características fenológicas y su comportamiento en cuanto a relaciones hídricas se refiere.

Así, en los cítricos, el objetivo fue integrar en modelos analíticos la respuesta productiva a distintos tratamientos de riego deficitario, estableciendo las funciones de productividad del agua y las de pérdida de producción a largo y medio plazo. Mientras que en el caso del almendro se planteó realizar un análisis multifactorial del efecto de aportes diferenciales de agua sobre distintas variables fisiológicas mediante la aplicación de sistemas multivariados Lineales e Invariantes en el Tiempo (LTI) que permitieran identificar el estado hídrico óptimo de la planta en función de los aportes de riego recibidos.

En resumen, esta Tesis plantea de forma secuencial los siguientes hitos:

1. Modelado del agua en el suelo

- Definir a partir de una red de sensores de humedad la evolución espacio-temporal del estado hídrico del suelo en función de los aportes naturales del agua por precipitación en distintos tratamientos de manejo del suelo: laboreo convencional y siembra directa.
 - Se incluye una propuesta de calibración de los sensores empleando Redes Neuronales Artificiales.
- Desarrollar un modelo dinámico observable y controlable que permita predecir con precisión el estado del agua en la zona no saturada del suelo y con ello la disponibilidad de la misma para el cultivo que soporta.
 - Se incluye el diseño y simulación de diversos sistemas de control clásico con el objetivo de estudiar su respuesta en ensayos de calibración de sensores.

2. Modelado de los efectos del Riego Deficitario sobre cultivos leñosos

- En cítricos

- Evaluar la respuesta productiva del cultivo al riego deficitario (RD) y establecer las funciones de productividad del agua en base anual, modelando a medio plazo las funciones de producción en base a las posibles pérdidas de cosecha.
- Como consecuencia del anterior, establecer a medio y largo plazo las estrategias de riego óptimas para su aplicación en el cultivo de cítricos en el Valle del Guadalquivir, que contribuyan a la toma de decisiones del usuario y garanticen el mejor uso posible de los recursos hídricos disponibles.
- En el almendro
 - Evaluación de los efectos del Riego Deficitario en el contenido de humedad en suelo y parámetros fisiológicos como la fluctuación diaria del diámetro de tronco (Trunk Diameter Fluctuation, TDF) y la extracción de agua del suelo por parte del cultivo (Evapotranspiración del cultivo, ET_c).
 - Establecimiento, ajuste y comprobación de un modelo en tiempo discreto en un sistema LTI que simule la respuesta de las variaciones del diámetro de tronco y considerando como entradas al sistema el riego y la ET_c ; como esta última entrada no es observable, se hace necesario el diseño de un observador de estado.
 - Como último objetivo se planteó el diseño de un controlador automático que regulara el aporte de riego necesario para mantener las fluctuaciones diarias del tronco entre los límites óptimos establecidos en el modelo anterior.

1.3. Estructura de la Tesis

El presente trabajo de tesis doctoral trata de ofrecer una serie de respuestas a las diferentes problemáticas relacionadas con la escasez de agua en la agricultura haciendo uso para ello de diferentes técnicas de modelado, simulación y control. Teniendo en cuenta este objetivo general, este documento se ha estructurado en dos partes bien diferenciadas, cada una de ellas destinada al estudio de los dos primeros componentes del sistema Suelo-Planta-Atmósfera.

- En la primera parte, titulada «Modelado del agua en suelo», se ofrecen los resultados más significativos de un experimento a largo plazo en el que se

estudiaron los efectos de distintos sistemas de laboreo sobre el contenido de agua en suelo.

- Para ello, fue necesario realizar un trabajo previo que garantice la calidad de los datos: los sensores empleados presentan problemas de fiabilidad y precisión. En el capítulo 2 se propone un sistema de calibración de sensores mixto, llevada a cabo en el laboratorio a partir de muestras de campo, empleando la herramienta matemática conocida como Redes Neuronales Artificiales (RNA).
 - A continuación, se procedió a la creación de un modelo de parámetros distribuidos para analizar el comportamiento del agua en el suelo (capítulo 3); a partir del modelo preexistente, se añadieron parámetros adicionales para completarlo y adaptarlo a diferentes necesidades.
 - Una vez establecida la validez del modelo, en el capítulo 4 se diseñaron y ensayaron varios controladores automáticos para estabilizar el nivel de humedad dentro de la zona radicular.
- En la segunda parte, titulada «Modelado de los efectos del Riego Deficitario sobre cultivos leñosos», se contempló el estudio del comportamiento de la planta bajo diferentes dotaciones hídricas.
- En el capítulo 5, a partir de un ensayo de riego deficitario de seis años de duración en un cultivo de cítricos, se estudió el efecto que una restricción hídrica prolongada tuvo sobre la planta, midiendo ese efecto sobre la variable más interesante desde el punto de vista del agricultor: la producción.
 - En el capítulo 6, a partir de un segundo ensayo, se estudió la aplicación de un riego deficitario controlado en función del periodo fenológico del cultivo, observando la variación de los efectos sobre la producción de esa restricción hídrica, proponiéndose un modelo que caracteriza esa dependencia.
 - En el capítulo 7, a partir de los dos modelos anteriores, se propusieron estrategias óptimas de control desde el punto de vista económico a medio y largo plazo.
 - Finalmente, en el capítulo 8, se propuso el estudio del modelado y el control de los efectos del riego deficitario sobre almendros a través de variables fisiológicas de la planta, concretamente el crecimiento diario del tronco, proponiéndose un control automático Lineal Cuadrático Gaussiano con Filtro de Kalman para mantener ese crecimiento de forma estable.

1.4. Publicaciones relacionadas

Parte de los trabajos que se han realizado para la elaboración de esta Tesis Doctoral han dado lugar a publicaciones en revistas científico-técnicas y aportaciones en congresos. Estas publicaciones se detallan en esta sección.

1.4.1. Artículos

- García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Arriaga, J., Muriel-Fernández, J.L., 2012. «*Relationships between trunk- and fruit-diameter growths under deficit-irrigation programmes in orange trees*»
Scientia Horticulturae, vol. 133, pp. 64-71.
DOI: 10.1016/j.scienta.2011.10.022
- García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Arriaga, J., Hernández, A., Vélez, M.L., Muriel-Fernández, J.L., 2012. «*Approach to assess infrared thermal imaging of almond trees under water-stress conditions*»
Fruits, 2012. vol. 67, iss. 06, pp 463-474. DOI: 10.1051/fruits/2012040
- García Tejero, I.F., Durán Zuazo, V.H., Arriaga, J., Muriel Fernández, J.L., Julio 2012. «*Impact of water stress on citrus yield.*»
Agronomy for Sustainable Development, Vol. 32, Is. 03, pp. 651-548. DOI: 10.1007/s13593-011-0060-y.
- García Tejero, I.F. (ed.), Muriel Fernández, J.L., Durán Zuazo, V.H., Arriaga Sevilla, J., Diciembre 2013. «*Uso eficiente del agua en la agricultura*» (libro).
IFAPA, Sevilla. I.S.B.N. 978-84-695-9350-9
- Arriaga, J., García-Tejero, I.F., Muriel-Fernández, J.L., Durán-Zuazo, V.H. and Rubio, F.R., 2014. «*Modeling, simulation and control of irrigation on young almond trees.*»
Acta Horticulturae (ISHS), vol. 1038, pp. 479-486.
- Arriaga, J., Rubio, F.R., Abril 2015. «*A distributed parameters model for soil water content spatial and temporal variability analysis*»
Computers and Electronics in Agriculture (en revisión).

1.4.2. Presentaciones en congresos

- Arriaga, J., Vanderlinden, K., Muriel, J.L., Rubio, F.R., Julio 2009. «*Design of a Wireless soil moisture sensor network at the Tomejil farm long-term soil management experiment, SW Spain*»
Workshop «Distributed Sensing: Taking It to the Field», Jülich (Alemania).
- García-Tejero, I.F., Arriaga, J., Jiménez, J.A., Hernández, A., Romero, R., Durán-Zuazo, V.H., Muriel, J.L., Julio 2011. «*Modelado del efecto del riego deficitario controlado sobre la producción de cítricos en Andalucía Occidental*»
Actas del XXIX Congreso Nacional de Riegos, Córdoba.
- Arriaga, J., García-Tejero, I., Rubio, F.R., Durán-Zuazo, V.H., Muriel-Fernández, J.L., Septiembre 2011. «*Modelado de los Efectos a Largo Plazo de Riego Deficitario en Cítricos en Condiciones Climáticas Semi-Áridas*»
Actas de las XXXII Jornadas de Automática (Ja'11), Sevilla.
- Arriaga, J., Vanderlinden, K., Muriel, J.L., Morón, M., Ortega, M.G., Rubio, F.R., Octubre 2011. «*Calibración de sensores de humedad capacitivos usando redes neuronales.*»
Actas de las X Jornadas de Investigación de la Zona no Saturada del Suelo, Salamanca. I.S.B.N.: 978-84-694-6642-1
- Arriaga, J., García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Vélez, L.M., Muriel-Fernández, J.L., Julio 2012. «*Termografía de infrarrojos para determinación de estrés hídrico en almendros*»
XXX Congreso Nacional de Riegos, Albacete.
- Arriaga, J., García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Muriel-Fernandez, J.L., Rubio, F.R., 2012. «*Modeling, Simulation and Control Of Irrigation On Young Almond Trees*»
7th International Symposium on Irrigation on Horticultural Crops, Geisenheim, Alemania.
- García-Tejero, I.F., Arriaga, J., Durán-Zuazo, V.H., Muriel, J.L., 2012. «*Efectos a largo plazo del riego deficitario sostenido en la producción de cítricos en Andalucía Occidental.*»
XI Simposio Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en Plantas, Sevilla.

Parte I

Modelado del agua en suelo

Capítulo 2

Evaluación y calibración de sensores de humedad en campo y laboratorio usando redes neuronales.

Resumen

El estudio de la variabilidad espacial de la humedad del suelo a escala de parcela o cuenca agrícola requiere el uso de redes de sensores de humedad de bajo coste, que suelen mostrar una fiabilidad limitada y requieren de calibraciones específicas, especialmente en suelos con elevados contenidos en arcilla.

Inmerso en el contexto de un estudio de la distribución espacial y temporal de la humedad del suelo en un ensayo a largo plazo de manejo de suelo a escala de parcela, el presente trabajo pretende plantear una calibración más fiable y eficiente de sondas de humedad mediante un análisis mixto campo-laboratorio. Para la calibración de campo se dispone de datos gravimétricos; para la calibración en laboratorio se emplearon columnas de suelo inalterado que tras ser saturadas fueron desecadas en un entorno controlado mediante una estufa de aire forzado, mientras se monitorizaba la evolución de su peso con básculas de

precisión y la de su humedad volumétrica medida con distintas sondas capacitivas de humedad Decagon.

Tras obtener curvas de secado y la densidad aparente (gr/cm^3) que relaciona las humedades gravimétrica y volumétrica, es posible realizar una calibración mejorada y específica para cada tipo de suelo. Las redes neuronales artificiales son particularmente útiles para el modelado de procesos físicos y el ajuste de dichos modelos; en este capítulo se propone el empleo de estas herramientas para obtener calibraciones para las sondas analizadas en el tipo de suelo objeto de estudio. Los resultados muestran que dichas calibraciones permiten mejorar la precisión de las mediciones de humedad realizadas.

Una versión de este trabajo se presentó en las Jornadas de Estudio de la *Zona No Saturada* del Suelo de Salamanca, 2011:

J. Arriaga, K. Vanderlinden, J.L. Muriel, M. Morón, M.G. Ortega, F.R. Rubio. «Calibración de sensores de humedad capacitivos usando redes neuronales.» Actas de las X Jornadas de Investigación de la Zona no Saturada del Suelo, Salamanca (España), 2011 I.S.B.N.: 978-84-694-6642-1

2.1. Introducción

La medición adecuada del contenido de agua en suelo resulta crítica para la estimación de los balances de agua y energía, así como para comprender los procesos biológicos y químicos en todo el sistema suelo-planta (Vereecken y otros [2008], Robinson y otros [2003]). Puede encontrarse una revisión de técnicas de medición en Hopmans y Simunek [1999], incluyendo técnicas de medida geofísicas y remotas.

2.1.1. Sensores electromagnéticos para la medición de agua en suelo

En concreto, los dispositivos basados en el análisis de las reflexiones de ondas electromagnéticas se han abierto un considerable hueco en el mercado. Concretamente, el estudio de la reflectometría en el dominio del tiempo para la medida de agua en suelo a través de las propiedades eléctricas del medio fue propuesto por Topp y otros [1980]; desde entonces, la tecnología de medición ha ido mejorando hasta convertirse en el método más popular para la medida de humedad en suelo frente a técnicas como la penetración por radar, inducción electromagnética, sensores de pulso de calor y otros.

Simultáneamente, las técnicas de medida basadas en sondas de capacitancia y reflectometría en el dominio de la frecuencia (Frequency Domain Reflectometry, FDR) se han convertido en una alternativa viable debido a sus inherentes ventajas (Kizito y otros [2008]): bajo coste, facilidad para almacenamiento de datos, posibilidad de monitorización continua y funcionamiento en un amplio rango de tipos de suelos.

El fundamento teórico de estos dispositivos se basa en la teoría electromagnética clásica de Maxwell (Pozar [2009]). Un condensador es un dispositivo eléctrico formado por dos placas metálicas con un dieléctrico separándolas, tal y como muestra la figura 2.1.

Aunque éste es el modelo mostrado habitualmente, no es el único posible: los condensadores empleados habitualmente para electrónica, por ejemplo, tienen forma cilíndrica, con una placa cilíndrica exterior y una interior.

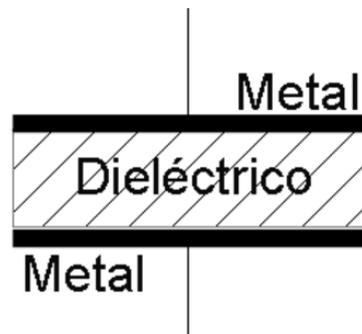


Figura 2.1: Esquema básico de un condensador de placas planoparalelas.

El dieléctrico de separación (puede ser incluso el aire o el vacío) tendrá unas ciertas propiedades dieléctricas: permitividad eléctrica ϵ , permeabilidad magnética μ y conductividad σ . Considerando que la ecuación de carga y descarga del condensador permite obtener la capacidad C y que ésta puede obtenerse a partir de la geometría y las propiedades físicas del dieléctrico, la relación entre estas propiedades y la humedad en suelo puede establecerse a partir de Topp y otros [1980].

Para comprender el funcionamiento de estos sensores es necesario hacer una breve introducción a la reflectometría, esto es, el estudio de las reflexiones; para explicar este proceso, hay que remitirse al estudio de la propagación de ondas en una línea de transmisión. El diagrama básico de una línea de transmisión puede observarse en la figura 2.2.

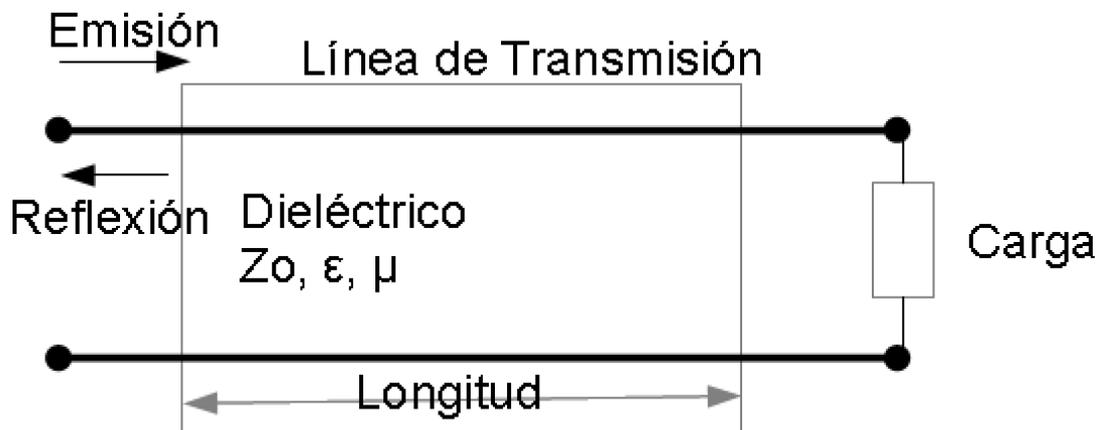


Figura 2.2: Diagrama básico de una línea de transmisión.

Se dice que una línea de transmisión está adaptada cuando al aplicar una señal (en forma de diferencia de potencial en la puerta de entrada), ésta no sufre reflexiones. Sin embargo, cuando la señal de información se ve reflejada, se dice que la línea no está adaptada, y esto se debe a que la impedancia de la carga (impedancia vista en el extremo final de la línea) no coincide con la impedancia característica de la línea.

Por lo tanto, a partir de una impedancia de carga conocida, aplicando una señal eléctrica a la entrada de una línea de transmisión, es posible a partir del estudio de las reflexiones conocer la impedancia característica de la línea. Naturalmente, dicha impedancia es una propiedad que depende de las propiedades electromagnéticas del dieléctrico que aísla ambos hilos de la línea de transmisión (permitividad eléctrica y permeabilidad magnética), además de la geometría y frecuencia de operación. Por lo tanto, controlando la geometría y la frecuencia, es posible determinar las propiedades del dieléctrico y a partir de ellas determinar el contenido de agua en suelo.

Dentro de este estudio de la reflectometría encontramos dos técnicas:

1. La reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR) es la técnica que usan las llamadas sondas de capacitancia. Se basan la emisión de señales de información a cierta frecuencia y, a partir del estudio de los resultados en régimen permanente determinar la impedancia.
2. La reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), por el contrario, trabaja en el dominio del tiempo, por lo que se centra en el estudio de los transitorios. Se analiza el desfase temporal entre señal emitida y señal reflejada, y a partir de ese desfase se obtiene el valor de la impedancia.

Puede esperarse que los sensores tengan diferentes funciones de calibración en función de su frecuencia de operación; dicha frecuencia es el principal factor que afecta a las medidas de una sonda de capacitancia, provocando sensibilidad frente a cambios en las mencionadas condiciones del suelo. Según Robinson y otros [2008], estas sensibilidades se reducen al mínimo cuando la frecuencia es superior a los 500 MHz. Desde ese punto de vista, los sensores TDR, que actúan a frecuencias más altas (Walker y otros [2004], Chen y Or [2006]) han demostrado mayor precisión; los FDR, al operar en una frecuencia menor, son más sensibles a perturbaciones del entorno, como por ejemplo la temperatura, la textura o la conductividad eléctrica (Topp y otros [2000]; Zhang y otros [2004]; Boga y otros [2007]). Por lo tanto, lo que los sensores TDR parecen a priori la mejor elección.

Sin embargo, aunque las sondas de capacitancia son mucho menos fiables, a cambio ofrecen una ventaja significativa: un coste inferior. Esto permite el uso de un número mayor de instrumentos, lo que implica redes mucho más densas (Mittelbach y otros [2011]). Dada la gran variabilidad espacio-temporal de la humedad en suelo, se puede postular que tener un gran número de sensores menos precisos pero más baratos pueden reducir el error de muestreo debido a variabilidad espacial (Teuling y otros [2006]).

Los sensores capacitivos Decagon (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA., EE.UU.) han tenido un relativo éxito en el mercado; sin embargo, sucesivos trabajos de evaluación y calibración en laboratorio (Blonquist y otros [2005], Jones y otros [2005], Bogen y otros [2007], Bandaranayake y otros [2007], Sakaki y otros [2008], Kizito y otros [2008]) han mostrado una gran sensibilidad al tipo de suelo, tensión de alimentación y conductividad eléctrica del suelo. La figura 2.3 muestra tres de estos sensores pertenecientes a la familia ECH_2O : EC-20, 10HS y 5TE.



Figura 2.3: Sensores de humedad de Decagon Devices, Inc. De arriba a abajo: EC-20, 10HS y 5TE.

2.1.2. Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son un modelo matemático estocástico que se inspira en las redes neuronales naturales (biológicas), esto es, pretenden modelar el funcionamiento del sistema nervioso animal. Los primeros intentos de crear este tipo de herramienta comienzan con McCulloch y Pitts [1943], en los que se demuestra que un modelo simple con interruptores electrónicos es capaz de modelar con éxito una gran variedad de funciones analíticas. La figura 2.4 muestra el esquema básico de una red neuronal artificial.

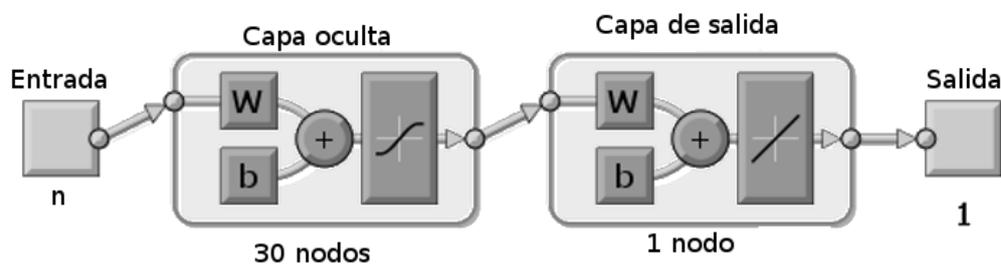


Figura 2.4: Esquema básico de una red neuronal con n entradas, una salida y una capa oculta de 30 perceptrones.

Una RNA consta de un cierto número de nodos denominados «perceptrones» agrupados en dos o más capas comunicadas entre sí, de modo que cada nodo de una capa recibe la salida de todos los nodos de la capa anterior; en el caso de la figura, se parte de dos capas (la oculta, con treinta nodos, y la de salida) si bien el número de capas y de los nodos que cada una de ellas contiene puede ser ajustado de acuerdo con las necesidades del problema. Se parte de un primer nodo al que se suministra los datos entrada de un modelo; además, existe otro nodo a la salida que proporciona el resultado de la operación matemática que realiza la red; cada perceptrón lleva a cabo una función matemática cuya variable de entrada está formada por la suma ponderada (la ponderación es el peso W , correspondiente a cada uno de los nodos de la capa anterior) con un cierto umbral b de cada una de las salidas de los nodos de la capa anterior.

Al comparar los datos de salida con el resultado esperado (la referencia), se produce una realimentación de los perceptrones, que ajustan sus pesos para aproximarse mejor al valor de referencia; a este proceso se le llama entrenamiento. Tras el entrenamiento, se llevan a cabo las fases de validación del modelo y, finalmente, de prueba. Al acabar, se dispone de una red completamente

caracterizada por sus pesos y umbrales que actúa como un modelo del proceso cuyas entradas y referencias se utilizaron para su creación.

Con la evolución de los computadores electrónicos, matemáticos y neuro-psicólogos avanzaron en la materia hasta que en 1958 Rosenblatt y Wightman (Rosenblatt [1958]) desarrollaron en el Instituto Tecnológico de Massachussets la primera neurocomputadora viable, el «Perceptron Mark 1». Minsky y Papert [1969] mostraron varias carencias en el modelo del perceptrón que detuvieron el desarrollo de las RNA hasta que Rumelhart y otros [1986] desarrollaron el método de propagación de errores hacia atrás (error back-propagation). Desde ese momento, como indican Zou y otros [2010], las RNA han experimentado un desarrollo expansivo en multitud de ámbitos gracias a su simplicidad, rapidez y rendimiento; a esta evolución ha contribuido decisivamente el continuo desarrollo de la electrónica y la informática.

Hay que esperar hasta la segunda mitad de la década de 1990 para empezar a ver aplicaciones de RNA en los campos de agroecología e hidroecología, con el desarrollo de modelos de agroecosistemas de Schultz y Wieland [1997] o el sistema de regulación de fertilización de Broner y Comstock [1997].

Por su naturaleza, las RNA resultan particularmente interesante para el modelado de procesos no lineales, como por ejemplo la dinámica de la humedad y salinidad del suelo, estudiada por Morshed y Kaluarachchi [1998], o de la retención de agua y la conductividad eléctrica del suelo propuesta por Schaap y Leij [1998]. Más recientemente, Landeras y otros [2008] compararon el comportamiento de un modelo de evapotranspiración diaria basado en RNA con ecuaciones de modelado empíricas. Además, las RNA se han consolidado como una herramienta válida para modelar el sistema dinámico de la evolución de la humedad y salinidad del suelo, empleando para ello tanto RNA convencionales (Zou y otros [2010], Dai y otros [2011] como de alto orden Elshorbagy y Parasuraman [2008]).

En este capítulo se persiguen dos objetivos: por un lado, proponer una mejora de la calibración en laboratorio mediante un enfoque mixto campo - laboratorio, exponiendo un protocolo de actuación a tal efecto. Por el otro, evaluar el rendimiento de redes neuronales artificiales en la calibración de sensores capacitivos en comparación con los métodos tradicionales para ajustes de curvas de calibración; la utilidad de las RNA para modelar procesos no lineales las convierte en un método más prometedor que el ajuste funcional y su simplicidad (relativa) de programación en un computador digital lo hace viable.

2.2. Material y métodos

2.2.1. Ámbito del ensayo

Para llevar a cabo la calibración, se extrajeron cuatro columnas de suelo inalterado (105 mm de diámetro, 300 mm de altura) de puntos seleccionados de una parcela situada en la finca experimental «Tomejil», en el término municipal de Carmona (Sevilla). donde se comparan desde 1982 distintos sistemas de manejo de suelo. La figura 2.5 muestra una vista aérea de la parcela.

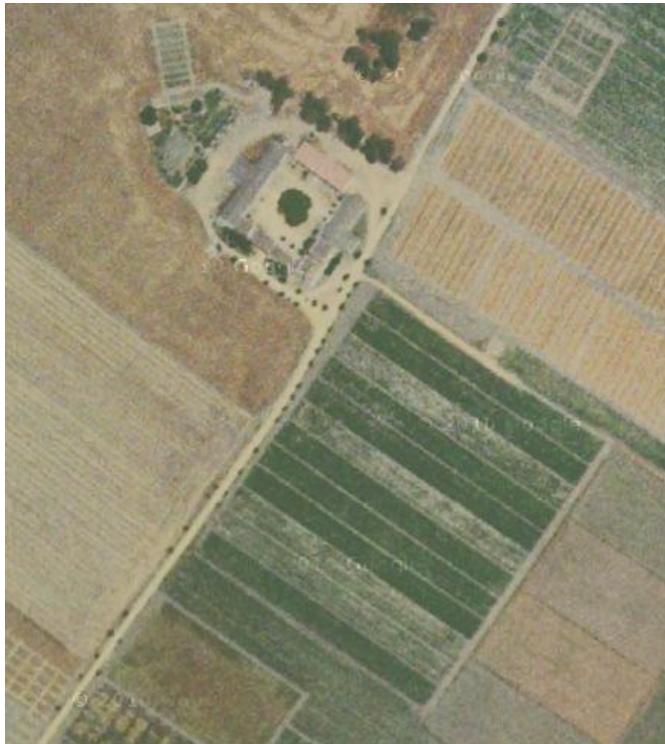


Figura 2.5: Vista aérea de la parcela experimental en la finca «Tomejil».

Dos de las columnas provenían de parcelas elementales bajo siembra directa y otras dos de parcelas bajo laboreo convencional. El suelo, formado sobre margas del mioceno, se clasifica como Haploxerept típico (U.S. DoA, Soil Survey Staff [1999]) con un contenido de arcilla de entre el 50% y el 64%. En dicha finca se ha instalado una red de sensores capacitivos Decagon; al ser la exactitud de esos sensores limitada, la necesidad de una calibración adecuada para éstos

constituye un problema de gran importancia para el desarrollo del experimento.

Los sensores están conectados a una serie de transceptores inalámbricos que se comunican entre sí mediante una red inalámbrica de área personal (WPAN) de bajo coste que sigue un protocolo basado en la recomendación IEEE 802.15.4 (Gutierrez y otros [2001]) desarrollado por la empresa Balmart. El nodo central de esa red, ubicado en un punto desde el que se domina la parcela como muestra la figura 2.6, transmite la información a través de internet a un servidor donde se almacena en una base de datos accesible por los usuarios. El objetivo del trabajo es desarrollar un método de calibración que permita sustituir la calibración de fábrica que en estos momentos está empleándose.



Figura 2.6: Vista de la parcela desde el nodo central de la red.

2.2.2. Recogida y tratamiento de muestras

Se recogieron muestras inalteradas de tierra de distintos puntos de la parcela según el suelo hubiera sido sometido al laboreo convencional o a una siembra directa. Dichas muestras fueron trasladadas a los laboratorios de los que dispone el departamento de Producción Ecológica y Recursos Naturales del IFAPA

en el centro «Las Torres» (Alcalá del Río, Sevilla), donde fueron construidas varias columnas de suelo. La figura 2.7 muestra una de esas columnas contenida por un cilindro perforado de PVC; se busca con este contenedor mantener la integridad estructural de la columna durante el proceso de secado.



Figura 2.7: Columna de suelo.

Dichas columnas fueron saturadas desde la base. Seguidamente, cuatro de estas columnas (dos de ellas conteniendo suelo proveniente de transectos de laboreo convencional, las otras dos de siembra directa) fueron seleccionadas para el experimento. Les fueron insertadas de forma vertical tres sensores diferentes:

- EC-20, de 25 cm de longitud, operando a 5 MHz.
- 10HS, de 15 cm de longitud, operando a 70 MHz.
- 5TE, de 10 cm de longitud, operando también a 70 MHz.

Se muestra el esquema de inserción de los sensores en la figura 2.8; puede verse cómo se insertaron en forma aproximada de triángulo isósceles, a 25mm

del centro de la columna (las tres sondas tienen una anchura similar, en torno a 3.2 cm).

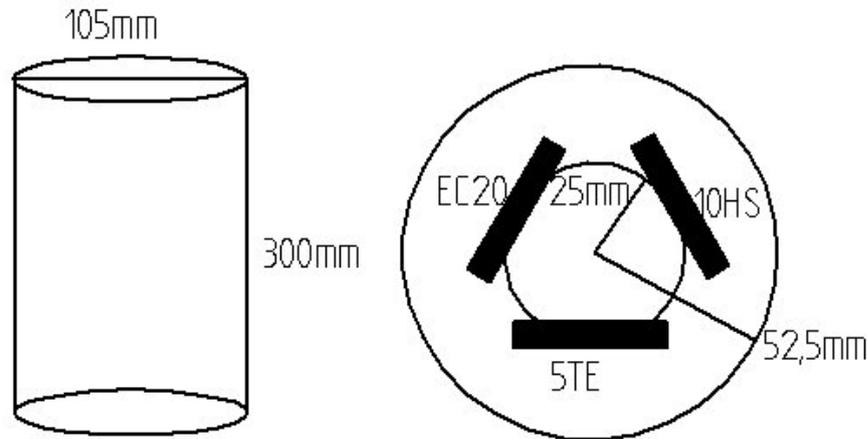


Figura 2.8: Diagrama de la columna de suelo y ubicación de los sensores en ella.

A continuación, las columnas se depositaron sobre cuatro balanzas de precisión modelo x10000M (Mettler - Toledo, Inc., Columbus, OH, EE.UU.) dentro de una estufa de aire forzado modelo 2003721 (JP Selecta S.A., Barcelona). Cada una de las balanzas se conectó a un ordenador a través de un puerto serie; la comunicación entre estos dispositivos se llevó a cabo gracias a un software de diseño propio empleando programación multihilo en lenguaje C, que registró automáticamente de forma simultánea (o cuasisimultánea) las medidas de las básculas con una periodicidad de cinco minutos. A su vez, los sensores se conectaron a dataloggers Decagon Em50 que registraron igualmente las medidas de humedad volumétrica en formato *raw* (sin procesar) cada cinco minutos. La figura 2.9 muestra el sistema completo.

En la parcela de estudio se pueden encontrar sondas EC-20 y 5TE; puesto que las sondas 10HS son el sucesor tecnológico propuesto por la propia Decagon para las EC-20, tiene sentido escogerlas para llevar a cabo su calibración y poder así compararlas. Estas doce sondas (tres por cilindro) se conectaron a varios Dataloggers Em-50 de Decagon para la recuperación posterior de los datos de humedad, tanto *raw* como procesados.

Seguidamente, se procedió a un secado escalonado alternando periodos de funcionamiento de la estufa a una temperatura constante de 30°C con periodos de inactividad, cada uno de ellos de aproximadamente 48 horas como muestra la figura 2.10; se recogieron datos de la temperatura tanto en el interior de la estufa, con un sensor ECT de Decagon, como en el interior de las propias co-



Figura 2.9: Estufa de secado con balanzas de precisión.

lumnas, aprovechando el sensor de temperatura que incluyen las sondas 5TE. Durante este tiempo, tanto los dataloggers como las básculas estuvieron funcionando de forma ininterrumpida (excepto períodos de mal funcionamiento), recogiendo muestras cada cinco minutos.

En paralelo a este proceso, se introdujeron en la estufa tres cilindros marcadores en similares condiciones a las cuatro columnas de suelo bajo estudio, con el propósito de irlos retirando paulatinamente en tres fases distintas del experimento: en los días 4, 8 y 12, esto es, una sesión completa de secado y reposo entre cada recogida; el propósito de este proceso fue estudiar la distribución espacial de la humedad en su interior.

Al terminar el proceso de secado, se extrajeron los sensores y se llevó a cabo un último secado a 105°C durante 48 horas para garantizar la eliminación de cualquier humedad residual, obteniendo así el peso en seco de cada una de las columnas. Los datos se pusieron en común excluyendo los periodos de mal funcionamiento, proporcionando un total de 22.612 muestras útiles para cada

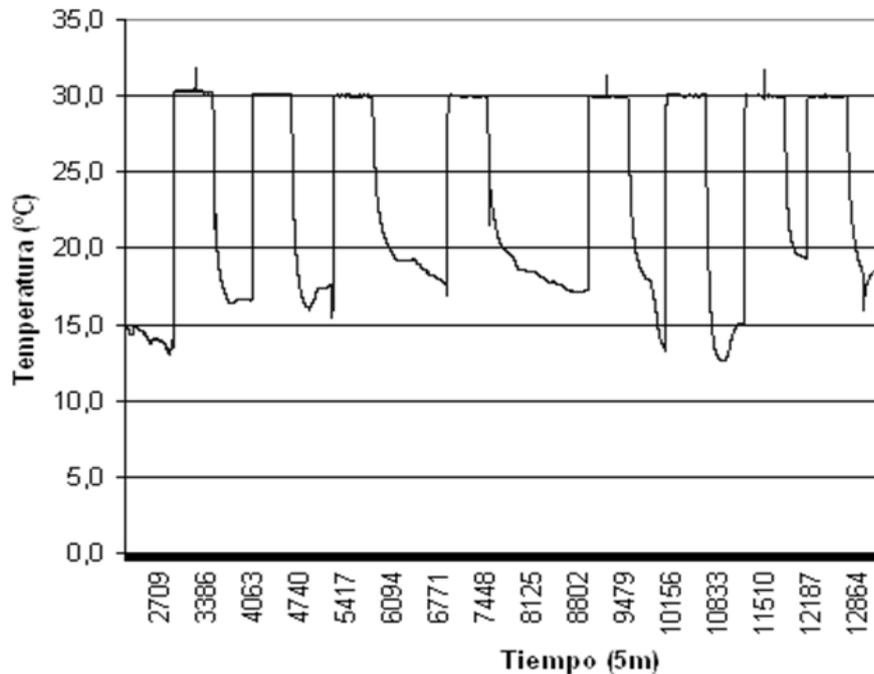


Figura 2.10: Temperatura en el interior de la estufa a lo largo del experimento.

una de las magnitudes (humedad en forma *raw*, peso y temperatura) que fueron empleadas para la calibración.

2.2.3. Calibración

Con los datos ya recopilados, el siguiente paso fue el empleo de herramientas matemáticas para obtener adecuadas funciones de calibración. Para ello, se utilizó el software matemático Matlab®, que dispone de herramientas tanto para el ajuste clásico de curvas por mínimos cuadrados basado en el algoritmo de Levenberg-Marquardt (Marquardt [1963]), como para el diseño, entrenamiento y prueba de redes neuronales (Sumathi y Sivanandam [2006]).

El procedimiento a seguir fue unir todos los pares (tiempo, medida) de las cuatro columnas y separarlos por cada tipo de sensor. Empleando las muestras así agrupadas llevamos a cabo la calibración buscando la minimización del error cuadrático medio (RMSE) tanto con funciones polinómicas cúbicas como con redes neuronales. La elección del polinomio cúbico para la comparación se debe a que las curvas de calibración de fábrica de las sondas bajo estudio son

polinómicas (lineal en el caso del EC-20, cúbicas en los otros dos). Se consideró que una calibración específica para este experimento sería siempre más precisa que la calibración de fábrica, lo que permite estudiar las ventajas del empleo de RNA en condiciones de igualdad de oportunidades.

Obtenidos ya los dos modelos de calibración, se procedió a comparar la bondad de ambos modelos aplicando las salidas sin procesar (*raw*) de cada uno de los sensores y comparando con la humedad de referencia obtenida a partir de los datos gravimétricos. Para ello, se calculó la humedad gravimétrica a partir de la volumétrica conociendo el dato del volumen en saturación (humedad inicial) y en seco (humedad final); para los valores intermedios, se empleó un volumen calculado por interpolación lineal.

La ecuación 2.1 muestra el proceso de obtención de la humedad gravimétrica a partir de la volumétrica (y viceversa) conociendo el peso instantáneo, el peso seco y las dimensiones de la columna (altura, h_c , y diámetro, d_c), así como el peso del propio cilindro vacío y los sensores (P_c).

$$\begin{aligned}
 P_{agua}(t) &= P_{columna}(t) - P_{seco} - P_{cilindro} \\
 GWC(t) &= P_{agua} - P_{seco} \\
 VWC(t) &= \frac{V_{agua}}{h_c \pi \left(\frac{d_c}{2}\right)^2}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Donde GWC es el contenido gravimétrico de humedad en suelo (Gravimetric Water Content) y VWC su correspondiente contenido volumétrico (Volumetric Water Content).

Para la comparación de la bondad de las calibraciones, se calculó el coeficiente de determinación R^2 y la raíz del error cuadrático medio RMSE como se muestra en la ecuación 2.2.

$$\begin{aligned}
 RMSE &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{f}(x_i)]^2} \\
 R^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n [y_i - \hat{f}(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \\
 r^2 &= \frac{R_2^2 - R_1^2}{1 - R_1^2}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Donde y_i son los valores de humedad obtenidos a partir de los datos gravimétricos, x_i los valores *raw* de los sensores, $\hat{f}(x_i)$ la salida del modelo y la media $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$. Además, R_i^2 son los coeficientes de determinación de dos modelos diferentes; r^2 , el índice de mejora de Nash y Sutcliffe, compara la bondad de dos ajustes diferentes informando de cuánto mejora el segundo con respecto del primero.

Finalmente, se propone un modelo diferente: puesto que en cada columna hay tres sensores muy próximos en un espacio reducido, se puede asumir de forma razonable que sus medidas de humedad han de ser la misma. Desde ese punto de vista, puede ser interesante buscar una calibración múltiple: varios sensores para dar una sólo medida. Se diseñó una red neuronal artificial con tres entradas y una salida y se comparó con la referencia calculada a partir de los datos gravimétricos.

2.3. Resultados y discusión

2.3.1. Recopilación de datos

La tabla 2.1 muestra los datos recogidos de las cuatro columnas de suelo.

Tabla 2.1: Datos de las columnas de suelo usadas; LC: laboreo convencional. SD: siembra directa.

Columna	LC-1	LC-2	SD-1	SD-2
Tara (g)	397	373	402	387
Peso saturado (g)	3780	3697	3539	3692
Vol. agua saturado (cm^3)	1105	1101	992	1004
Volumen saturado (cm^3)	2675	2596	2547	2688
Volumen seco (cm^3)	2118	2196	1853	2034

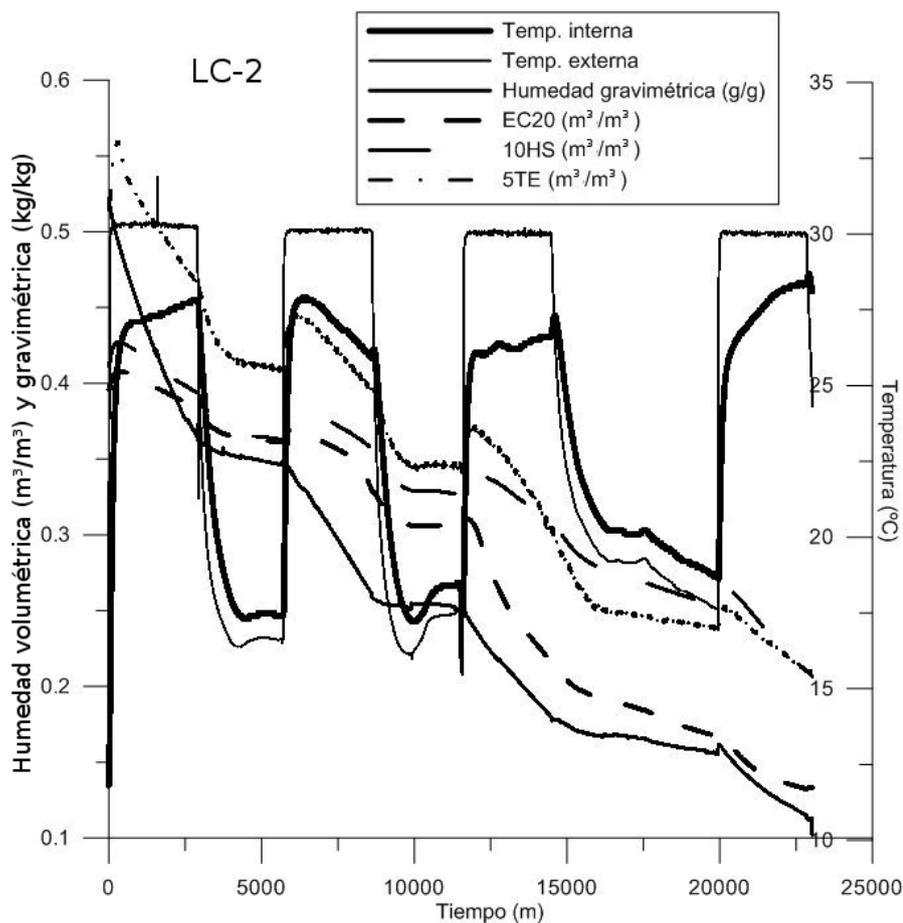


Figura 2.11: Medidas de humedad y temperatura en una columna de Laboreo Convencional.

Las figuras 2.11 y 2.12 muestran los resultados obtenidos de los diferentes sensores de humedad en suelo (medidas volumétricas) junto a las medidas gra-

vimétricas obtenidas y a las temperaturas tanto en la estufa como en el interior de dos de las columnas (una por manejo: la primera para Laboreo Convencional y la segunda para Siembra Directa). Puede comprobarse cómo la temperatura en el interior del cilindro sigue una dinámica de primer orden con respecto a la temperatura ambiente de la estufa y que conforme el cilindro se va secando, la constante de tiempo de esa dinámica se va reduciendo.

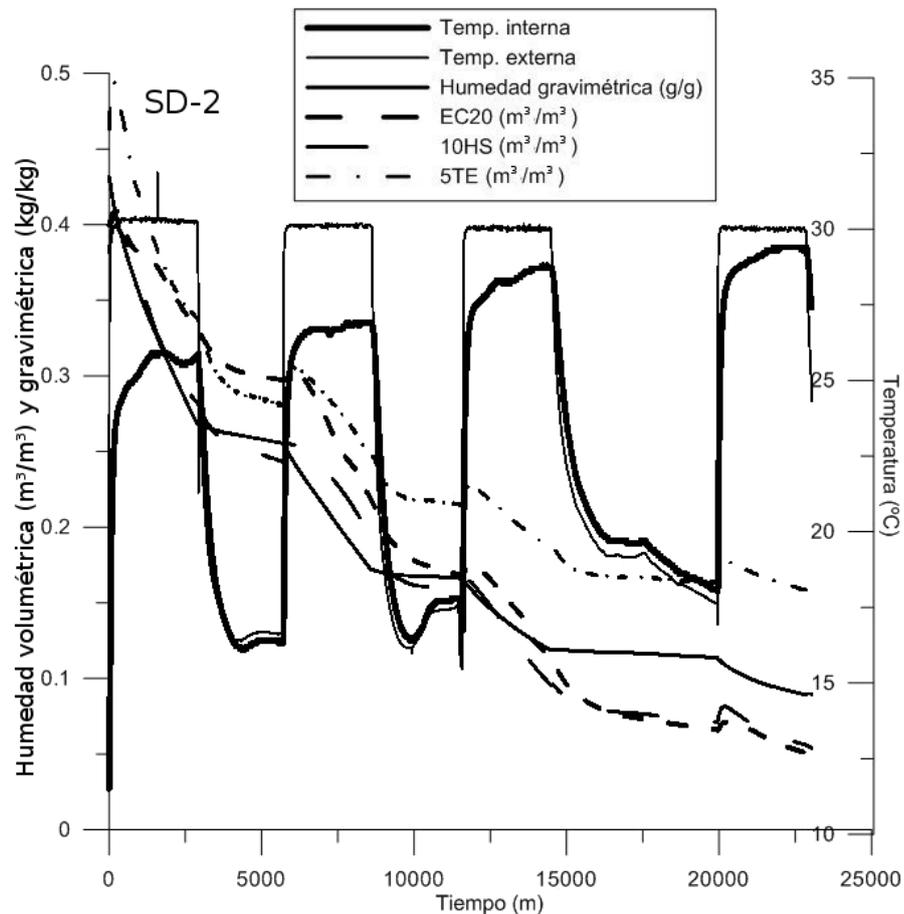


Figura 2.12: Medidas de humedad y temperatura en columna de Siembra Directa.

2.3.2. Cálculo de las redes neuronales artificiales.

Es relativamente fácil obtener una buena calibración para un sensor específico en unas circunstancias concretas. A título de ejemplo, la figura 2.13 muestra

cómo una calibración por redes neuronales puede dar lugar a un ajuste prácticamente perfecto en contraste con una calibración polinómica: en el caso de un sensor EC20, cuya calibración de fábrica sigue una norma lineal, una red de tan sólo diez neuronas mejora sustancialmente los resultados de una calibración polinómica cuadrática.

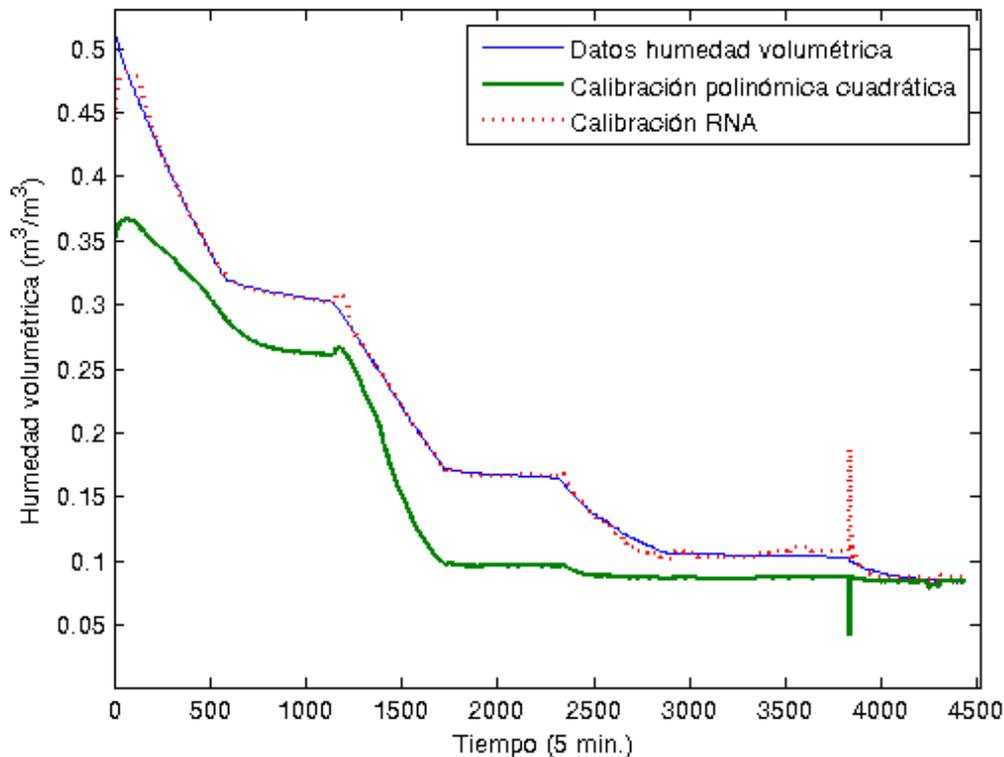


Figura 2.13: Calibración específica para un único sensor; comparación con calibración polinómica.

Las tablas 2.2 y 2.3 ilustran el efecto de tratar de emplear RNA (20 nodos) entrenadas con un sensor para otro sensor del mismo tipo en cada una de las cuatro columnas de suelo; se resaltaron las diagonales de las matrices de resultados, correspondientes a probar una RNA con el sensor específico para el que fue entrenada.

Puede comprobarse una gran variabilidad en el comportamiento de los distintos modelos, observando que el coeficiente de determinación (con excepciones: véase el efecto de la red del 10HS del LC-1 con los datos del LC-2) resulta

Tabla 2.2: RMSE resultado de emplear una RNA entrenada con un sensor con los datos de los demás. Columna izquierda: sensor para el que se entrenó. Fila superior: columnas para las que se obtuvieron los datos.

		RMSE(m^3/m^3)			
Sensor	Columna	LC-1	LC-2	SD-1	SD-2
EC20	LC-1	0,00504	0,0560	0,0682	0,0574
	LC-2	0,0442	0,00806	0,0281	0,0161
	SD-1	0,0613	0,0412	0,00556	0,0207
	SD-2	0,0436	0,0228	0,0182	0,00415
10HS	LC-1	0,00503	0,0556	0,0682	0,0574
	LC-2	0,0442	0,00806	0,0281	0,0161
	SD-1	0,0613	0,0412	0,00560	0,0207
	SD-2	0,0436	0,0228	0,0182	0,00415
5TE	LC-1	0,00484	0,107	0,0775	0,0800
	LC-2	0,0770	0,0143	0,0398	0,0417
	SD-1	0,0676	0,0411	0,0112	0,0240
	SD-2	0,0672	0,0428	0,0222	0,00965

Tabla 2.3: Coeficiente de determinación del modelo (análoga a 2.2).

		R^2			
Sensor	Columna	LC-1	LC-2	SD-1	SD-2
EC20	LC-1	0,998	0,682	0,428	0,490
	LC-2	0,840	0,993	0,903	0,960
	SD-1	0,693	0,828	0,996	0,933
	SD-2	0,845	0,947	0,959	0,997
10HS	LC-1	0,996	0,305	0,934	0,664
	LC-2	0,611	0,977	0,530	0,375
	SD-1	0,956	0,440	0,992	0,719
	SD-2	0,856	0,314	0,912	0,995
5TE	LC-1	0,998	0,917	0,955	0,968
	LC-2	0,517	0,979	0,805	0,730
	SD-1	0,627	0,829	0,985	0,911
	SD-2	0,632	0,815	0,940	0,986

más alto cuando se utilizan datos de columnas de suelo del mismo manejo, especialmente para las de siembra directa.

A la vista de estos resultados, se propuso calcular una única RNA para cada modelo de sensor: EC-20, 10HS y 5TE: uniendo las medidas de varios senso-

res se podría obtener una calibración que sirva en distintas condiciones para distintos sensores (y cuanto más diversas sean esas condiciones mejor será esa calibración general); a cambio, se pierde la precisión que proporciona la calibración específica.

Con el propósito de calcular las RNA que se correspondan con los tres modelos de sensores, se configuró la red (en los tres casos) para que tuviera una única capa oculta de 30 nodos y se empleó un 70% de las muestras para el entrenamiento y un 15% para las fases de validación y pruebas. Para el cálculo de la red óptima se buscó la minimización del RMSE mediante el algoritmo de Levenbergh-Marquardt (Marquardt [1963]). La tabla 2.4 muestra los errores cuadráticos medios de las tres redes y los coeficientes de determinación correspondientes. En ella puede apreciarse un coeficiente de determinación que supera el 90% en los tres casos, llegando a alcanzar el valor de 0,96 en el caso del sensor EC20.

Tabla 2.4: Resultados del entrenamiento de las RNA agrupando los datos por tipo de sensor.

Sensor	MSE	R ²
EC20	$4,3679 \cdot 10^{-4}$	0,955180
10HS	$1,01492 \cdot 10^{-3}$	0,9027
5TE	$9,6792 \cdot 10^{-4}$	0,9028

2.3.3. Evaluación de resultados

La figura 2.14 muestra las curvas de regresión para el caso del sensor EC20. Pueden extraerse curvas muy similares para los tres casos: almacenando los valores de pesos y umbrales, se pueden definir las tres redes y puede procederse a probarlas con los sensores de cada caso.

Para poder evaluar la bondad de estos resultados, se llevó a cabo un ajuste polinómico de orden tres para cada uno de ellos, obteniendo las expresiones mostradas en las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5 (donde y_{sensor} indica el sensor al que se refiere la función de ajuste) y se procedió a comparar los resultados.

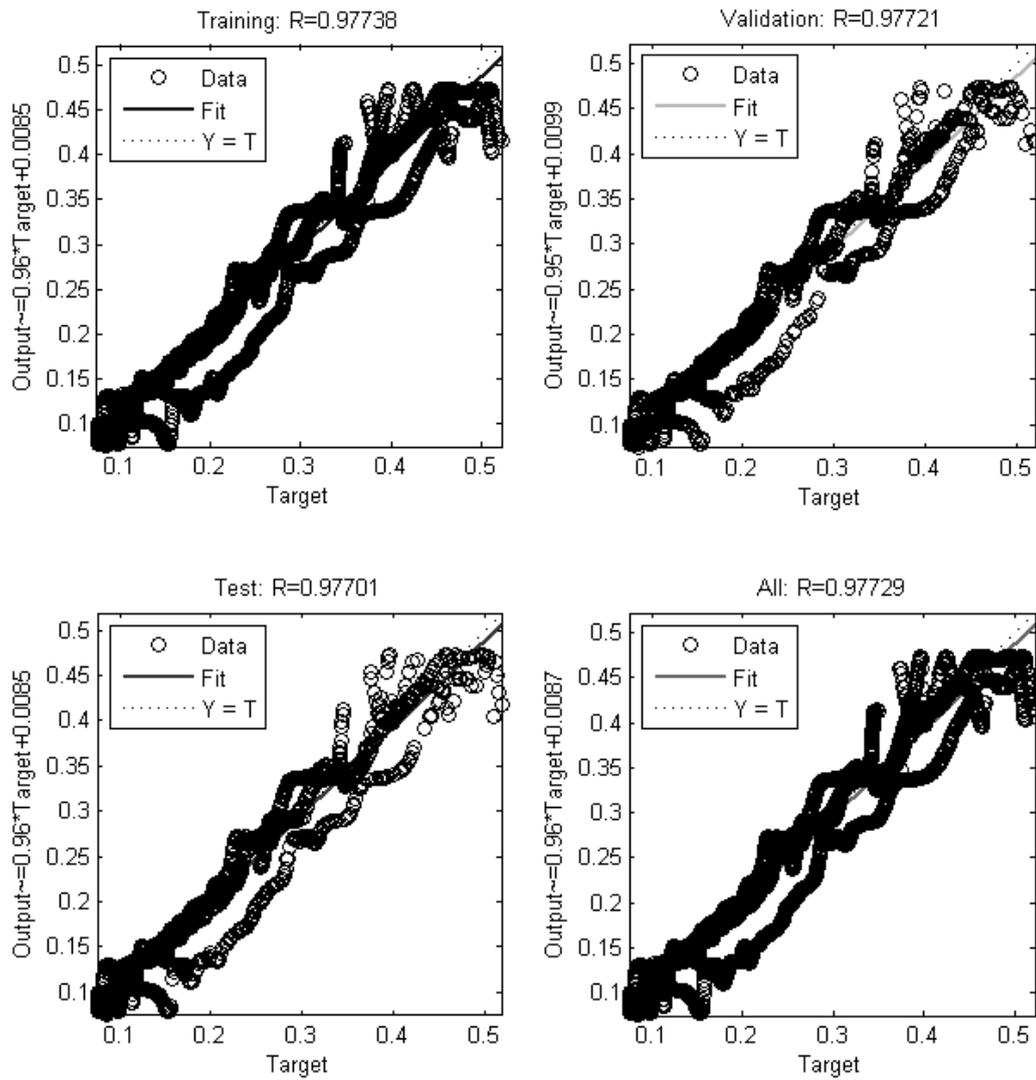


Figura 2.14: Rectas de regresión para la red neuronal artificial para el sensor EC20.

$$\begin{aligned}
 y_{EC20} = & 0,1867 \left(\frac{x - 1157}{287,4} \right)^3 + 0,02032 \left(\frac{x - 1157}{287,4} \right)^2 \\
 & + 0,05832 \frac{x - 1157}{287,4} + 0,173
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

$$y_{10HS} = 0,006488 \left(\frac{x-1197}{168} \right)^3 + 0,03271 \left(\frac{x-1197}{168} \right)^2 + 0,08133 \frac{x-1197}{168} + 0,1662 \quad (2.4)$$

$$y_{5TE} = 0,0007493 \cdot 10^{-4} \left(\frac{x-736}{407,1} \right)^3 - 0,01085 \left(\frac{x-736}{407,1} \right)^2 + 0,1036 \frac{x-736}{407,1} + 0,2075 \quad (2.5)$$

La tabla 2.5 muestra los resultados de comparar la calibración con RNA para cada tipo de sensor con la calibración polinómica; puede observarse cómo las RNA mejoran el resultado de los ajustes polinómicos en prácticamente todos los casos, llegando a una mejora sensible en casos concretos (5TE en el LC1, 10HS en el SD1) y siendo sólo mínimamente inferior para los casos del sensor EC-20 en siembra directa.

Tabla 2.5: Resultado de emplear la calibración global de los sensores sobre los datos de cada sensor. El error RMSE se mide en m^3/m^3 .

Columna	Sensor	RNA		Polinómica	
		RMSE	R^2	RMSE	R^2
Laboreo convencional 1	EC-20	0,0389	0,877	0,0411	0,862
	10HS	0,0294	0,930	0,0325	0,914
	5TE	0,0493	0,802	0,0592	0,714
Laboreo convencional 2	EC-20	0,0152	0,977	0,0192	0,963
	10HS	0,0144	0,951	0,0150	0,947
	5TE	0,0336	0,886	0,0358	0,870
Siembra directa 1	EC-20	0,0352	0,848	0,0339	0,858
	10HS	0,0661	0,768	0,0729	0,717
	5TE	0,0260	0,917	0,0283	0,902
Siembra directa 2	EC-20	0,0098	0,985	0,0096	0,986
	10HS	0,0276	0,882	0,0315	0,846
	5TE	0,0158	0,961	0,0193	0,942

La figura 2.15 muestra la comparación gráfica entre ambas calibraciones en dos casos concretos: el EC20 en el cilindro 1 de laboreo convencional frente al 5TE en el cilindro 2 de siembra directa.

Con respecto a la distribución de humedad en la columna de suelo, se puede ver en la figura 2.16 cómo la variación de ésta en los cilindros marcadores (en la gráfica indicados como C1, C2 y C3) con el diámetro de acuerdo con las

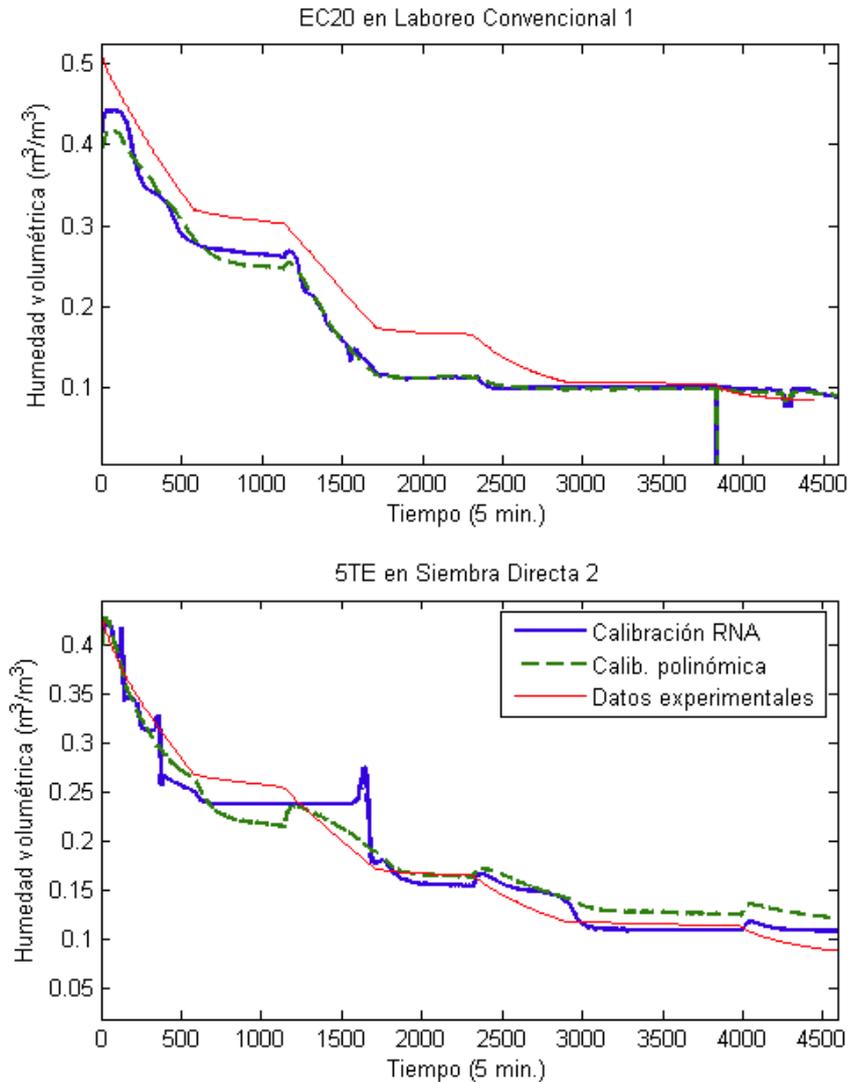


Figura 2.15: Comparación gráfica de calibraciones.

condiciones descritas en la sección anterior es lo bastante reducida como para asumir que no debería afectar a los resultados. Los sensores están insertados en puntos donde se mide el valor medio, que viene representado en la figura por las líneas horizontales. Los niveles medios de humedad gravimétrica cumplen que $\theta_{g1} > \theta_{g2} > \theta_{g3}$, lo que es coherente con las fechas de extracción.

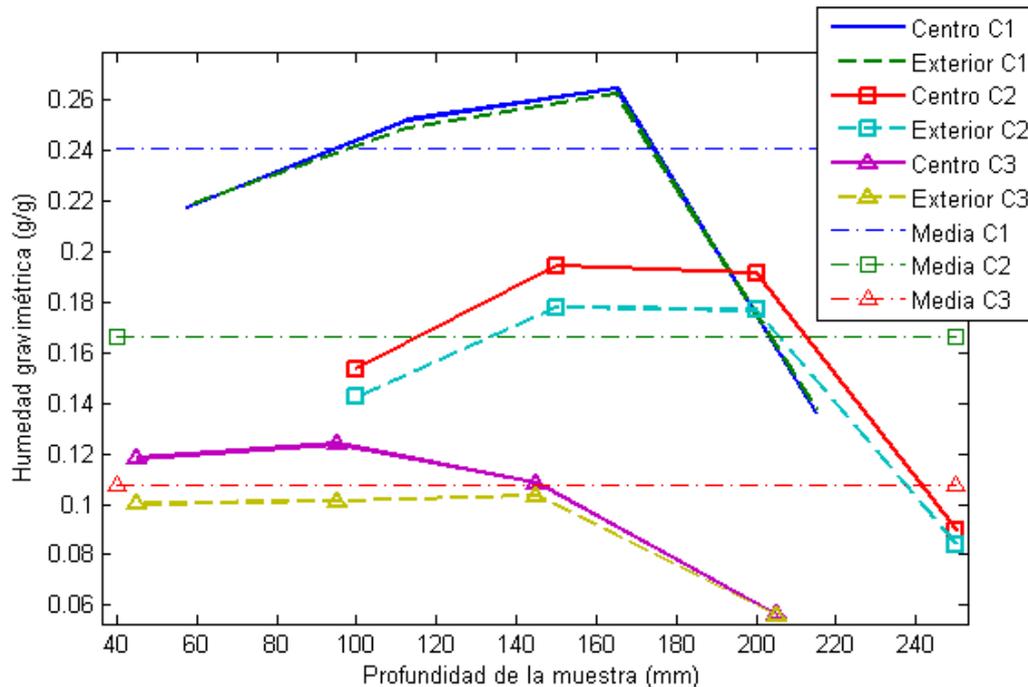


Figura 2.16: Distribución de humedad gravimétrica en columnas de suelo.

2.3.4. Modelo de tres sensores.

Finalmente se diseñó una única RNA en similares condiciones a las anteriores: una capa oculta de 30 perceptrones, pero con la diferencia de ser una red multivariable (tres entradas, una salida); por ello la capa de entrada, que en origen tenía un nodo, ahora tendrá tres, y los nodos de la capa oculta tendrán tres pesos cada uno.

En estas condiciones se obtiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0,991$ y un error cuadrático medio $RMSE = 0,012(m^3/m^3)$. Las rectas de regresión pueden verse en la figura 2.17.

Los resultados para cada uno de los cuatro casos pueden verse en la tabla 2.6. Puede observarse que en los cuatro casos se ha logrado un error de calibración mínimo y el índice de mejora de la eficiencia de Nash-Sutcliffe con respecto a los modelos obtenidos anteriormente supera el 57% para los sensores en columnas de siembra directa (86% en media) y el 91% para los de laboreo convencional (97% en media).

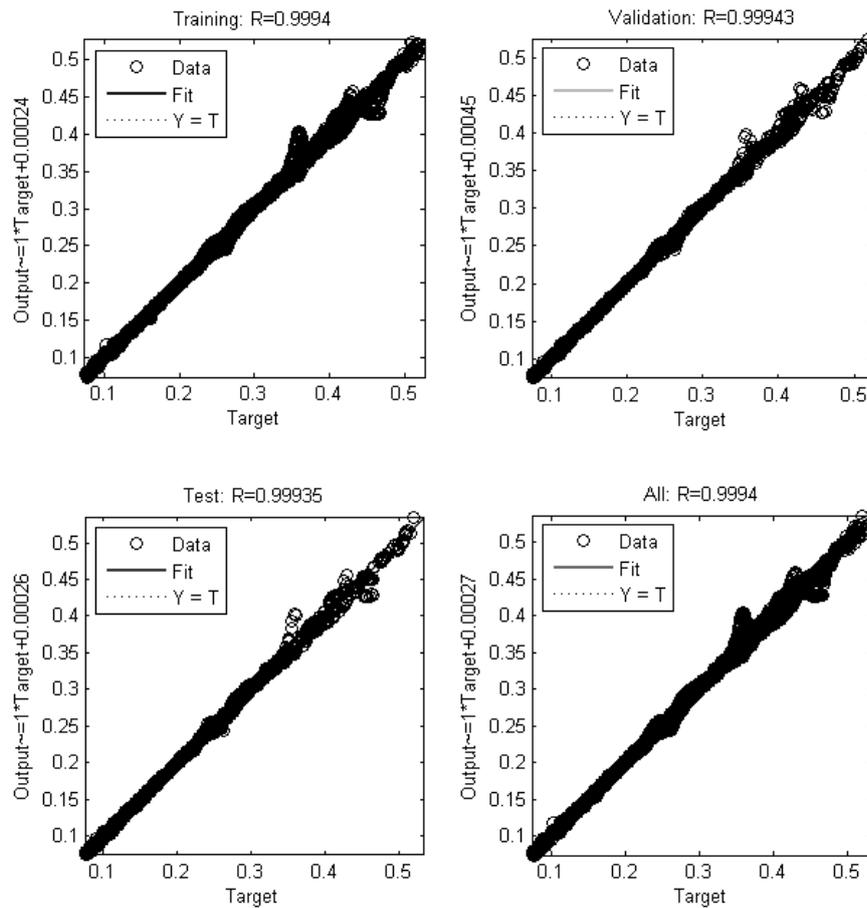


Figura 2.17: Rectas de regresión de la RNA multivariable.

Tabla 2.6: Resultado de aplicar el modelo multivariable a las columnas de suelo. r^2 : término de mejora de la eficiencia con respecto a los resultados de la tabla 2.5.

	RMSE	R^2	r^2		
			EC20	10HS	5TE
Laboreo convencional 1	0,00453	0,998	0,985	0,975	0,991
Laboreo convencional 2	0,00428	0,998	0,917	0,961	0,983
Siembra directa 1	0,0129	0,960	0,718	0,807	0,580
Siembra directa 2	0,00712	0,960	0,727	0,963	0,894

Las figuras 2.18 y 2.19 muestran las curvas de las cuatro columnas de suelo; en todos los casos, la red neuronal obtenida es capaz de llevar a cabo un seguimiento con error mínimo, especialmente para humedades volumétricas por debajo del 35%. La presencia de los mayores errores en humedades elevadas

puede achacarse a que el entrenamiento se hizo con un subconjunto aleatorio del conjunto completo de medidas, en los que las humedades volumétricas obtenidas tienen en su mayoría valores bajos.

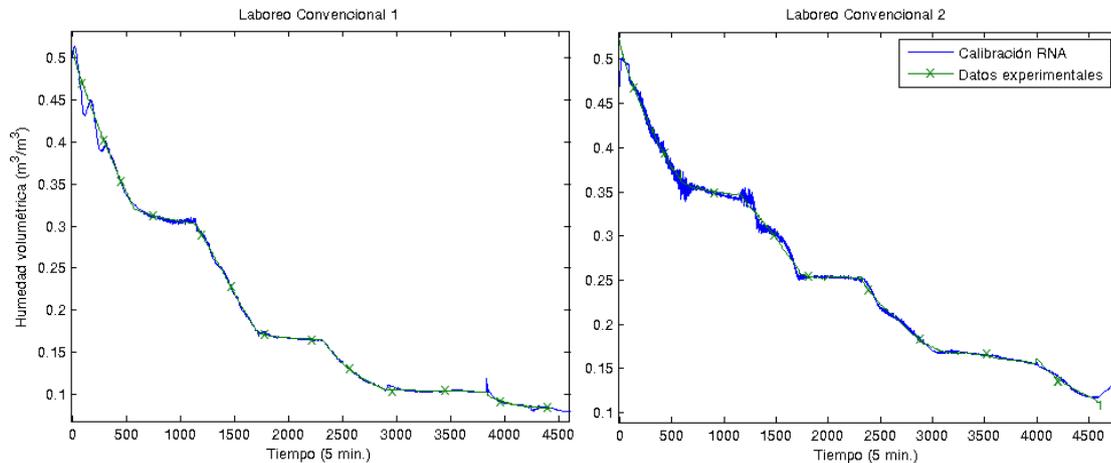


Figura 2.18: Comparación de resultados experimentales y del modelo RNA mixto para suelo con manejo de Laboreo Convencional.

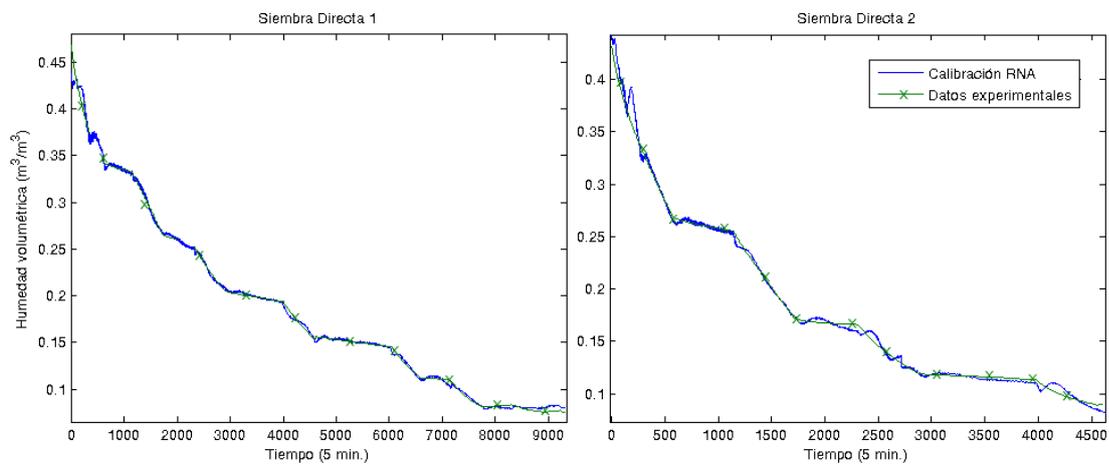


Figura 2.19: Comparación de resultados experimentales y del modelo RNA mixto para suelo con manejo de Siembra Directa.

2.4. Conclusiones

Se ha planteado un protocolo de calibración de sensores de humedad en suelo de la familia ECH_2O de Decagon consistente en extraer muestras inalteradas del suelo de la parcela a estudiar y trasladarlos al laboratorio para su tratamiento. De este modo, se consigue una calibración específica para el tipo de suelo de la parcela sin la complejidad que acarrea una calibración en campo, al llevarse a cabo en un entorno controlado. La obtención de la humedad volumétrica a partir de los datos gravimétricos permite una calibración más fiable y eficiente de los sensores de humedad en suelo.

Las redes neuronales artificiales, por su versatilidad y simplicidad de implementación en un computador digital, pueden resultar una herramienta útil para la calibración de sensores. Los resultados mostraron una sustancial mejora en la calibración de los sensores 10HS y 5TE y una mejora marginal en la de los sensores EC20 con respecto a una calibración basado en ajuste por polinomios cúbicos específica para el mismo problema.

Finalmente, la posibilidad de diseñar una red neuronal artificial con varias entradas abre la puerta al empleo de varios sensores de humedad en un espacio limitado para obtener una medida fiable de la humedad volumétrica aunque las medidas de estos sensores sean diferentes. Se plantea para futuros experimentos el uso de varios sensores del mismo tipo para evaluar el número de sensores necesarios para obtener una medida fiable, afrontando de este modo el problema del control de calidad de los datos.

En el caso estudiado en este capítulo, el empleo de tres sensores de diferentes modelos permitió obtener coeficientes de determinación que, en el peor de los casos posibles, superaban el 95%, lo que muestra claramente la idoneidad del método. Queda pendiente para trabajos futuros la prueba de esta calibración en otros ensayos para excluir problemas de condicionamiento.

Capítulo 3

Modelado de la variabilidad espacio-temporal del contenido de humedad en suelo

3.1. Introducción

La humedad del suelo es un factor esencial en los procesos físicos, químicos y biológicos que transcurren a través de un medio poroso y finito en la interfaz suelo-planta-atmósfera, siendo además el vector principal de comunicación entre los componentes del mismo. Determina qué parte del aporte de agua (bien en forma de precipitación, bien en forma de riego) se infiltra, qué parte se queda encharcada en superficie o se pierde por escorrentía o infiltración profunda y cómo será devuelta a la atmósfera el agua almacenada en el suelo a través de los procesos de evaporación y transpiración, incidiendo así en el reparto de la energía entre calor latente y sensible en la superficie de la tierra.

En climas áridos o semi-áridos, como es el caso del andaluz, la humedad del suelo es el primer factor limitante para el crecimiento vegetativo y la producción de biomasa. Por tanto se puede considerar la humedad del suelo como el

nexo de unión entre los ciclos globales de energía, agua y carbono que rigen a su vez la interacción entre el clima, el suelo y la vegetación. Esta idea constituye la base de la ecohidrología, desarrollada por Rodríguez-Iturbe [2000] a partir de los trabajos iniciales de Peter Eagleson (Eagleson [1978], Eagleson [2002]), un marco para el análisis integrado de procesos ecológicos y geofísicos que determinan el balance del agua de una zona.

El modelo del balance de agua no es una idea nueva; los primeros fueron desarrollados por Thornthwaite [1948] y fueron posteriormente revisados en Thornthwaite y Mather [1955]. Este balance de agua muestra la influencia que ejerce la humedad del suelo sobre la infiltración, evapotranspiración y recarga a través de relaciones no lineales que dificultan su aparentemente sencilla solución. Considerando la ocurrencia y el volumen descargado de la precipitación como procesos estocásticos, la ecuación del balance de aguas se convierte en una ecuación diferencial estocástica en S , donde S es el contenido de humedad en suelo¹; para dicha ecuación, Rodríguez-Iturbe [2000] propusieron una solución analítica en diferentes condiciones de flujo en superficie que permita estudiar la interacción dinámica entre el clima, el suelo y la vegetación en las diversas situaciones. Entre estas situaciones destaca por su gran interés el caso de la limitación de agua, en el que la humedad del suelo condiciona la distribución de la vegetación (Rodríguez-Iturbe y otros [2001], Porporato y otros [2002]).

Estudios recientes sobre la aceleración del ciclo hidrológico global (Gedney y otros [2006]), sobre los cambios en los patrones mundiales de escorrentía continental (Milly y otros [2005]) y sobre procesos de realimentación en la capa límite de la atmósfera (Koster y otros [2004]) renuevan el interés en la dinámica de la humedad del suelo y su control sobre la interacción suelo-planta-atmósfera a distintas escalas. Una mejor representación de la variabilidad espacial de la humedad del suelo mejoraría las predicciones de modelos hidrológicos (Famiglietti y Wood [1994]), modelos de circulación general (Delworth y otros [1993]) y modelos de predicción meteorológica o climatológica (Koster y otros [2000]). El Programa de Investigación sobre Cambio Global de EEUU (Anthes y Moore [2007]), destacaba la humedad del suelo como «el parámetro más importante en la interacción entre los componentes claves de los procesos hidrológicos y biogeoquímicos». En este sentido, no faltan estudios recientes como Flint y otros [2013] para caracterizar modelos hidrológicos de forma precisa. En Cuthbert y otros [2013] se analiza el balance de aguas para estimar los componentes de la recarga.

¹Anteriormente, se ha utilizado el término θ_v para la humedad volumétrica; o incluso VWC . Sin embargo, en este capítulo se usará la variable S por coherencia con la nomenclatura empleada por Rodríguez-Iturbe [2000].

Los avances recientes en la tecnología de los sensores remotos, tanto aerotransportados (Famiglietti y otros [2008]) como de satélite (Owe y otros [2008]), ofrecen amplias posibilidades para observar la humedad en los primeros centímetros del suelo a escalas regionales y globales, así como su uso en la determinación del estado hídrico de los cultivos. Durante la última década se han desarrollado en distintas zonas de EEUU varios experimentos de campo a gran escala, para obtener datos puntuales de humedad del suelo y micro-meteorología a distintas escalas con los que se podrán perfeccionar, desarrollar y validar los modelos que predigan la humedad del suelo a partir de imágenes de sensores remotos, obtenidos simultáneamente con los datos de campo. Famiglietti y otros [2008] emplearon datos observados in situ durante estos experimentos para estudiar la variabilidad de la humedad del suelo a escalas entre 2,5m y 50km. La medida eficiente de la humedad del suelo en campo para este intervalo de escalas es un reto recurrente, que sigue sin respuesta inequívoca hasta la fecha. Los procedimientos tradicionalmente empleados para obtener los datos de humedad del suelo in situ (Cosh y otros [2005]) contrastan con el elevado nivel tecnológico de los sensores remotos empleados y los algoritmos desarrollados para la interpretación de aquellos (Merlin y otros [2008]).

Tal y como se indicó en el capítulo 2, la medición adecuada del contenido de agua en suelo resulta crítica para la estimación de los balances de agua y energía, así como para comprender los procesos biológicos y químicos en todo el sistema suelo-planta. Los sensores empleados para medir el contenido de agua en suelo en el presente capítulo son sondas FDR, elegidos por su bajo coste, facilidad para el almacenamiento de datos, posibilidad de monitorización continua y funcionamiento en un amplio rango de tipos de suelos; y con sondas TDR, escogidas por su mayor fiabilidad a la hora de obtener medidas que permitan identificar los parámetros del modelo.

Con suficiente información del sistema, es posible obtener una identificación de los parámetros del modelo para comprobar hasta qué punto retrata fielmente los procesos del sistema Suelo-Planta-Atmósfera que se intentan modelar.

3.2. Material y métodos

3.2.1. El modelo del cubo

Un primer intento por modelar la dinámica del agua en el suelo en forma de ecuación de continuidad se debe a Thornthwaite [1948]. Este modelo se ha ido refinando a lo largo del tiempo; por ejemplo, Alley [1984] planteó los distintos componentes del balance de aguas. El modelo a partir del cual se desarrolla este capítulo fue propuesto por Rodríguez-Iturbe y otros [1999]: consiste en un modelo de tipo «leaky bucket», una ecuación de continuidad en la que se establece un balance de aguas, estipulando que el incremento del contenido de humedad en suelo varía linealmente con la suma de una serie de aportaciones y pérdidas.

$$nZ_r \frac{dS}{dt} = I(S, t) - L(S) - T(S) - E(S) \quad (3.1)$$

donde:

- n es la porosidad del suelo.
- Z_r es la profundidad de la zona de las raíces.
- $S(t)$ es el contenido de humedad en suelo.
- $I(S, t)$ es la infiltración de agua en el suelo; se obtiene sumando la lluvia y el riego (de haberlo) y restando la intercepción de la vegetación.
- $L(S)$ son las pérdidas por percolación.
- $T(S)$ son las pérdidas debidas a la transpiración de la planta.
- $E(S)$ son las pérdidas por evaporación.

Infiltración

En el modelo original se trabaja en grandes extensiones de terreno (a nivel de cuenca) sin regadío, por lo que todas las infiltraciones se deben a precipita-

ciones. Estas precipitaciones se modelan como procesos estocásticos, de modo que se modela la llegada de tormentas como una variable aleatoria de Poisson y la intensidad de dichas tormentas (medidas en mm, esto es, l/m^2) como una variable aleatoria exponencial. A su vez, a las precipitaciones hay que restar la intercepción debida a vegetación y el volumen no saturado de la zona radical:

$$I(S(t_i^-), t_i) = \text{mín}[P(t_i), nZ_r(1 - S(t_i^-))] \quad (3.2)$$

donde $P(t_i)$ son las precipitaciones y t_i^- es el instante inmediatamente anterior.

Percolación

En Laio y otros [2001] se describe el comportamiento de la percolación de la zona de las raíces como la conductividad hidráulica no saturada, descrita en la forma

$$L(S) = K_{sat} \frac{e^{\beta(S-S_{fc})} - 1}{e^{\beta(1-S_{fc})} - 1} \quad (3.3)$$

donde K_{sat} es la conductividad hidráulica saturada y β es un parámetro del suelo.

La capacidad de campo S_{fc} se define como el punto por debajo del cual la percolación es despreciable con respecto al resto de pérdidas.

Evapotranspiración

Las «pérdidas» por transpiración no son tales: interesa que la planta transpire en la medida de sus posibilidades. Su expresión se obtiene de:

$$T(S) = \begin{cases} 0, & S \leq S_w; \\ \frac{S-S_w}{S^*-S_w} T_{max} & S_w < S \leq S^*; \\ T_{max}, & S > S^*. \end{cases} \quad (3.4)$$

donde T_{max} representa la máxima tasa de transpiración que marca la demanda atmosférica en la unidad de tiempo. S^* es el umbral de saturación a partir de la cual la planta ya no puede transpirar más. S_w es el umbral inferior (humedad residual) por debajo del cual la planta no tiene suficiente humedad para llevar a cabo el proceso de transpiración.

Análogamente, la evaporación de la zona radical se puede obtener a partir de:

$$E(S) = \begin{cases} 0, & S \leq S_h; \\ \frac{S-S_h}{S^*-S_h} E_{max} & S_h < S \leq S^*; \\ E_{max}, & S > S^*. \end{cases} \quad (3.5)$$

donde E_{max} representa la máxima evaporación en la unidad de tiempo y S_h es el umbral por debajo del cual la tierra retiene la humedad, impidiendo su evaporación. La figura 3.1 muestra la suma de los tres efectos de pérdida: pueden observarse cinco regiones.

1. En la primera región, $S < S_h$, la humedad del suelo es tan pequeña que éste la retiene, impidiendo evaporación y transpiración.
2. En la segunda región, muy pequeña ($S_h < S < S_w$), existe evaporación pero la planta no puede transpirar.
3. En la tercera región ($S_w < S < S^*$), la evaporación y la transpiración actúan de forma lineal sobre el contenido de agua en la zona de las raíces.

4. En la cuarta región ($S^* < S < S_{fc}$), se alcanza una saturación evapotranspirativa; ni la atmósfera ni la planta son capaces de expulsar la humedad del suelo más allá de un límite teórico, la evapotranspiración máxima.
5. En la quinta región, $S > S_{fc}$, las pérdidas por percolación predominan sobre el resto de los efectos.

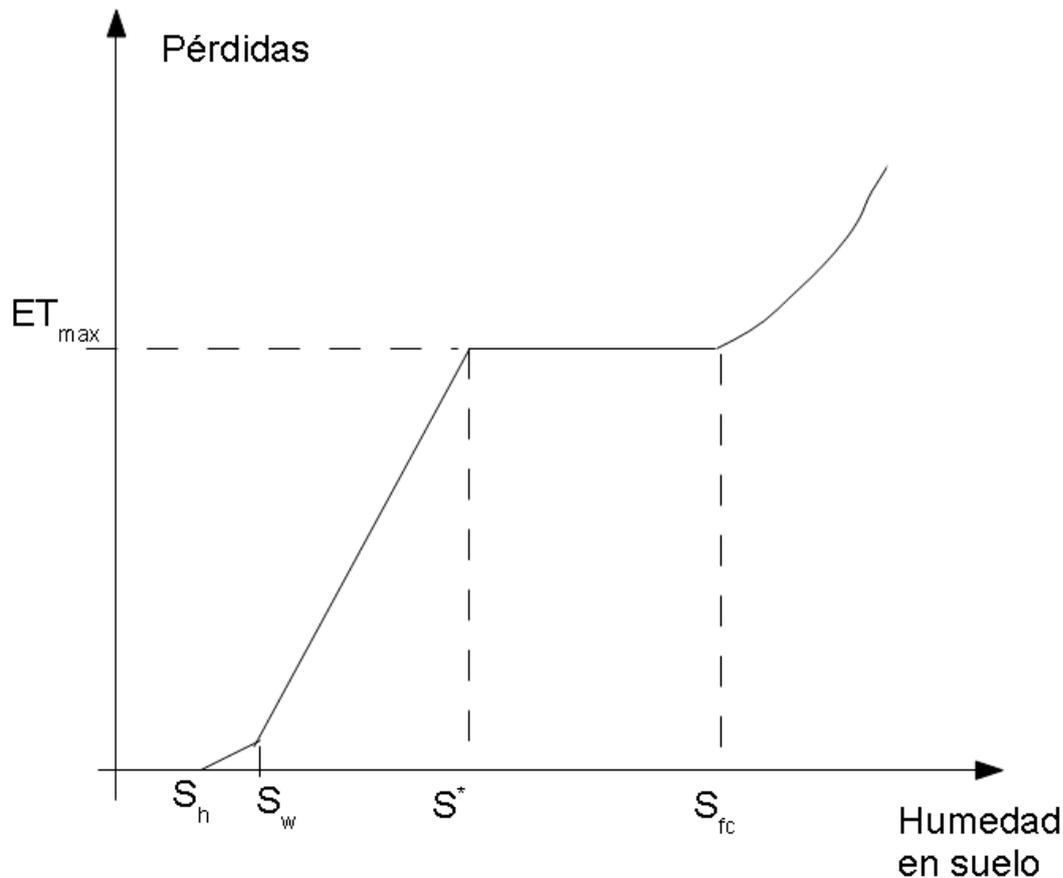


Figura 3.1: Suma de los efectos de las pérdidas

3.2.2. Modificaciones

El modelo descrito se enuncia con el objeto de aplicarse a escala de cuenca. El carácter estocástico de las precipitaciones en dicho modelo permite predecir

la forma en la que se va a comportar la variable del sistema (contenido de humedad en suelo) a lo largo del tiempo, típicamente un año (una campaña). Sin embargo, no hay nada que impida reducir la escala de trabajo desde la cuenca hasta la parcela, lo que permitiría aplicar el modelo a escala agronómica; si bien los experimentos se han conducido en cultivos de secano, no hay ningún motivo real por el que no se pueda aplicar a regadíos, con lo que el estudio a nivel de parcela permitiría tener un modelo del sistema suelo-planta-atmósfera (en lo sucesivo, SPA) que permita el diseño de controladores de riego que mantengan la humedad dentro de unos márgenes óptimos. Más aún, incluso dentro de una parcela, es posible dividir ésta en sectores, ya que estos no tienen por qué tener el mismo contenido de agua en suelo debido a su diferente orografía. Esta subsección detalla las modificaciones necesarias para llevar a cabo este cambio de enfoque.

Ángulos de inclinación

Si dividimos la parcela en sectores iguales (por simplicidad) de forma rectangular, se puede aplicar el modelo descrito a cada uno de éstos por separado sin necesidad de alterarlo. Sin embargo, esto no será correcto debido a un factor adicional no tenido en cuenta originalmente: la orografía del terreno. Esto es, si dos sectores contiguos están a diferentes alturas, es de esperar que el agua obedezca a la ley de la gravedad y se transmita del sector más alto al más bajo, al menos en parte. Es por ello que necesitamos añadir una variable adicional al sistema: la altura media del sector, h . Evidentemente, para una precisión óptima desde el punto de vista teórico tendríamos que trabajar con sectores de tamaño infinitesimal y alturas instantáneas, pero eso no resultaría práctico y ha de alcanzarse un compromiso respecto al tamaño razonable del sector. A menudo, lo más recomendable es aprovechar la geometría del sistema de regadío y tener tantos sectores en la parcela como sectores de riego diferentes el agricultor desee instalar.

Una vez obtenida la altura del sector h , resulta fácil obtener el ángulo de inclinación entre dos sectores, θ :

$$\theta = \arctan \frac{l}{h_1 - h_2} \quad (3.6)$$

Donde l es el lado del sector (distancia entre los puntos medios de ambos sectores) y h_i la altura de cada sector. Para cada sector se calculará el ángulo de inclinación con respecto a los cuatro sectores contiguos. Una alternativa a esta geometría, siguiendo a Toth [1972], sería emplear celdas hexagonales, la forma más eficiente de teselar un plano en el espacio euclídeo. Sin embargo, llevar a cabo ese tipo de división de parcela en campo añade excesiva complicidad al sistema.

Flujo lateral

Si tomamos un sector en tres dimensiones como un paralelepípedo de lados (a, b) y profundidad Z_r , es posible definir un flujo de pérdidas separado en dos componentes:

$$\vec{F}_L = F_{L_u} \hat{u} + F_{L_z} \hat{z} \quad (3.7)$$

Donde \hat{u} es un vector unitario en la dirección de inclinación (esto es, tangente a la superficie) y \hat{z} es el vector unitario vertical. Asumiendo flujo constante, se podrán separar las pérdidas en tres componentes: aporte lateral en dirección x , aporte lateral en dirección y y pérdidas por percolación. Naturalmente, puesto que cada sector tiene cuatro sectores adyacentes, se dividirá a su vez el sector a su vez en cuatro componentes, cada uno de los cuales tendrá un aporte a o desde sectores adyacentes.

- Aporte lateral a los sectores en la dirección del eje x : $L_x = \frac{L}{4} \frac{z_r}{a} \text{sen}(\theta_x)$ si $\theta_x > 0$
- Aporte lateral a los sectores en la dirección del eje y : $L_y = \frac{L}{4} \frac{z_r}{b} \text{sen}(\theta_y)$ si $\theta_y > 0$
- Pérdidas por percolación: $L_z = L - L_{x_1} - L_{x_2} - L_{y_1} - L_{y_2}$

Naturalmente, si el ángulo de inclinación es cero o negativo, los términos de aportes laterales se anulan. El siguiente paso es añadir a la infiltración los aportes de estos sectores contiguos, de modo que partiendo de la ecuación 3.2

la infiltración y las pérdidas quedan como se muestra en la ecuación 3.8, donde los i del sumatorio hacen referencia a los elementos contiguos y l_i es la longitud del lado que actúa como frontera con el elemento i .

$$I(S(t^-), t) = \min\{P(t), nZ_r[1 - S(t^-)]\} + \sum_{\theta_i < 0}^{1..,4} L_i \quad (3.8)$$

$$L_i = \begin{cases} \frac{L}{4} \frac{z_r}{l_i} \text{sen}(\theta_i) & \text{si } \theta_i > 0 \\ 0 & \text{si } \theta_i \leq 0 \end{cases}$$

Escorrentía

Comoquiera que el flujo lateral es un componente de las pérdidas por percolación, por lo visto en la figura 3.1 su efecto será pequeño excepto en momentos de saturación, que en principio un control adecuado trataría de evitar (o sobre los que, en el peor de los casos, no actuaría): «el flujo lateral a través del suelo es despreciable en entornos semi-áridos», según Bull y Kirkby [2002]. Sin embargo, hay otro efecto de la diferencia de alturas que sí resulta relevante: la escorrentía (Reaney y otros [2007]), esto es, el flujo lateral de agua sobre la superficie del terreno, sin que se produzca infiltración en éste.

La escorrentía, como es lógico, sólo se producirá cuando exista precipitación o bien cuando el terreno esté tan saturado de agua que no sea capaz de filtrar el aporte en el ciclo de tiempo anterior. Dependerá, naturalmente, del tiempo y del ángulo de inclinación. Para simplificar el problema, se asumirá que la dependencia temporal se halla implícita en las precipitaciones $P(t)$ y en la evolución del contenido de agua en suelo $S(t)$. Asumiendo una dinámica de primer orden, caracterizamos la escorrentía como:

$$Esc_i(t) = I(1 - e^{-S(t)/\tau_{esc}}) \frac{\theta_i}{\sum_{j=1, \theta_j > 0}^4 \theta_j} \quad (3.9)$$

donde τ_{esc} es el coeficiente de escorrentía, una constante que habrá de añadirse al modelo y obtener mediante el proceso de calibración.

Lo que nos lleva a un problema circular: la escorrentía depende de la infiltración, pero a su vez la infiltración depende de la escorrentía. Para resolver este conflicto, la escorrentía se calculará a partir del valor de la infiltración en el instante anterior t^- , quedando la expresión de la ecuación 3.10 donde los sumatorios se refieren a los sectores contiguos.

$$I(S(t^-), t) = \min \{P(t), nZ_r[1 - S(t^-)]\} + \sum_{\theta_i < 0}^{1..,4} L_i + \sum_{\theta_i < 0}^{1..,4} Esc_i(t) - \sum_{\theta_i > 0}^{1..,4} Esc_i(t) \quad (3.10)$$

3.2.3. Entorno de simulación

Los experimentos se llevaron a cabo a lo largo de dos años en una parcela perteneciente a en la finca «Tomejil», situada en el término municipal de Carmona (Sevilla). La parcela se divide en dieciocho sectores tal y como muestra el diagrama de la figura 3.2.

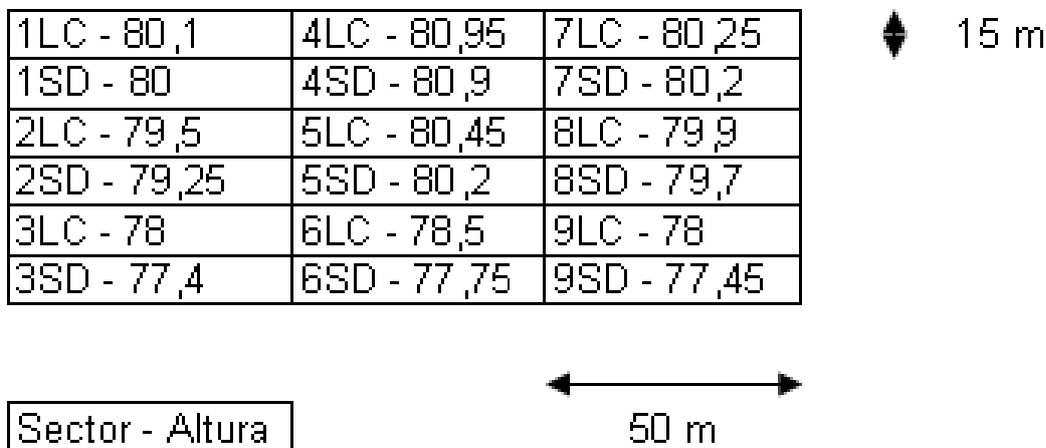


Figura 3.2: Separación en sectores de la parcela de estudio

El modelo descrito en 3.2.2 se programó en entorno Matlab (©The Mathworks, inc. Natick, MA, EE.UU.). El programa consta de cuatro partes principales:

1. La célula. Es un objeto que modela un sector de la parcela y sus propiedades son sus dimensiones (x e y), su altura sobre el nivel del mar (las alturas en metros se pueden observar en la figura 3.2) y los ángulos de inclinación θ con respecto a sus sectores vecinos.
2. Las tablas. La interfaz del programa con el usuario, donde puede verse el estado de la simulación en todo momento. Existe una tabla donde se describen las posiciones de las células en el plano (la parcela), otra donde encontramos los aportes laterales y de escorrentía para cada sector en el instante de tiempo de la simulación y -finalmente- una tabla adicional que recoge el contenido de humedad en suelo (salida del modelo y variable de interés) en el instante de tiempo de simulación.
3. La función f . El modelo descrito se puede resumir en $\frac{dS}{dt} = f(S, t)$, así que es imprescindible una función que calcule cuánto vale esa $f(S, t)$ en cada caso. Devolverá las dos tablas de información para un instante de tiempo: el contenido de humedad en suelo y los términos de escorrentía y aporte lateral que se intercambian entre los distintos sectores.
4. El algoritmo de simulación. Tomando como entrada las precipitaciones en el intervalo de tiempo T , el algoritmo lleva a cabo un procedimiento de integración numérica empleando la herramienta ode45 de Matlab®; dicha herramienta utiliza una fórmula explícita de Runge-Kutta 4,5 (de ahí su nombre: *Ordinary Differential Equation 4,5*) conocida como la pareja Dormand-Prince (Dormand y Prince [1980]). Como en este sistema las lluvias actúan como entrada y no son predecibles, la función es llamada una vez por cada intervalo de integración (tiempo de muestreo) T_m . De este modo, no sólo se obtiene la humedad en cualquier instante, sino que se puede obtener también otra información (por ejemplo, la escorrentía) para cada paso de integración.

El programa completo crea las tablas, ejecuta el algoritmo y representa a lo largo del tiempo el contenido de humedad en suelo para cada sector y la media de la parcela.

3.2.4. Calibración

Para calcular los parámetros del suelo, se aprovechó un experimento previo, desarrollado a lo largo de los años 2003 y 2004 por Jiménez-Bocanegra y

otros [2005] en una parcela adjunta, de idénticas características de suelo y cultivo aunque diferentes dimensiones. El motivo del uso de dicho experimento es que en dichas parcelas se hayan instaladas sondas de tipo EnviroScan (SENTEK Technologies Ltd., Stepney, Australia) de mayor precisión y fiabilidad (Arauzo y otros [2007]).

Esta parcela adjunta consta de cuatro sectores de dimensiones 75 x 15 m, situados a las siguientes altitudes sobre el nivel del mar tal y como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Esquema de la parcela adjunta. Las altitudes se miden en metros.

80	80.5
81	81.5

Los datos de precipitación se obtienen a partir de una estación meteorológica perteneciente a la Red de Información Agroclimática del IFAPA y puesta a disposición del público. Dicha estación se halla ubicada a menos de cien metros de la parcela. Esos datos se utilizaron como entrada del sistema; los datos de humedad relativa obtenidas por las sondas EnviroScan se comparan con la salida del sistema y se ajustan los parámetros mediante el algoritmo de punto interior del Toolbox de optimización de Matlab®(Mehrotra [1992]).

3.3. Resultados

Una vez se han aplicado todos los cambios indicados en la ec. 3.10 al modelo original de la ec. 3.1, se obtiene la expresión de la ec. 3.11. Hecho esto, se puede proceder a identificar los parámetros del modelo.

$$\begin{aligned}
 nZ_r \frac{dS}{dt} = & \min \{P(t), nZ_r[1 - S(t^-)]\} + \sum_{\theta_i < 0}^{1..4} L_i + \\
 & + \sum_{\theta_i < 0}^{1..4} Esc_i(t) - \sum_{\theta_i > 0}^{1..4} Esc_i(t) - L(S) - T(S) - E(S)
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

Para destacar las diferencias de comportamiento del suelo entre la época de lluvias y la seca, se separó el modelo en dos partes, cada una de ellas con distintos parámetros S_h , n , E_{max} y T_{max} . Buscando la minimización del error medio al cuadrado (SSE), se obtienen los siguientes valores para los parámetros del sistema:

- Porosidad $n = 1$ para la estación húmeda, $n = 0,3$ para la estación seca.
- $\beta = 11,3704$
- $K_{sat} = 51,82cm/u.t.$
- $S_h = 0,1$ para la estación húmeda, $S_h = 0,0163$ para la estación seca.
- $S_W = 0,2$
- $S^* = 0,4$
- $S_{fc} = 0,5515$
- $\tau_{esc} = 69,73$
- $E_{max} = 0,1cm/u.t.$ para la estación húmeda, $E_{max} = 0,3823cm/u.t.$ para la estación seca.
- $T_{max} = 0,2cm/u.t.$ para la estación húmeda, $T_{max} = 0,5cm/u.t.$ para la estación seca.
- Profundidad de la zona radical Z_r : $0,95m$ para las celdas con laboreo convencional, $0,70m$ para las celdas con siembra directa.
- Separación entra la estación húmeda y la seca: día 185.

Evidentemente estos valores son promedios para ambas estaciones; si se dividiera estas estaciones en períodos más pequeños (por ejemplo, de 30 días), podrían obtenerse valores más ajustados a costa de complicar el problema y añadir condicionamientos al modelo, lo que podría provocar pérdida de generalidad.

En este caso, $u.t.$, es la unidad de tiempo en la que se ha ejecutado la simulación, que se corresponde con 1 día. Un cambio en el tiempo de simulación implicaría obviamente un cambio en los valores afectados por éste.

Con estos parámetros del sistema, los errores obtenidos:

$$\begin{aligned}SSE &= 0,007893 \\RMSE &= \sqrt{RMSE} = 0,0888 \\SS_{med} &= 0,031886 \\R^2 &= 1 - \frac{SSE}{SS_{med}} = 0,752\end{aligned}\tag{3.12}$$

La figura 3.3 muestra el resultado de simular con estos parámetros la parcela menor, en la que estos resultados se pueden comparar con los obtenidos por sensores de alta precisión. Puede observarse cómo, aun teniendo mayores picos y una dinámica más rápida que la indicada por los sensores, sigue la tendencia de forma razonablemente satisfactoria (tal y como se puede esperar del coeficiente de determinación obtenido en 3.12).

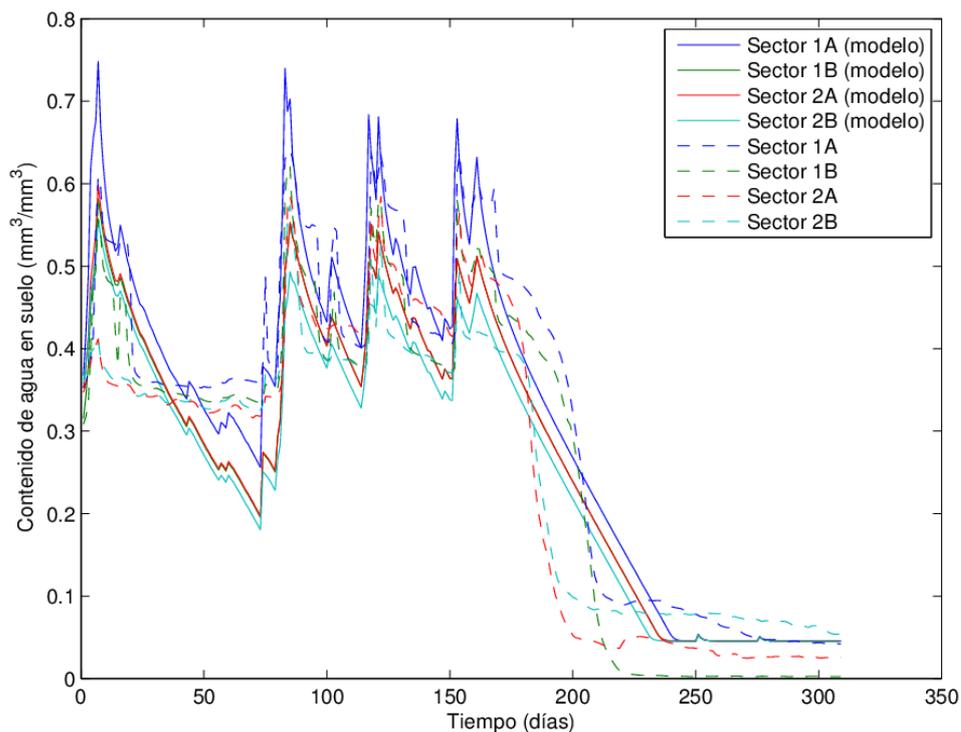


Figura 3.3: Resultado de la identificación de parámetros

La figura 3.4 muestra cómo se distribuyen las pérdidas del sistema según la estación, húmeda o seca. Puede apreciarse cómo las pérdidas por percolación tienen un papel mucho más importante en la estación húmeda mientras que en la seca la evapotranspiración tiene mucho más peso. Como era de esperar, sigue un patrón similar a la curva mostrada en la figura 3.1.

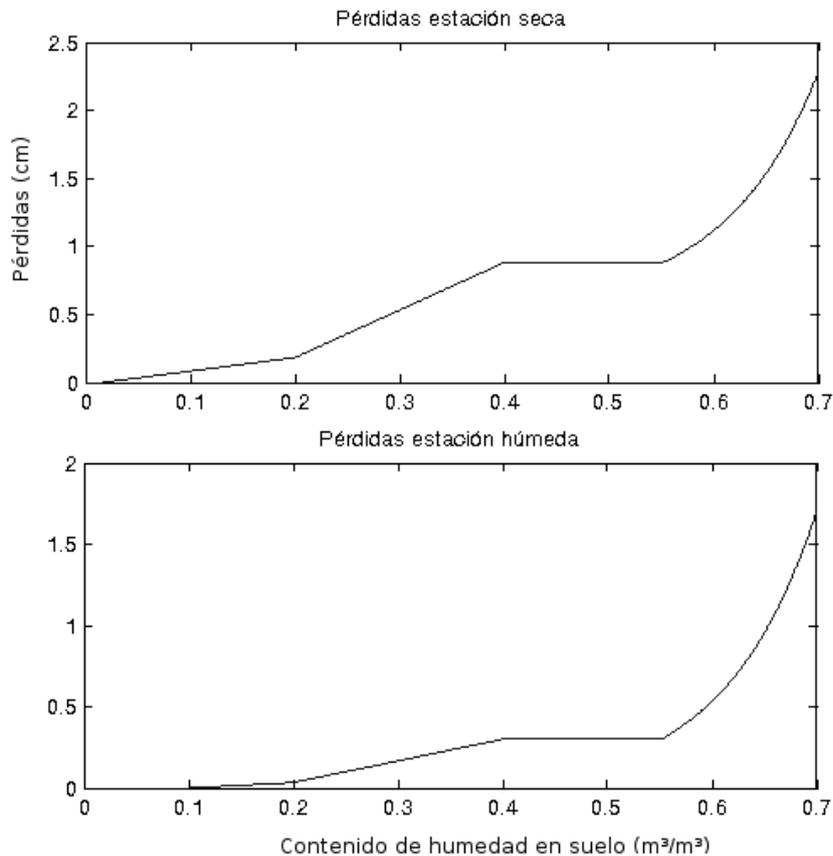


Figura 3.4: Distribución de pérdidas en función del contenido de humedad en suelo según la estación.

Finalmente, la figura 3.5 muestra el resultado de aplicar este modelo a las condiciones de la parcela principal de estudio, sobre la que se ensayarán los controladores en el próximo capítulo. Puede observarse cómo los sectores de mayor altitud conservan menor cantidad de agua, como cabía esperarse.

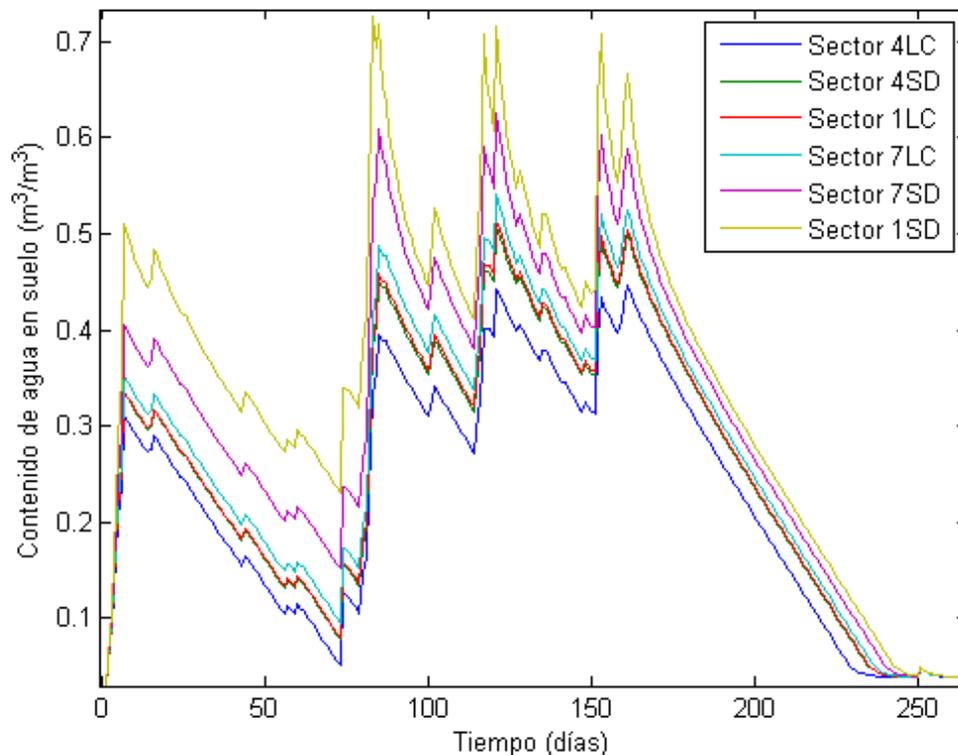


Figura 3.5: Simulación de la parcela de estudio con los parámetros obtenidos para el modelo.

3.4. Conclusiones

El modelo «del cubo» planteado por Rodríguez-Iturbe y otros [1999] es un modelo ampliamente empleado en hidrología para modelar el contenido de agua en suelo. Dicho modelo es una ecuación de continuidad que vincula ese contenido con las entradas al sistema, en forma de precipitaciones o de riego, y sus salidas, en forma de evaporación, transpiración y pérdidas por percolación.

Sin embargo, su uso es a gran escala, normalmente de cuenca, abarcando regiones muy amplias con valores promedios. En este capítulo se plantea la posibilidad de utilizar esa ecuación de continuidad a escala de parcela; más aún, de dividir la parcela en celdas y crear un modelo de parámetros distribuidos

que permita conocer el estado hídrico de las diferentes celdas de la parcela. Para ello, además de las entradas y salidas que tenía el modelo original, se han añadido dos entradas/salidas adicionales: los aportes laterales, tanto en la zona radical como en la superficie, donde se produce la escorrentía en caso de lluvias. Para ello, hay que tener en cuenta nuevas magnitudes en el modelo, magnitudes geométricas: las dimensiones de la celda y la inclinación del terreno, que condicionarán necesariamente la aparición de flujos laterales tanto en superficie como en subsuelo.

El modelo tiene una severa limitación de tipo geométrico: al ser las celdas rectangulares, la teselación dista mucho de ser perfecta; se debería plantear la posibilidad de dividir las parcelas en celdas hexagonales, donde cada celda tiene seis vecinos en lugar de cuatro. Sin embargo, la parcela experimental estaba dividida en celdas rectangulares al empezar el experimento, lo que resulta intuitivamente más sencillo a la hora de hacer estas divisiones en campo; además, la programación de celdas rectangulares resulta mucho más sencillo a la hora de programar el entorno de simulación.

Con dichas modificaciones, se programó un entorno de simulación software con dos objetivos:

1. En primer lugar, se pretendió identificar los parámetros del modelo. Se trata de parámetros obtenibles con diversos experimentos de laboratorio; sin embargo, en su lugar se aprovechó un ensayo de campo anterior en la que la medida del contenido volumétrico de humedad en suelo fue obtenida con sensores de gran fiabilidad. El entorno de simulación obtuvo los parámetros óptimos del suelo a partir de esos valores, estableciendo dos grupos de parámetros según la estación -húmeda o seca-.
2. En segundo lugar, con los parámetros ya identificados, emplear dicho entorno de simulación para la prueba de distintos controladores automáticos. El desarrollo de este objetivo se verá en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Control del contenido de agua en suelo

4.1. Introducción

La determinación de la humedad de la superficie del suelo no debe ser un fin; antes bien, debe ser un paso intermedio necesario para integrar esta información en esquemas de asimilación de datos, combinando datos observados con estimaciones de modelos de la interacción suelo-vegetación-atmósfera (Kumar y otros [2008]), y obtener así información sobre el perfil del suelo. Sin embargo, estudios recientes basados en observaciones de campo (Wilson y otros [2003]) o resultados de modelos (Puma y otros [2005]) cuestionan la validez de esta hipótesis de trabajo, detectando una baja correlación entre la humedad del subsuelo y de la superficie. Manfreda y otros [2007] atribuyen este hecho a las grandes diferencias entre la superficie y el interior del suelo, lo que está implícito en la representación en dos capas del perfil de los modelos de forzado y restauración (Deardorff [1977], Ren y Xue [2004]). Estas diferencias ponen en evidencia el mecanismo denominado redistribución hidráulica, por el cual algunas plantas vasculares son capaces de redistribuir el agua en el suelo en situaciones en las que el sistema radicular se extiende desde capas superficiales más húmedas a zonas más profundas extremadamente secas (Oliveira y otros [2005], Burgess y

Bleby [2006]). Este proceso de redistribución del agua en el suelo por las raíces de las plantas adquiere una importancia relevante en el campo de la hidroecología, a medida que se va avanzando en su comprensión hasta el punto de que se le reconoce una clara influencia en el riego de los cultivos asociado a situaciones de clara heterogeneidad de los perfiles de humedad del suelo (Ryel y otros [2002]).

Una eficiente observación de la humedad del suelo no tiene interés únicamente para el estudio de la interacción entre el clima, el suelo y la vegetación, sino que también supone un avance significativo en aplicaciones agroambientales que requieren datos sobre su dinámica espacio-temporal. Un ejemplo de ello es la comparación de la dinámica de la humedad del suelo en experimentos con distintos sistemas de manejo (Vanderlinden y otros [2008]) donde resulta técnicamente inviable obtener resultados fiables y concluyentes debido a varios factores:

- la variabilidad espacial de las propiedades del suelo.
- la gran incertidumbre asociada a las observaciones realizadas con sensores electromagnéticos (Hignett y Evett, 2008).
- limitaciones de carácter tecnológico y económico en la implementación de estos sistemas de medida (limitación de la longitud de los cables, impedimentos de las labores del suelo en los componentes superficiales, el elevado coste del almacenamiento de los datos in situ debido al gran número de unidades requeridas, etc.).
- la imposibilidad de realizar periódicamente observaciones destructivas simultáneamente en un gran número de puntos como alternativa al uso de sensores de humedad.

Otro ejemplo es la creciente tendencia de apoyar decisiones sobre la programación del riego en datos de humedad del suelo (Thompson y otros [2007]), tanto en cultivos hortícolas como en cultivos herbáceos o leñosos, con el fin de optimizar al máximo el uso del agua de riego y fertilizantes en situaciones, cada vez más frecuentes, de suministro limitado de agua (Fererres y Soriano [2007]). La capacidad de registrar continuamente la distribución espacial de humedad del suelo a escala de parcela en tiempo real también abre la puerta al riego de precisión (Sadler y otros [2005], DeJonge y otros [2007]), aplicando agua de manera diferenciada en zonas de manejo o mediante equipos que permiten la aplicación de un riego localizado de alta precisión a escala de parcela (Al-Kufaishi y otros [2006]).

En este sentido, existen multitud de modelos a diferentes escalas para el modelado del agua en suelo. En Xu [1999] se propone tomar modelos a gran escala y hacer un re-escalado para aplicarlos a escalas más pequeñas; en este trabajo se toma este principio para, a partir de un modelo estocástico tradicionalmente empleado a escala de cuenca, modelar el contenido de agua en suelo a escala de parcela o incluso de sectores en los que se divida una parcela. Se consigue así un modelo de parámetros distribuidos, tal y como se plantea en Guo y otros [2002], que permite estudiar la interacción entre distintas secciones de una parcela.

Como respuesta a las dificultades técnicas mencionadas aparece el uso de las redes inalámbricas de sensores que permiten el estudio de la humedad en un número de puntos aislados entre sí como representación del estado del conjunto de una parcela. El empleo de dicha tecnología no es una idea nueva en agronomía (Akyildiz y otros [2002]), pero en muchos aspectos se puede considerar que se encuentra en su fase inicial de utilización (Srivastava [2010]). En la actualidad, la mayoría de las redes inalámbricas de sensores instaladas pueden agruparse en dos grupos según el estándar de comunicación que empleen: WLAN (Wireless Local Area Network, IEEE 802.11) o WPAN (Wireless Personal Area Network, IEEE 802.15), que a su vez puede separarse a grandes rasgos en redes basadas en tecnologías Bluetooth y ZigBee. Esta última es la tecnología que parece más prometedora debido a su bajo consumo de energía y la sencillez de su configuración de red. Su principal inconveniente es que la normalización en el mercado no está completa, lo que da lugar a multitud de variantes propietarias del estándar (Wang y otros [2006]). A pesar de que la instalación de redes inalámbricas presenta dificultades y riesgos, su aplicación a las explotaciones agrícolas puede servir como punta de lanza para el empleo del uso de nuevas tecnologías en la agricultura.

Una vez que ya se dispone de una infraestructura funcional para la recogida de información y un modelo matemático para procesar esa información, el siguiente paso es llevar a cabo una planificación del riego que optimice la productividad de agua (Arriaga y otros [2012]). La teoría de control (Ogata [2001]) se ocupa del diseño de controladores automáticos y reguladores que permitan obtener un mejor rendimiento de los sistemas dinámicos, incrementando la productividad y reduciendo tanto la carga de trabajo como los costes asociados. Arbat y otros [2013] presenta un software para simular patrones de penetración del agua en el suelo a partir de riego por goteo.

Precisamente, ésta es una de las carencias de la investigación agronómica actual, ya que, a pesar de que se han realizado numerosos esfuerzos para modelar el continuo SPA, hay escasa literatura sobre control en estos sistemas. La teoría

de control, tan extensa y exitosamente aplicada en otras áreas de la ciencia y la industria, apenas ha sido introducida en ámbitos agronómicos.

El objetivo de este capítulo es, partiendo del modelo obtenido en el capítulo anterior, aplicar técnicas clásicas de control automático para lograr una regulación automática del contenido de agua en suelo, calculando controladores mediante aproximación lineal y probándolos en el entorno de simulación adecuado.

4.2. Material y métodos

4.2.1. Determinación del punto de operación

El modelo no lineal del sistema, tal y como se presentó en el capítulo 3, se muestra en la ecuación 4.1.

$$\begin{aligned}
 nZ_r \frac{dS}{dt} = & \min \{P(t), nZ_r[1 - S(t^-)]\} + \sum_{\theta_i < 0}^{1..4} L_i + \\
 & + \sum_{\theta_i < 0}^{1..4} Esc_i(t) - \sum_{\theta_i > 0}^{1..4} Esc_i(t) - L(S) - T(S) - E(S)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

A la hora de llevar a cabo el diseño de un controlador automático para un sistema no lineal como éste, existen varias técnicas Ogata [1996]. Sin embargo, la más sencilla consiste en linealizar el sistema: esto es, crear un modelo lineal que aproxime el sistema en torno al punto de operación; de este modo, es posible diseñar controladores pensados para sistemas lineales, más simples de diseñar y sintonizar. Ésta es la aproximación que se ha escogido a lo largo de este capítulo. El primer paso para llevar a cabo esa linealización es determinar el punto de operación o funcionamiento.

Para una primera aproximación, se ignoraron los efectos de escorrentía y laterales y se trabajó tan sólo con el modelo del cubo inicial 3.1. El objetivo es

que la humedad del suelo S sea superior a S_W , lo que implica que la planta pueda transpirar, y al mismo tiempo inferior a S_{fc} para que no se produzcan pérdidas (y, por lo tanto, tampoco se produzcan aportes de flujo lateral). A la vista de los valores obtenidos en la calibración, vistos en la figura 3.4, se buscará un contenido de humedad en suelo de 0,45.

Sólo al concluir el diseño del controlador, se simula su rendimiento con el modelo completo de parámetros distribuidos, según plantea la ecuación 4.1.

En el modelo se distinguen parámetros para las dos estaciones, la húmeda y la seca. El procedimiento a seguir es idéntico para ambos conjuntos de parámetros, por lo que sólo se detallan los cálculos de la estación húmeda. También por simplicidad, la profundidad de la zona radical, que se distingue para los dos tipos de manejo de suelo (Laboreo Convencional / Siembra directa), se toma como la media de ambos valores, $Z_r = 82,5cm$.

A partir de este punto de polarización, se procede a la linealización del sistema, obteniendo una función de transferencia:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) \quad (4.2)$$

Donde $U(s)$ es la entrada del sistema, que se corresponderá con la infiltración I , e $Y(s)$ la salida, que se corresponderá con el contenido de humedad en suelo S .

4.2.2. Diseño de controladores

Aunque se ha definido el sistema como continuo, necesariamente habrá que trabajar con un sistema discreto puesto que no se tiene acceso a datos de precipitación continuos. Por ello, el sistema controlador será diseñado como discreto con tiempo de muestreo $T = 1u.t.$ como se muestra en la figura 4.1. Puede observarse en dicha figura cómo se deshace el cambio de variable para que la salida se corresponda con la variable física que deseamos controlar, el contenido de humedad en suelo.

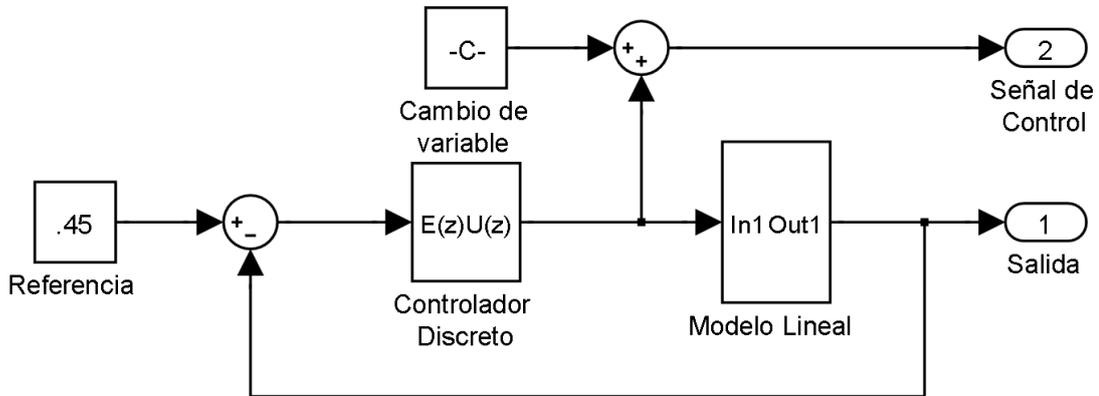


Figura 4.1: Diagrama de control discreto del sistema linealizado

Control Proporcional

El control proporcional (P) es el caso más simple de control por realimentación de errores en la salida. Dada la función de transferencia $G(s)$ del sistema linealizado (ecuación 4.2), se puede definir un $C(s) = P$ que establezca la salida $Y(s)$ dada una referencia $R(s)$, como muestra la ecuación 4.3.

$$\begin{aligned}
 Y(s) &= G(s)C(s)(R(s) - Y(s)) \\
 Y(s)[1 + C(s)G(s)] &= C(s)G(s)R(s) \\
 Y(s) &= \frac{CG(s)}{1 + CG(s)}R(s)
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

La transformada de Laplace de una entrada en escalón de amplitud r , $r(t) = r, t > 0$, es $R(s) = r/s$. Aplicando el teorema del valor final, que establece que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s)$$

se obtiene la expresión de la ecuación 4.4.

$$y_{r.p.} = \lim_{s \rightarrow 0} r \frac{P/(as)}{1 + P/(as)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{rP}{P + as} = r \quad (4.4)$$

La salida en régimen permanente coincide con la referencia. Esto era previsible, dado que el sistema linealizado es un integrador, lo que debe eliminar el error en régimen permanente frente a un escalón.

Control Proporcional Integral (PI)

El controlador PI añade, al término proporcional, un término integral que actúa eliminando -en el caso de que exista- el error en régimen permanente frente al escalón. Al ser el sistema un integrador, este efecto se acentúa eliminando el error en régimen permanente frente a una rampa.

La ecuación en el dominio de la frecuencia de un controlador PI se muestra en la ecuación dada por la ecuación 4.5.

$$C(s) = K_p \frac{T_i s + 1}{T_i s} \quad (4.5)$$

Como el sistema es discreto, muestreado cada $T = 1/96$ días, se aplica una discretización de Euler hacia adelante (Åström y Hägglund [2006]), resultando la expresión de la ecuación 4.6.

$$s = \frac{z-1}{T}$$

$$C(z) = U(z)/E(z) = K_p \frac{T_i z + T - T_i}{T_i z - T_i} = K_p \frac{T_i + (T - T_i)z^{-1}}{T_i - T_i z^{-1}} \quad (4.6)$$

Llevándolo al dominio del tiempo mediante la aplicación de la transformada inversa Z, se obtiene la ecuación en diferencias 4.7.

$$u(k) = u(k-1) + K_p e(k) + (T/T_i - 1)K_p e(k-1) \quad (4.7)$$

Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

Para conseguir que una respuesta más rápida se introduce un término derivativo, formando un controlador PID. Análogamente al caso anterior, la ecuación de un PID discreto por Euler hacia adelante en forma paralela viene dada por Åström y Hägglund [2006], que se muestra en la ecuación 4.8.

$$C(z) = U(z)/E(z) = K_p \left[1 + \frac{T}{T_i(z-1)} + \frac{T_d(z-1)}{T + \alpha T_d(z-1)} \right] \quad (4.8)$$

Operando, se obtiene la expresión de la ec. 4.9

$$\begin{aligned} (1-z^{-1})\frac{U(z)}{E(z)} &= K_p(1-z^{-1}) + \frac{K_p T}{T_i} z^{-1} + \frac{K_p T_d P}{T \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} + \alpha T_d} \\ &\dots \\ T z^{-1}(1-z^{-1})U(z) + \alpha T_d(1-z^{-1})^2 U(z) &= K_p E(z) [T_d(1-z^{-1}) + \quad (4.9) \\ &\quad + T_d z^{-1}(1-z^{-1}) + \alpha T_d(1-z^{-1})^2 + \\ &\quad + \frac{T^2}{T_i} z^{-2} + \alpha T_d/T_i z^{-1}(1-z^{-1})] \end{aligned}$$

Para pasar al dominio del tiempo y conseguir la expresión en forma de ecuación en diferencias, será necesario hacer la transformada inversa Z, para lo que se aplican ciertas propiedades de dicha antitransformada mostradas en la ecuación 4.10.

$$\begin{aligned}
X(z)(1 - z^{-1}) &\xrightarrow{Z^{-1}} x(t) - x(t - 1) \\
X(z)(1 - z^{-1})^2 &\xrightarrow{Z^{-1}} x(t) + x(t - 2) \\
X(z)z^{-1} &\xrightarrow{Z^{-1}} x(t - 1) \\
X(z)z^{-2} &\xrightarrow{Z^{-1}} x(t - 2)
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Aplicando estas fórmulas de transformada inversa, la expresión en el dominio del tiempo queda:

$$\begin{aligned}
u(k) = \frac{1}{\alpha T_d} [-T u(k - 1) + (T - \alpha T_d) u(k - 2) + K_p T_d (1 + \alpha) e(k) + \\
+ K_p (\alpha \frac{T_d}{T_i} - T_d + T) e(k - 1) + (K_p T_d \alpha + K_p \frac{T^2}{T_i} - K_p \alpha \frac{T_d}{T_i} - K_p T) e(k - 2)]
\end{aligned} \tag{4.11}$$

4.3. Resultados

4.3.1. Linealización del sistema

En el punto de operación escogido S_0 , como se puede ver en la figura 3.4 y muestra la ecuación 4.12., la evapotranspiración y las pérdidas por percolación permanecen constantes.

$$\begin{aligned}
ET(S_0) = E(S_0) + T(S_0) = E_{max} + T_{max} = 0,3 \\
L(S_0) \approx K_{sat} \frac{e^{\beta(S_0 - S_{fc})} - 1}{e^{\beta(1 - S_{fc})} - 1} = 0
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Asimismo, $I(S, t) = \min[P(t), nZ_r(1 - S(t^-))]$. En el experimento de calibración realizado, $S(t) < 0,75, \forall t$, por lo que se usará como cota máxima (y, por lo tanto,

0,25 como cota mínima). Dados los valores obtenidos para nZr en la calibración, $I(S, t) = P(t)$ si $P(t) < 5,44cm$. Por lo tanto, es posible eliminar la dependencia de $S(t)$ en $I(S, t) \rightarrow I(t)$.

Llevando estos valores a la ecuación 3.1, se obtiene:

$$\frac{dS}{dt} = [I(t) - ET(S) - L(S)]/nZr = \frac{I(t) - 0,3}{nZr}$$

Si aplicamos la transformada de Laplace para pasar al dominio frecuencial, el término $\frac{-0,3}{nZr}$ presenta un problema: genera una dinámica no controlable. Por ello, se llevará a cabo un cambio de variable de entrada definiendo la variable auxiliar $x(t) = I(t) - 0,3$ que será la nueva señal de entrada. Para evitar confusiones entre la variable objetivo $S(t)$, contenido de humedad en suelo, y la variable de la transformación de laplace, s , se aplica el cambio de nomenclatura $y(t) = S(t)$. Estos cambios se muestran en la ecuación 4.13.

$$\begin{aligned} y(t) &= S(t) \\ x(t) &= I(t) - 0,3 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Con lo que la ecuación diferencial del modelo resulta:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{x(t)}{nZr} = \frac{x(t)}{82,5} \tag{4.14}$$

Pasando al espacio de Laplace, se obtiene:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G(s) = \frac{1}{82,5s} \tag{4.15}$$

Para evaluar la bondad de nuestro modelo, comparamos el comportamiento del sistema linealizado y el sistema completo, para un sólo sector, con varias referencias de entrada. La primera prueba es para la zona lineal: comprobar cómo entre contenidos de agua en el suelo de entre el 40% y el 55%, esto es, evapotranspiración máxima sin influencia de las pérdidas por percolación, am-

Los modelos coinciden. La figura 4.2 muestra el sistema en dos circunstancias opuestas: a la izquierda, cómo partiendo de una condición inicial de $0,4m^3/m^3$, la salida crece al serle aplicado una entrada constante de $5mm/día$; a la derecha, el proceso opuesto al partir de una condición inicial de $0,55m^3/m^3$ sin precipitación. La linealización en esta región responde, como era de esperar, al comportamiento del modelo completo.

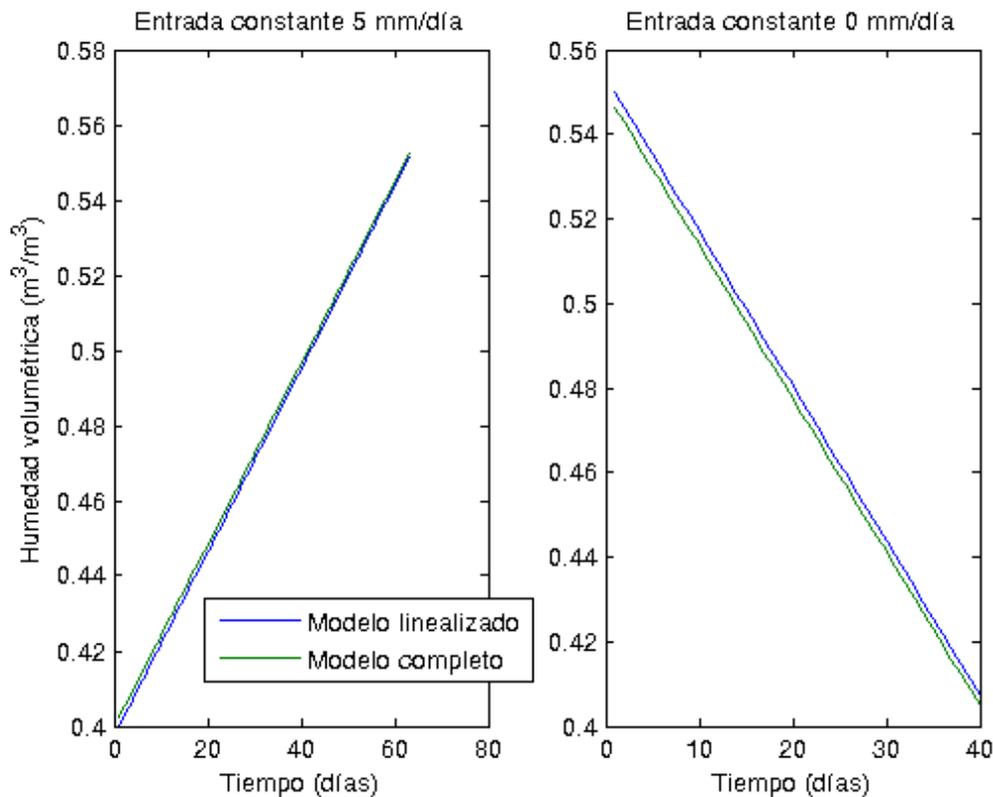


Figura 4.2: Comportamiento de modelos (no lineal y linealizado) frente a una señal constante de $5mm/día$ (izquierda) y 0 (derecha).

Para comprobar cómo el modelo funciona fuera de esta zona de seguridad, se programó una segunda simulación, en este caso planteada a lo largo de un periodo de 150 días; partiendo de una condición inicial de $0,5m^3/m^3$, se aplica un escalón unitario constante en la entrada entre los días 50 y 85. Puede observarse en la figura 4.3 cómo el comportamiento fuera de la zona lineal, si bien no se corresponde exactamente con el del sistema completo, sí que supone una aproximación satisfactoria.

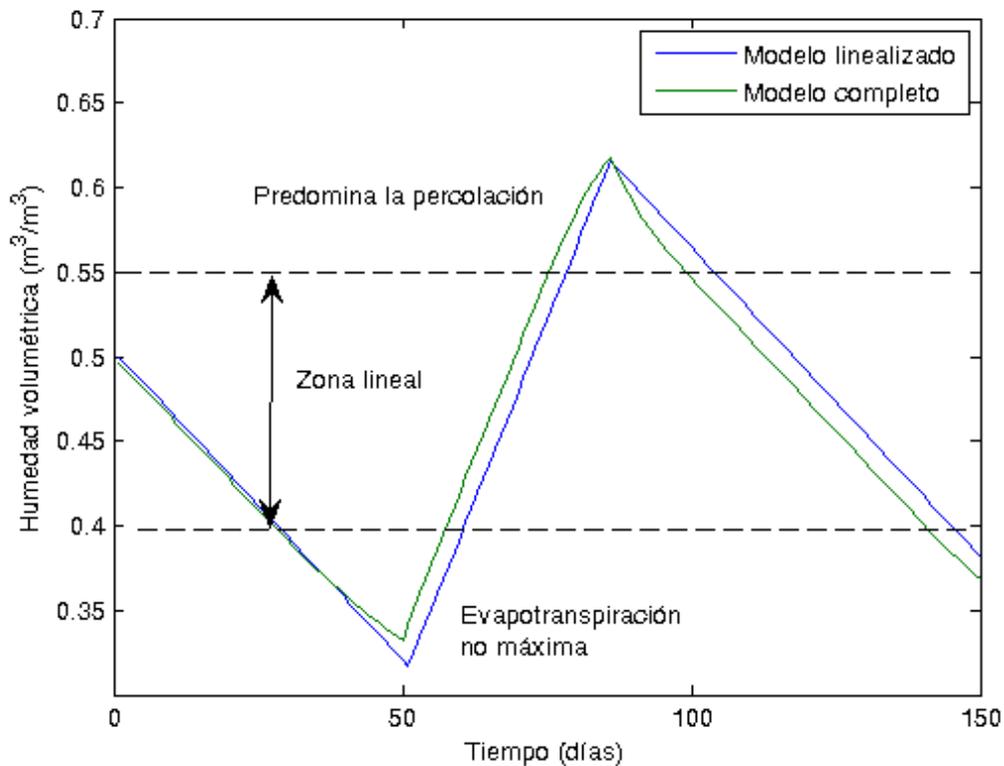


Figura 4.3: Comportamiento de ambos modelos (no lineal y linealizado) frente a un escalón unitario en la entrada entre los días 50 y 85.

4.3.2. Control Proporcional

La figura 4.4 muestra la salida y la señal de control para una constante proporcional $P = 20$ y la referencia propuesta $r = 0,45$.

4.3.3. Control Proporcional Integral (PI)

Ajustando el PI buscando la minimización del tiempo de respuesta en Simulink®, se obtienen los valores $K_p = 10$, $T_i = 100$ con $T = 1/96$ días. La figura 4.5 muestra el resultado de la simulación sobre el sistema linealizado, mostrando la salida y la señal de control para la referencia propuesta $r = 0,45$.

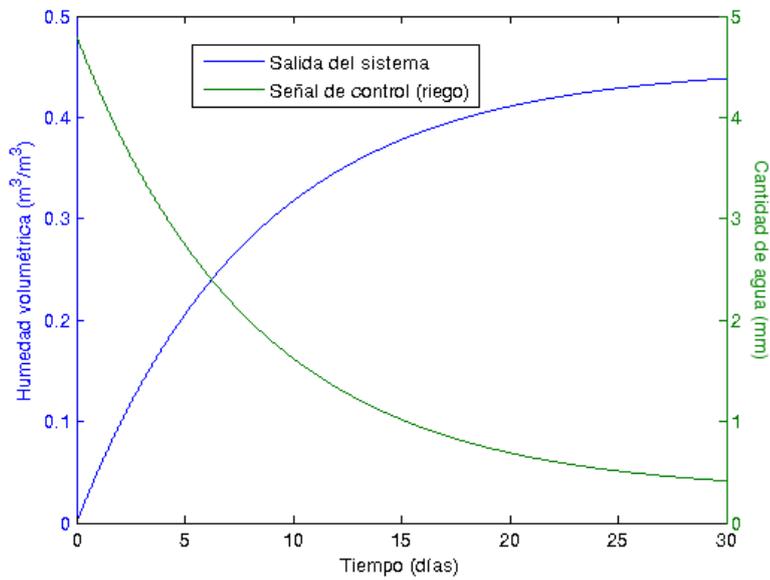


Figura 4.4: Señal de control (verde) y salida (azul) de un sistema con control proporcional para una referencia $y_{obj} = 0,45$

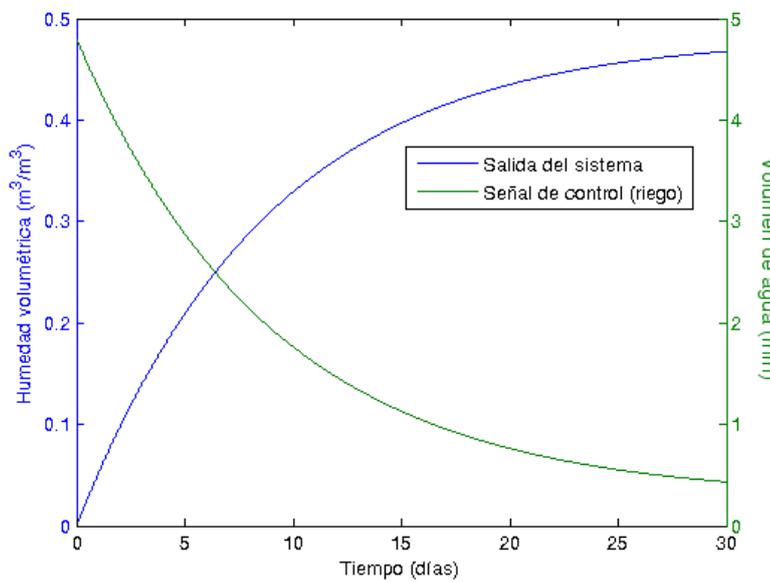


Figura 4.5: Señal de control (verde) y salida (azul) de la simulación del sistema linealizado con un control PI

4.3.4. Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

Dado el controlador descrito en la ecuación 4.11, la herramienta de autoajuste de Matlab® para un controlador PID da como resultado unos parámetros de controlador $K_p = 0,1484$, $D = -3,4171$, $\alpha = -1,972$ y $T_i = 10,16$ manteniendo como tiempo de muestreo $T = 1/96$ u.t. El signo negativo de T_d no provoca la aparición de un polo inestable, dado que $\alpha < 0$ y su producto es por tanto positivo. La figura 4.6 muestra el resultado de simular este controlador con el sistema linealizado.

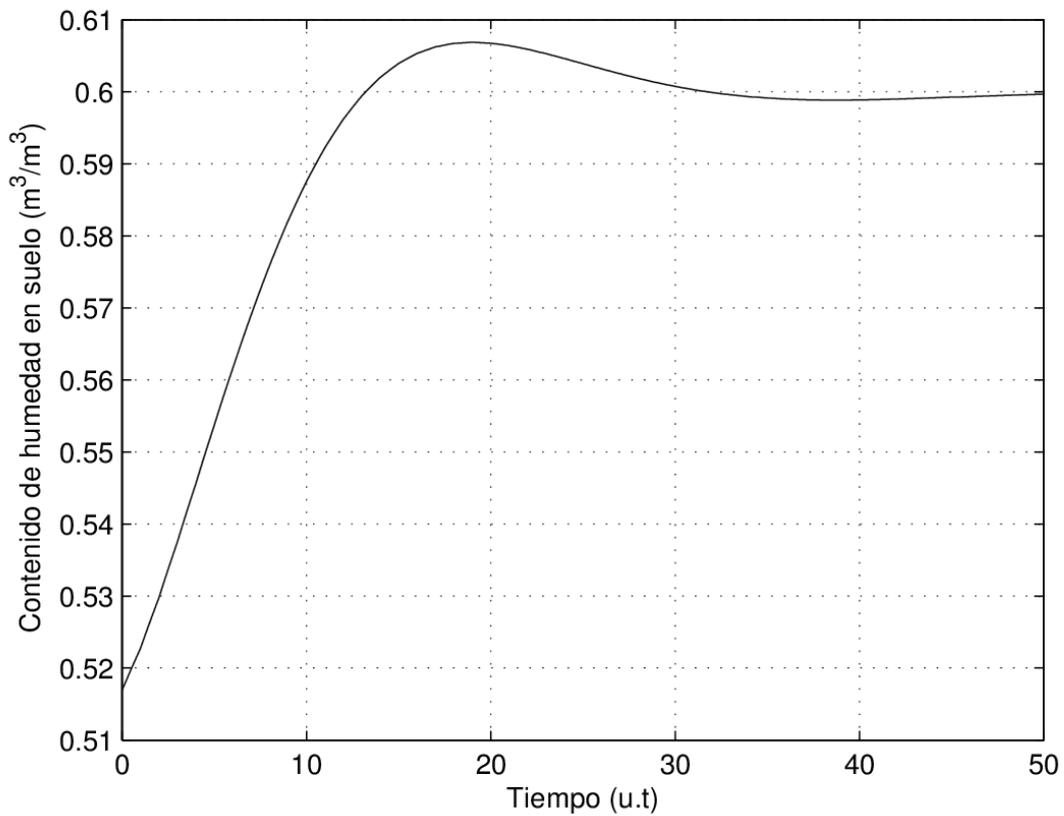


Figura 4.6: Simulación del sistema linealizado con un control PID

4.3.5. Simulación de controladores

El diseño y simulación del apartado anterior se remite al modelo linealizado. Sin embargo, para comprobar el funcionamiento de estos controladores, han de ser probados en el modelo completo no lineal. Con este propósito se modifica la programación para, a la variable de entrada (precipitación), sumarle la señal de control, que depende de la señal de error (esto es, la salida menos la referencia) tanto en ese instante como en instantes anteriores y de señales de control de instantes anteriores.

Se ha introducido en el código una subrutina de detección de lluvia: si a mitad del periodo de muestreo (cada quince minutos) se detecta que existe lluvia suficiente como para alcanzar (o superar) la señal de control, se corta el aporte inmediatamente. Se aplica el modelo en un año diferente al empleado para la calibración, con precipitaciones mostradas en la figura 4.7.

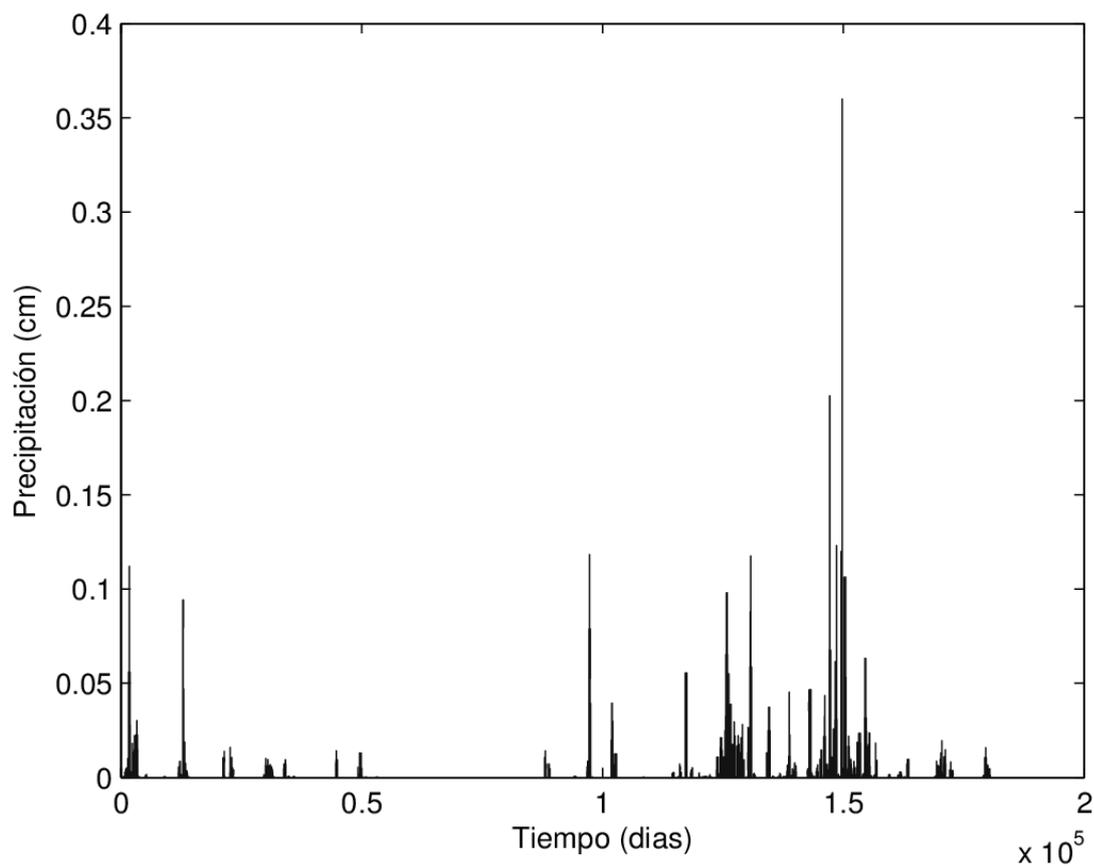


Figura 4.7: Precipitaciones a lo largo de un año

Control Proporcional

Tomando un controlador $G(s) = U(s)/E(s) = 1$; en la figura 4.8 se muestran tan sólo los tres primeros sectores, en los que se puede ver cómo el contenido de agua en suelo se estabiliza en torno a 0,42, donde la referencia escogida es 0,45. Puede observarse que aunque existe un error en régimen permanente, éste es pequeño ($< 10\%$) y el sistema se estabiliza en ausencia de perturbaciones, esto es, de precipitaciones.

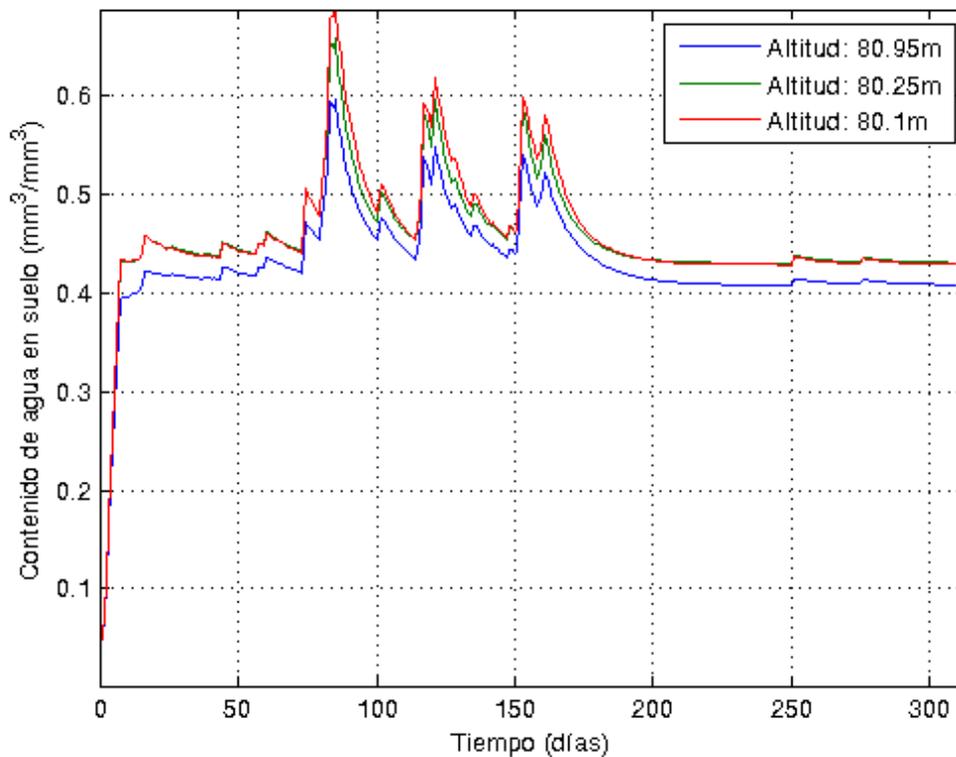


Figura 4.8: Simulación del sistema con un control P sobre los tres primeros sectores

Control Proporcional Integral

Tomando un controlador PI tal y como se muestra en la ecuación 4.6, se simula el comportamiento del sistema con la misma referencia; en la figura 4.9 se muestran tan sólo los tres primeros sectores, en los que se puede ver cómo

el contenido de agua en suelo se estabiliza en torno a 0,45. Aunque la reacción a cambios en el sistema es más lenta que en el caso anterior, puede observarse cómo el error en régimen permanente desaparece, como era de esperar debido a la acción integral del controlador.

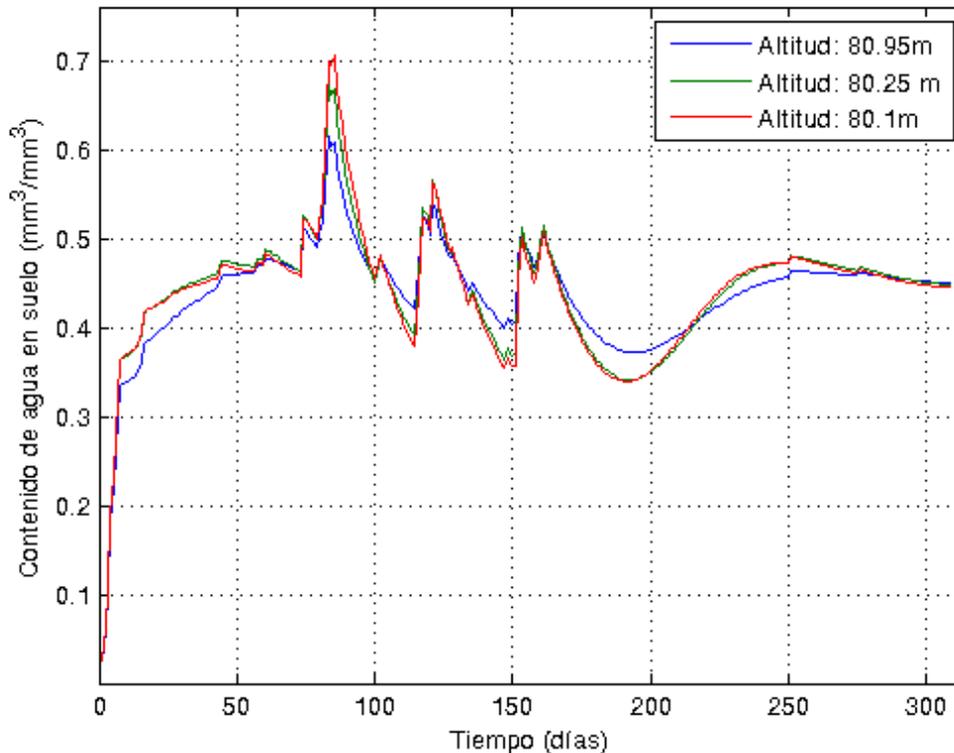


Figura 4.9: Simulación del sistema con un control PI sobre los tres primeros sectores

Control Proporcional - Integral - Derivativo

Tomando un controlador PID tal y como se muestra en la ecuación 4.11, el sistema se inestabiliza. Las no linealidades del sistema no reaccionaron bien a la aparición de un término derivativo. Por ello, para el diseño del controlador PID se utilizó el método de Ziegler-Nichols (Ziegler y Nichols [1942]). Este método, que se lleva empleando desde 1942, permite la sintonización de un controlador a partir de la planta, esto es, sin necesidad de conocer el modelo. Se lleva a cabo probando la planta con un controlador P: incrementando la ganancia hasta que

se alcance la ganancia última K_u , en la que la salida oscila con amplitud constante; sistema estable pero no asintóticamente estable. Una vez obtenida dicha ganancia y el periodo de oscilación de la salida para ella, T_u , se fijan las ganancias para los términos proporcional, derivativo e integral. El control Ziegler-Nichols clásico es un control de gran robustez, pero en este caso y a la vista de la inestabilidad del primer controlador se busca un control aún más robusto. De acuerdo con McCormack y Godfrey [1998], se escogen unas ganancias que eliminen la sobreoscilación: $K_p = 0,2K_u$; $K_i = 2K * p/T_u$; $K_d = K_p T_u/3$.

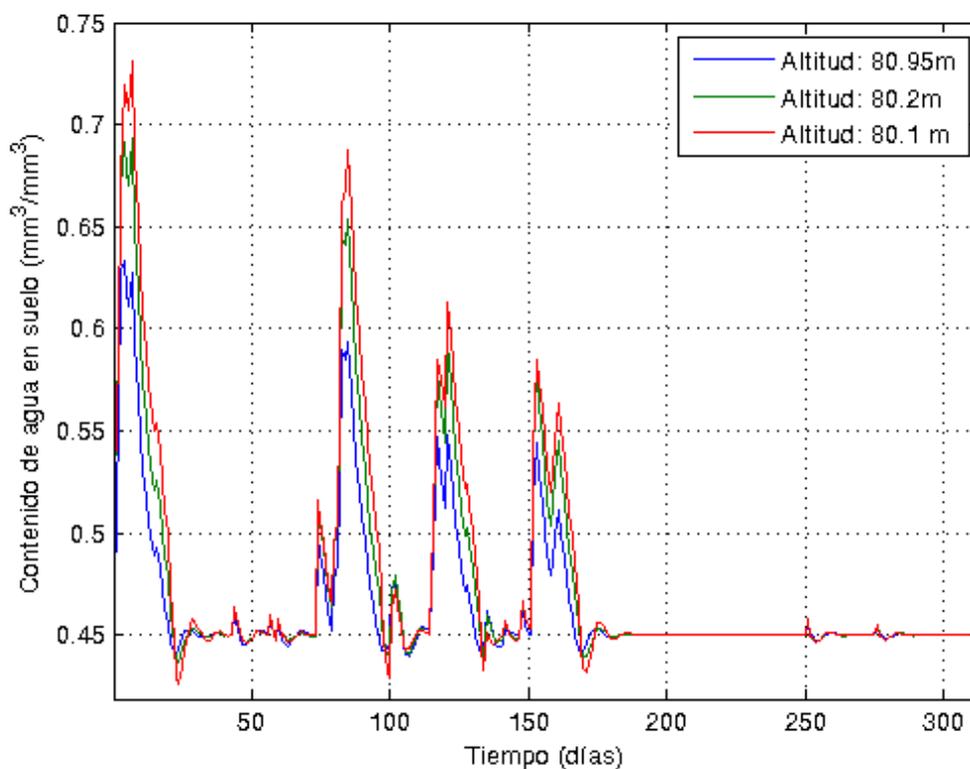


Figura 4.10: Simulación del sistema con un control PID sobre los tres primeros sectores

La arquitectura de este PID será también más simple, a partir de Ogata [1996] la expresión de un PID discreto se muestra en la ecuación 4.16.

$$u(t) = u(t-1) + K_p \left[\left(K_p + K_i T + \frac{K_d}{T} \right) e(t) + \left(-K_p - \frac{2K_d}{T} \right) e(t-1) + \frac{K_d}{T} e(t-2) \right] \quad (4.16)$$

En esas condiciones, se simula el sistema y se obtienen los resultados mostrados en la figura 4.10.

Puede observarse cómo este controlador PID es más rápido que el PI, elimina el error en régimen permanente y prácticamente elimina la sobreoscilación, si bien su reacción frente a perturbaciones es un poco más elevada que en el control PI.

4.4. Conclusiones

A partir del modelo calculado en el capítulo anterior, y del entorno de simulación construido al efecto, se han utilizado técnicas clásicas de control lineal para regular el contenido de agua en suelo, planteándose controladores individuales para cada celda del sistema. Se obtuvieron las dimensiones y altitudes en una parcela de dieciocho celdas situada en una finca experimental propiedad del IFAPA, y se simuló utilizando como entradas tanto la salida de los controladores como las precipitaciones obtenida a partir de una estación meteorológica cercana.

El sistema se linealizó en torno a un punto considerado óptimo, resultando un sistema de primer orden. El sistema es estable, como cabía esperar: en ausencia de entradas, la humedad de suelo tiende a un valor próximo a cero (humedad residual).

Se diseñaron tres controladores mediante ajuste computacional: los controladores proporcional (P), proporcional integral (PI) y proporcional integral derivativo (PID). En los dos primeros casos, se consiguió la estabilización del sistema a pesar de la presencia de perturbaciones -las precipitaciones- que pueden llegar a ser muy fuertes; hay que tener en cuenta que por la propia naturaleza de la acción de control, ésta se halla limitada (saturada) a valores positivos: no se puede regar menos de cero. En el caso del controlador PID, la linealización del sistema no fue lo bastante buena como para resistir una acción derivativa, que inestabilizó el sistema; sin embargo, un ajuste empírico siguiendo la técnica clásica de Ziegler Nichols permitió resolver ese inconveniente estabilizando y regulando el sistema satisfactoriamente.

La distinta altitud de las celdas de la parcela muestra cómo para el control proporcional, a pesar de la estabilización, el valor final de la humedad para un

control proporcional varía según la celda (especialmente cuando ocurren precipitaciones). Por ello, el siguiente controlador a probar debería ser un controlador distribuido que para cada celda tenga en cuenta las aportaciones laterales de las celdas de alrededor. Sin embargo, los controladores PI y PID eliminan ese problema, aunque la reacción de éstos no es uniforme para todos los sectores, por lo que un controlador distribuido podría mejorar sus respuestas.

El siguiente paso debería ser, evidentemente, probar estos controladores en un ensayo de campo real, instalando riego automático controlado en las celdas de la parcela donde se ha planteado.

Parte II

Modelado de los efectos del Riego

Deficitario sobre cultivos leñosos

Publicaciones

Parte del contenido de los cuatro capítulos que constituyen esta segunda parte ha sido publicado en forma de artículos.

- García Tejero, I.F, Arriaga, J., Durán Zuazo, V.H., J. y Muriel Fernández, J.L. Enero 2013. «*Predictiong crop-water production functions for long-term effects of deficit irrigation on citrus productivity (SW Spain).*»
Archives of Agronomy and Soil Science, Vol. 59, Is. 12, pp. 1591-1606.
DOI: 10.1080/03650340.2012.748983
- García Tejero, I.F., Durán Zuazo, V.H., Arriaga, J., Muriel Fernández, J.L. Julio 2012. «*Impact of water stress on citrus yield.*»
Agronomy for Sustainable Development, Vol. 32, Is. 03, pp. 651-548. DOI: 10.1007/s13593-011-0060-y.
- Arriaga, J., García-Tejero, I.F., Muriel-Fernández, J.L., Durán-Zuazo, V.H. and Rubio, F.R. 2014. «*Modeling, simulation and control of irrigation on young almond trees.*»
Acta Horticulturae (ISHS), vol. 1038, pp. 479-486.

Introducción

La agricultura representa aproximadamente el 70% del total de agua dulce consumida en todo el mundo (García-Tejero y otros [2011a]), cifra que asciende a un 75% en el caso de España según el Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (Horizonte 2015 [2010]).

La superficie de tierra dedicada al cultivo de regadío se ha incrementado en nuestro país desde los 3,2 millones de hectáreas de 1994 hasta los 3,5 de 2014 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente ESYRCE [2014]), de los cuales un 29,26% se hallan en Andalucía. El agua destinado a regadío ascendía en 2008 según el citado Horizonte 2015 [2010], a 15.313 hm^3 al año, un 10% de ellos dedicado al cultivo del cítrico (MARM [2008]).

De acuerdo con Margat y Vallée [1997], los recursos de agua se están volviendo cada vez más escasos; este fenómeno parece particularmente acusado en regiones del sur del Mediterráneo. Históricamente los agricultores han venido empleando grandes volúmenes de agua, excediendo ampliamente las necesidades de los cultivos tanto perennes como anuales (Shideed y otros [2005]), produciéndose sobrerriegos de entre el 30% y el 50% (Hamdy y Katerki [2006]). Mientras tanto, el contexto de cambio climático global amenaza con provocar un serio impacto en los recursos hídricos y en la agricultura en los próximos años. Es por eso que varios autores han tratado de evaluar las posibles consecuencias de este cambio en diversas regiones del mundo en los últimos años (Olesen y Bindi [2002], Aggarwal [2003], Jones y Thornton [2003]). Los modelos de cambio climático son múltiples y a veces incluso contradictorios, pero existe un cierto consenso en ellos en cuanto a predecir un aumento de la temperatura media global en el próximo siglo, incremento que según el modelo oscila entre los 1,1°C y los 6,4°C entre los años 1990 y 2100 (Intergovernmental Panel for the Climate Change, Solomon y otros [2007]) y que vendrá acompañado de cambios en los patrones espacio-temporales de precipitaciones (Southworth y otros [2000], Räisänen [2001]).

Los efectos de ese cambio serán muy probablemente más acusados en regiones áridas y semiáridas, que ya se encuentran en un delicado equilibrio que los hace más sensibles a cualquier cambio climático, y en las que los recursos hídricos ya son escasos. Incluso regiones semi-áridas que gracias a sus mayores desarrollo socioeconómico y acceso a tecnología, o incluso por disponer de climas relativamente más lluviosos, parecen disponer de suministros suficientes de recursos hídricos para destinar a la agricultura, es muy probable que sufran

los efectos adversos del mayor consumo de agua asociado a un clima más cálido IPCC2001b [2001].

Es por ello que el uso sostenible de los recursos hídricos en la Europa mediterránea es crucial para mitigar muchos de estos problemas de escasez y mal uso del agua, especialmente en áreas del sur de España (Zacharias y Koussouris [2000], Mariolakos [2007], Downward y Taylor [2007]). Al no verse limitados por la falta de disponibilidad de luz (antes bien, se dispone de sobreabundancia), la disponibilidad de agua es el principal factor limitante para el desarrollo de los cultivos.

Es por eso que resulta necesario aplicar diferentes estrategias para reducir el consumo de agua favoreciendo técnicas sostenibles de riego (García-Tejero y otros [2011a]). El riego deficitario (RD) es una de esas estrategias. Se define como RD la práctica en la que la cantidad de agua aplicada al riego se reduce a una fracción de la evapotranspiración del cultivo (ET_c). Según English y Raja [1996], el RD es una estrategia de optimización en la que se permite que los cultivos sufran un cierto grado de déficit hídrico y, consecuentemente, una cierta reducción en la producción.

Su aplicación a los cultivos exige un conocimiento exhaustivo de la ET_c , de la respuesta del cultivo al déficit hídrico -incluyendo la identificación de los períodos fenológicos críticos-, de los efectos a largo plazo del estrés aplicado durante varias campañas consecutivas y del impacto sobre la producción. Fereres y Soriano [2007] estudiaron el efecto del estrés hídrico (EH) sobre la productividad en los cultivos, comprobando que llega un punto a partir del cual aportes adicionales de riego no se traducen a mejoras en la producción, como se muestra en la figura 4.11.

Varios autores han constatado que la respuesta de los cultivos de cítricos al RD presenta una fuerte dependencia con respecto del grado de estrés hídrico soportado por la planta en diferentes estados fenológicos (Goldhammer y Salinas [2000]). Los distintos efectos causados por la estrategia de RD están fuertemente correlacionados con el tiempo de riego (tanto el momento del día como la duración) y el estado fisiológico del cultivo, teniendo en cuenta los períodos de máxima demanda evapotranspirativa, en los que el agua no debe ser escatimada (Chalmers y otros [1986]).

Hay diferentes formas de implementar una estrategia de RD, según la forma en la que esa restricción se aplique. El Riego Deficitario Sostenido (RDS) se basa en la aplicación uniforme de restricción hídrica, dependiendo de la demanda

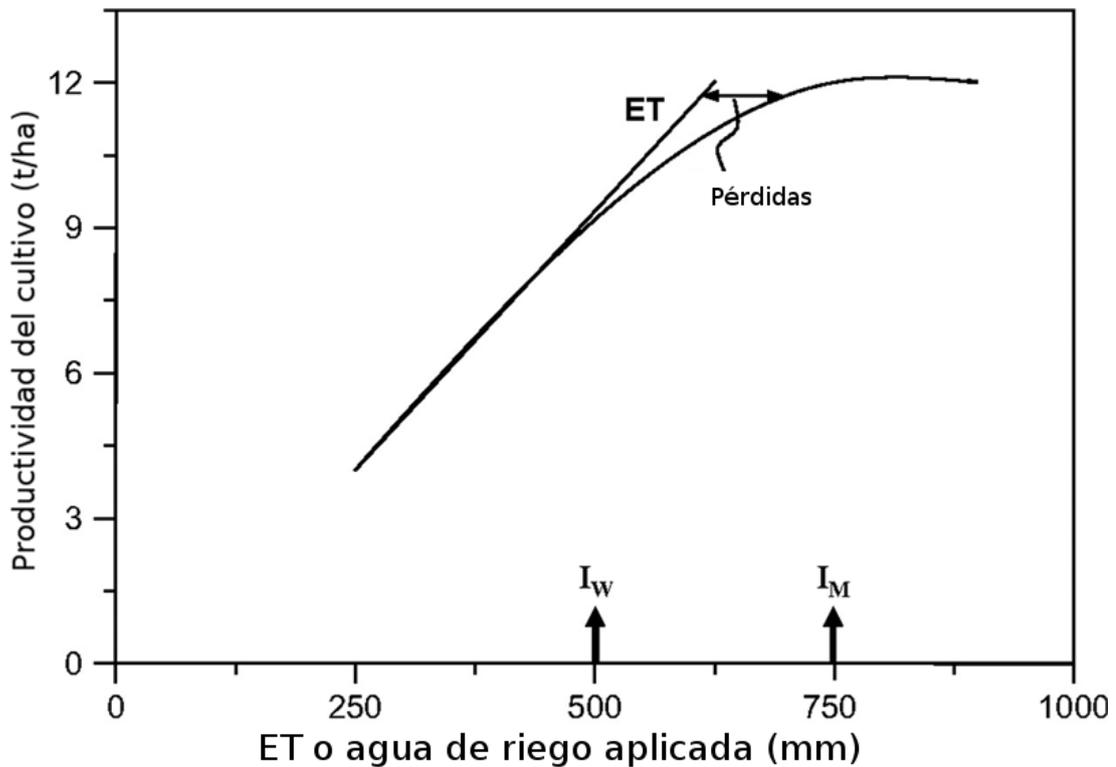


Figura 4.11: Relaciones generalizadas entre agua de riego aplicada, EvapoTranspiración y rendimiento del cultivo (adaptada de Fereres y Soriano [2007]).

del cultivo. Esta estrategia permite al cultivo desarrollar una adaptación a la situación de estrés. Sin embargo, este enfoque no considera la posible incidencia de periodos críticamente sensibles a la situación de estrés durante el desarrollo fisiológico del cultivo. Fereres y Soriano [2007] establecieron que el estrés hídrico debido a la aplicación de un tratamiento de RDS moderado provoca una reducción en el tamaño de copa y la interceptación de la radiación, lo que afecta negativamente a la fotosíntesis y por lo tanto al crecimiento. El Riego Deficitario Controlado (RDC), por contra, es una estrategia en la que la aplicación de riego depende precisamente de la fisiología del cultivo, y los efectos causados por esta estrategia están fuertemente correlacionados con el tiempo, la duración y el estado fisiológico de la planta, teniendo en cuenta los máximos periodos evapotranspirativos y las fases de crecimiento más críticas en las que el aporte hídrico no debería ser reducido Chalmers y otros [1986].

A pesar de los inconvenientes descritos, el RD ha demostrado en multitud de escenarios y ocasiones ser una política efectiva y sostenible en circunstancias de escasez de agua al minimizar el consumo de agua estabilizando la produc-

ción del cultivo, esto es, maximizando la productividad del agua García-Tejero y otros [2011b]. Concretamente, y dentro de las distintas estrategias de RD, el riego deficitario controlado es la más habitualmente empleada para conseguir ahorro de agua en cultivos leñosos.

Aunque los efectos de estas prácticas han sido estudiados ampliamente en distintos cultivos, su aplicación en el sector agrícola todavía se encuentra en sus primeras fases, y quedan por dilucidar ciertas cuestiones: una de ellas consiste en la posibilidad de predecir el efecto que tendrá sobre la producción imponer estrés hídrico en diferentes periodos fenológicos. En Doorenbos y otros [1979] se establece una ecuación para predecir la productividad del cultivo como respuesta al uso de agua, basada a su vez en una ecuación propuesta por Stewart y otros [1977] que definió el factor de proporcionalidad K_Y entre la pérdida de producción y la reducción de la evapotranspiración asociada.

En el ya citado Doorenbos y otros [1979] se proponen varios valores de K_Y para distintos cultivos para distintas fases de crecimiento del cultivo, así como una K_Y global que abarque todas las fases. De este modo, teniendo en cuenta estas observaciones, se pueden establecer diferentes ecuaciones de modelado para predecir los efectos del déficit hídrico cuando es aplicado en diferentes estados fenológicos. Estos modelos pueden predecir la pérdida de producción (Y_i) cuando el suministro de agua no es suficiente para cubrir la demanda total de agua del cultivo. Para ello, parece razonable considerar que la planificación temporal de la aplicación del déficit hídrico durante distintas fases de crecimiento permitiría conseguir una mayor productividad del agua, dado que la respuesta del cultivo depende de la sensibilidad de éste durante ciertos períodos. Jensen [1968] propuso un modelo aditivo basado en transpiración de cultivos para evaluar los efectos del riego en diferentes fases. Este método relacionó la transpiración del cultivo en diferentes etapas con la reducción de la producción; el modelo mostró diferentes relaciones lineales, en las que el valor de la pendiente indicaba el efecto del RD en la producción, permitiendo así comparaciones entre similares niveles de transpiración para diferentes cultivos.

En los próximos capítulos se proponen modelos de la reducción de la producción a partir del estrés hídrico, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en dos ensayos diferentes: por un lado, un ensayo sobre el efecto a largo plazo (seis años) del RD sobre un cultivo de cítricos; por el otro, un ensayo sobre diferentes tratamientos de RDC a lo largo de tres años consecutivos. De este modo, se presentan funciones de producción, haciendo especial énfasis en las interacciones del estrés hídrico a lo largo del tiempo y en diferentes etapas fenológicas. Asimismo, el efecto sobre cada periodo fenológico (floración, cre-

cimiento de fruto y maduración) se cuantifica cuando se aplica estrés hídrico sobre el cultivo, dando como resultado una nueva aproximación para el análisis del impacto del estrés hídrico sobre los correspondientes periodos fenológicos.

Objetivos

A la vista de todos los condicionantes expresados anteriormente, queda clara la situación agroclimática de Andalucía Occidental, así como la importancia social, económica y medioambiental que tiene la conservación de los agroecosistemas de regadío en Andalucía.

Esta parte de la tesis tiene como objetivo general el desarrollo de diferentes modelos que a medio - largo plazo permitan estimar los efectos de diferentes estrategias de riego deficitario en cultivos arbóreos y que, por lo tanto, ofrezcan la posibilidad de diseñar estrategias sostenibles de ahorro de agua en el marco de una progresiva disminución de la disponibilidad de agua mientras se produce un incremento de demanda de ésta por parte de los cultivos.

De este modo, los objetivos específicos perseguidos en esta segunda parte son los siguientes:

- a) Desarrollo de un modelo capaz de explicar, recoger y predecir el efecto a largo plazo del déficit hídrico sobre el cultivo de cítricos (capítulo 5).
- b) Desarrollo de un modelo capaz de explicar, recoger y predecir el efecto del déficit hídrico aplicado en diferentes periodos fenológicos sobre la producción en el cultivo de cítricos (capítulo 6).
- c) Desarrollo de un sistema de planificación de estrategias de riego deficitario a medio y largo plazo en el cultivo de cítricos (capítulo 7).
- d) Desarrollo de una herramienta telemática de fácil acceso orientada hacia la transferencia tecnológica, permitiendo a agricultores determinar de forma sencilla una estrategia óptima de distribución de caudales de riego limitados para el cultivo de cítricos (capítulo 7).
- e) Estudiar el efecto del riego deficitario sobre variables fisiológicas del cultivo (capítulo 8).

Capítulo 5

Efecto del estrés hídrico a largo plazo sobre el cultivo de cítricos

5.1. Material y métodos

5.1.1. Parcela experimental

El ensayo se llevó a cabo en una plantación comercial de cítricos de naranja dulce (*Citrus sinensis* L. Osbeck. cv. Salustiana) en patrón Carrizo (*Citrus sinensis* Osb. x *Poncirus trifoliata*. Raf.), situada en el término municipal de Palma del Río (37°44'N, 5°12'O), en el valle del Guadalquivir. Los árboles fueron plantados catorce años antes del inicio del estudio con separación de 6 x 4 m., en caballones de 40 cm de altura, 4 m de ancho y 2 m de separación entre ellos. El sistema de riego era localizado con dos gomas por fila de árboles con ocho goteros auto-compensados por árbol, con diferentes caudales en función del tratamiento. Los árboles tenían una altura media de 3,25 m y un diámetro de copa de 4 m.

El suelo de la parcela experimental es un Fluvisol Calcáreo (FAO98 [1998]), de textura franco arenosa, rico en calcio ($75,8\text{cmol/kg}$) y pobre en nitrógeno (460mg/kg).

La climatología local es típicamente mediterránea seca, con una precipitación anual de 475 mm. , distribuida fundamentalmente desde finales del otoño hasta principios de la primavera, siendo los meses entre Noviembre y Febrero los más lluviosos del año. Las temperaturas invernales son relativamente suaves, muy raramente por debajo de los 0°C , y las estivales son muy altas, superando a menudo los 40°C en los meses de julio y agosto.

5.1.2. Tratamientos de RD



Figura 5.1: Distribución de los tratamientos de riego en el ensayo de RDS.

El diseño experimental fue de bloques escogidos al azar con cinco repeticiones por tratamiento. Cada repetición contenía tres filas con cuatro árboles por fila. Los árboles centrales fueron escogidos para las medidas fisiológicas y de la producción, mientras que los diez árboles restantes ubicados en los bordes recibieron la misma cantidad de agua, medida mediante el uso de pluviómetros analógicos. La figura 5.1 muestra la ubicación de estos tratamientos en una fotografía aérea de la parcela.

Durante las campañas comprendidas entre 2004 y 2010, se aplicaron tres tratamientos de RDS que se diferenciaron según sus índices de estrés hídrico (IEH), definidos a partir de la relación entre el volumen real de agua aportada y la evapotranspiración del cultivo (ET_c). Los tratamientos escogidos fueron:

- RDS₇₅, con un IEH = 0,25.
- RDS₆₅, con un IEH = 0,35.
- RDS₅₀, con un IEH = 0,50.
- C₁₀₀, con un IEH = 0

Además de los tres tratamientos de Riego Deficitario Sostenido, se aplicó un cuarto tratamiento para emplearlo como control, denominado C₁₀₀; en él, se aplicó un estrés hídrico nulo ($IEH = 0$), lo que implica que los árboles se regaron en todas las campañas al 100% de la ET_c .

Los valores de evapotranspiración de referencia (ET_o) se determinaron mediante la ecuación modificada de Penman (Allen y otros [1998]), obteniendo los datos climatológicos a partir de una estación meteorológica local ubicada en las proximidades del cultivo. Las necesidades hídricas totales se obtuvieron semanalmente mediante la ecuación de Doorenbos y Pruitt (Doorenbos y Pruitt [1977]), empleando un coeficiente de cultivo K_c promedio de 0,7. La ecuación 5.1 muestra el riego calculado, donde ET_o es la evapotranspiración potencial del cultivo, K_c es el coeficiente del cultivo y p la precipitación efectiva.

$$Riego(mm) = \sum_1^7 (ET_o K_c - p) \quad (5.1)$$

5.1.3. Análisis estadístico y numérico; modelo analítico

Llegando el momento de la recolección, se realizó el seguimiento de la producción final, del número de frutos por árbol y del estudio de las principales características físico-químicas de los mismos (peso medio del fruto; diámetro polar y ecuatorial; peso y grosor de corteza; sólidos solubles totales; acidez e índice de madurez).

Para ello se controló la producción en cada tratamiento y repetición de los diferentes ensayos estudiados (figura 5.2). Con respecto al peso de fruto, se realizó un conteo de 100 frutos representativos por árbol controlado, dividiendo el peso total de éstos entre la cantidad muestreada, obteniendo así el peso medio del fruto.



Figura 5.2: Diferentes momentos durante las recolecciones de los ensayos diseñados (A y B, Ensayo 1; C y D, Ensayo 2; E y F, Ensayo 3).

El número de frutos se obtuvo mediante el cociente entre la producción obtenida en cada árbol y el peso medio del fruto del árbol en cuestión.

Para cada año del estudio, los datos de producción fueron sometidos a un análisis estadístico de varianza de una vía (ANOVA; Software estadístico SPSS, Chicago, Il., EE.UU.) aplicando una prueba de Tukey para separaciones medias ($P < 0,05$).

Se determinaron las funciones de productividad del agua para cada año del experimento, de acuerdo con el modelo propuesto por Doorenbos y otros [1979]. De este modo, se puede definir una función de pérdida de productividad $L(x, t)$, donde $x \in [0, 1]$ es el nivel de estrés hídrico y t el tiempo (medidas anuales).

A partir de las medidas de pérdidas, se define el error cuadrático medio (RMSE) como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (L(x_i, t_i) - y_i)^2}{n}} \quad (5.2)$$

Donde x_i es la restricción hídrica, t_i la campaña e y_i son los resultados experimentales. El objetivo es obtener una función de pérdida de producción que varíe con los años de aplicación del tratamiento para medir la forma en la que el cultivo se adapta a la situación de estrés hídrico. Para ello, se minimizará la ecuación 5.2 (o su cuadrado).

El problema de minimización fue resuelto empleando funciones de minimización del software matemático MATLAB® (The Mathworks Inc., Natick, Ma., EE.UU.) y el algoritmo de programación secuencial cuadrático (Fletcher y Powell [1963]; Gill y otros [1981]).

La evolución temporal de la pérdida de producción con diferentes estrategias de riego deficitario muestra una oscilación atenuada con media creciente, con extremos locales ubicados en $t = k$, $k \in \mathbb{Z}$. De ahí:

$$L(x = x_0, t) = b_1 + b_2 t + b_3 e^{-t/\tau} \cos(\omega t) \quad (5.3)$$

Donde τ es la constante de tiempo (medida en años), ω la frecuencia angular (rad/año) y los términos b_i son adimensionales. De este modo, pueden obtenerse diferentes relaciones para cada grado de estrés hídrico. Sin embargo, la expresión general no se puede contemplar sin la variable x . Por lo tanto, se plantea una expresión en variables separables, como se puede ver en 5.4.

$$L(x, t) = X(x)T(t) \rightarrow L(x_0, t) = X(x_0)T(t) \rightarrow L(x, t_0) = X(x)T(t_0) \quad (5.4)$$

Así, $X(x)$ tiene la expresión polinómica:

$$X(x) = a_1x^2 + a_2x + a_3 \quad (5.5)$$

Que llevado a la ecuación 5.4, queda:

$$L(x, t) = X(x)T(t) = (a_1x^2 + a_2x + a_3)[b_1 + b_2t + b_3e^{-t/\tau} \cos(\omega t)] \quad (5.6)$$

Para determinar los valores de los parámetros a_i y b_i mediante un problema de minimización, es importante fijar ciertas condiciones de contorno. Para empezar, no se produce pérdida de producción cuando el estrés hídrico es nulo en ninguna circunstancia; además, una condición inicial: en cualquier tratamiento, la pérdida en el año 0 (esto es, antes de que empiece la aplicación del estrés), ha de ser nula. Llevadas dichas condiciones a la ecuación 5.6, ésta queda definida tal y como se muestra en la ecuación 5.7:

$$\begin{aligned} L(x=0, t), \forall t &\rightarrow L(0, t) = a_3 [b_1 + b_2t + b_3e^{-t/\tau} \cos(\omega t)], \forall t \\ L(x, t=0), \forall x &\rightarrow L(x, 0) = (a_1x^2 + a_2x + a_3)(b_1 + b_3) = 0, \forall x \\ &\Rightarrow \begin{cases} a_3 = 0 \\ b_1 = -b_3 \end{cases} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Asimismo, los extremos locales están situados en $t = k, k \in \mathbb{Z} \Leftrightarrow \omega = \pi + 2n\pi$ rad, $n \in \mathbb{N}$. Por lo tanto, la ecuación 5.6 queda:

$$L(x, t) = (a_1 x^2 + a_2 x) \{b_2 t + b_3 [e^{-t/\tau} \cos(\pi t) - 1]\} \quad (5.8)$$

Dado que esta función fue creada para estimar la pérdida anual de producción, no tiene sentido calcular la función de pérdida $L(x, t)$ en tiempo continuo, por lo que puede ser expresada en forma discreta tal y como muestra la ecuación 5.9.

$$L(x, k) = L(x, t = k) = (a_1 x^2 + a_2 x) \{b_2 k + b_3 [e^{-k/\tau} (-1)^k - 1]\}, k \in \mathbb{N} \quad (5.9)$$

De este modo, la función de pérdida de producción permite una estimación de la pérdida del año siguiente cuando se ha aplicado el mismo nivel de estrés en los $(k-1)$ años precedentes. Sin embargo, esto excluye la posibilidad de modelar la pérdida de producción en caso de que varíe el nivel de estrés de un año a otro.

En un intento de resolver este problema, se propone una transformación en ecuación en diferencias: las ecuaciones se simplificaron bajo la hipótesis de cambios graduales, esto es, $x(k) \approx X(k-1) \approx X(k-2)$. Esta aparente contradicción con la idea inicial de variar el nivel de estrés entre varios años se debe a que en la aplicación de los tratamientos teóricos RDS_{75} , RDS_{65} , RDS_{50} se produjo un error en la aplicación del índice de estrés hídrico, error que fue detectado y medido gracias al uso de los citados pluviómetros analógicos. De este modo, la modificación de la ecuación para utilizar ecuaciones en diferencias responde a la necesidad de adaptarse mejor a los datos del experimento inicial; y dado que estos errores en el IEH son pequeños, la hipótesis de cambios graduales puede aplicarse. De este modo, la ecuación en diferencias queda como se muestra en la ecuación 5.10.

$$L(x, k) = (1 - e^{-1/\tau})L(x, k-1) + e^{-1/\tau}L(x, k-2) + b_2(1 + e^{-1/\tau})(a_1 x^2 + a_2 x) \quad (5.10)$$

Cualquier ecuación en diferencias ha de venir acompañada con n condiciones de frontera. En este caso, se obtienen dos valores iniciales de la ecuación 5.9.

$$L(x, 0) = 0, \forall x \quad (5.11)$$

$$L(x, 1) = (a_1 x^2 + a_2 x)[b_2 - b_3(1 + e^{-1/\tau})] \quad (5.12)$$

Para probar nuestro modelo simplificado, ha de compararse con el rendimiento del modelo completo. Esto implica establecer una relación análoga a 5.10 pero considerando la variación en la variable x . Tal y como sugieren J.R. y L.A. [1952], se puede aplicar la transformada Z a la expresión de la ecuación 5.10 con tiempo de muestreo $T=1$ (donde $p = e^{-1/\tau}$ y r.o.c. es la región de convergencia).

$$Z[L(x, t)](z) = L(x, z) = Z[X(x)T(t)](z) = X(x)Z[T(t)](z)$$

$$L(x, z) = X(x) \frac{z^{-3}C_1 + z^{-2}C_2 + z^{-1}C_3}{z^{-4}p^2 + 2z^{-3}p(1-p) + z^{-2}(p^2 + 1 - 4p) + 2z^{-1}(p-1) + 1} \quad (5.13)$$

r.o.c. : |z| > Max(1, p)

Donde $C_1 = p^2(b_2 + b_3) - pb_3$; $C_2 = -p^2b_3 + p(2b_2 + 4b_3) + b_3$; $C_3 = -3pb_3 - b_3 + b_2$.

Con el uso de la transformada Z , la ecuación 5.13 puede convertirse en una ecuación en diferencias bajo las mismas condiciones iniciales que la ecuación 5.11:

$$L(x_k, k) = C_1 X(k-3) + C_2 X(k-2) + C_3 X(k-1) + 2(1-p)L(x_{k-1}, k-1) - (p^2 + 1 - 4p)L(x_{k-2}, k-2) + 2p(p-1)L(x_{k-3}, k-3) - p^2 L(x_{k-4}, k-4) \quad (5.14)$$

Al llegar a este punto, nos encontramos con dos modelos discretos: el completo 5.14 y el simplificado 5.9. A la hora de decidir cuál de los dos es más

conveniente, en Nash y Sutcliffe [1970] se define el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe para modelos separables. Dicho modelo compara los errores estándar con respecto de la media de dos modelos distintos, ofreciendo información acerca de en qué grado mejora un modelo a otro.

La fórmula para calcular ese índice es $r^2 = \frac{R_2^2 - R_1^2}{1 - R_1^2} = 1 - \frac{SSE_2}{SSE_1}$, donde R_i^2 es el coeficiente de determinación de mínimos cuadrados R^2 para los modelos 1 y 2, y SSE_i es el error estándar con respecto de la media de dichos modelos.

5.2. Resultados y discusión

5.2.1. Relaciones hídricas y respuesta fisiológica del cultivo

La tabla 5.1 muestra las condiciones meteorológicas y las dotaciones hídricas recibidas por cada uno de los tratamientos estudiados durante seis campañas de riego (2005-2010), con valores diarios de la evapotranspiración del cultivo de 5,34, 4,54, 3,20, 3,78, 3,17 y 3,26. Las precipitaciones se distribuyeron fundamentalmente entre el final del otoño y el principio de la primavera, mientras que en el periodo de máxima demanda evapotranspirativa fueron prácticamente despreciables.

Las cantidades de riego en los tratamientos estresados se aproximaron a funciones de la evapotranspiración del cultivo, tal y como estaba previsto en su diseño, y el ahorro medio en agua de riego con respecto al tratamiento control para los tratamientos RDS 50, 65 y 75 fue del 46%, 34% y 23% respectivamente. Se pudo observar que el aporte de agua (incluyendo tanto riego como precipitaciones) en el tratamiento control C₁00 fue superior a la evapotranspiración del cultivo, aunque este hecho fue el resultado de la aparición de tormentas tanto al principio como al final de las campañas de riego, coincidiendo con el principio de la primavera y el final del otoño.

Tabla 5.1: Agua aplicada, Balance hídrico y tratamientos de riego. El periodo de riego se mide en días del año (DDA).

Año	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Periodo de riego	150-280	110-275	110-309	116-284	110-329	115-277
ET _c (mm)	700	754	641	639	698,7	547,8
Precip. (mm)	28	119	115	117	67,2	89,4
RDS ₅₀						
Riego (mm)	372	348	356	345	356,3	257,5
EH	0,53	0,45	0,56	0,54	0,51	0,47
RDS ₆₅						
Riego (mm)	465	435	445	409	444,4	345
EH	0,66	0,56	0,69	0,64	0,64	0,63
RDS ₇₅						
Riego (mm)	533	501	512	472,9	517	399,9
EH	0,76	0,67	0,80	0,74	0,74	0,73
C ₁₀₀						
Riego (mm)	696	653	668	632,6	680,1	531,4
EH	0,99	0,88	1,04	0,99	0,97	0,97

EH: Estrés hídrico; RDS: Riego deficitario sostenido.

5.2.2. Respuesta productiva del cultivo a riego deficitario sostenido y funciones de productividad del agua anuales.

Los efectos del riego deficitario sobre la producción frutícola a lo largo de seis años pueden observarse en la tabla 5.2

Tabla 5.2: Producción media de frutos (kg/árbol) a lo largo del experimento. Diferentes letras muestran diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Tratamiento	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
RDS ₅₀	88,3 ^a	119,6 ^a	76,0 ^a	120,5 ^a	47,1 ^a	75,7 ^a
RDS ₆₅	100,7 ^a	126,7 ^a	81,7 ^a	121,0 ^a	48,0 ^a	78,0 ^{ab}
RDS ₇₅	99,1 ^a	113,9 ^a	82,0 ^a	121,0 ^a	60,6 ^b	88,9 ^{ab}
C ₁₀₀	111,3 ^a	124,0 ^a	95,7 ^a	132,5 ^b	68,8 ^b	99,8 ^b

RDS: Riego deficitario sostenido; C: Tratamiento control

Durante los primeros años del experimento, entre 2005 y 2008, no se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento control y los tratamientos deficitarios. Es en el periodo siguiente (2008-2010) cuando empezaron a obser-

varse diferencias significativas en la producción, de forma especialmente apreciable en los tratamientos de mayor estrés, RDS₅₀ y RDS₆₅. Finalmente, entre 2009 y 2010, no se apreciaron diferencias significativas entre el tratamiento control y el RDS₇₅. La pérdida de la producción de un árbol, en referencia a la producción del tratamiento control cuando ese árbol está sometido a los distintos tratamientos de déficit hídrico varió entre el 16% para los árboles sometidos al tratamiento RDS₅₀ y el 9% para el tratamiento RDS₇₅.

La figura 5.3 muestra la relación entre pérdida de producción ($1 - \frac{Yield_i}{Yield_{C100}}$) y el estrés hídrico aplicado ($1 - \frac{ET_{C_i}}{ET_{C_{C100}}}$) año a año. Según esos resultados, en el año 2005 no se produjo un efecto significativo sobre la producción, aunque existió una relación directa entre ambas magnitudes.

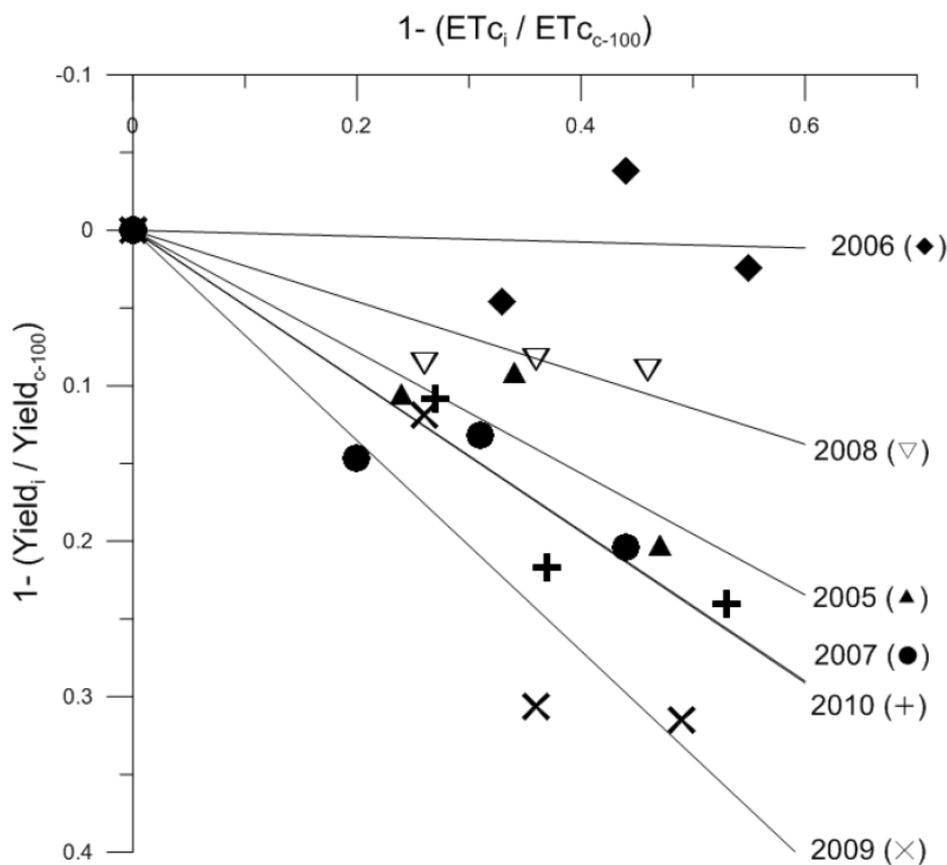


Figura 5.3: Coeficientes K_y de funciones de productividad del agua (CWPF) lineales para cada año relacionando la pérdida de producción con la tasa de evapotranspiración aplicada (ET_c).

Esta relación puede verse en la tabla 5.3 donde se muestran las funciones de productividad del agua CWPF para ese año con $K_y = 0,39$ y un coeficiente de determinación $R^2 = 0,90$.

Tabla 5.3: Valores estimados de K_y y coeficiente de determinación R^2 para funciones CWPF en función de ET_c y ψ_{stem} .

CWPF		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
$1 - \frac{Y_i}{Y_{C100}} = K_y \frac{ET_{c_i}}{ET_{c_{C100}}}$	K_y	0,39	0,01	0,49	0,24	0,68	0,48
	R^2	0,90**	ns	0,87**	0,84**	0,89**	0,94**

** : significativo con $p < 0,01$; * : significativo con $p < 0,05$

ns: no significativo

En el año siguiente, 2006, la relación fue despreciable, con una función CWPF prácticamente plana, pendiente cercana a cero, sin diferencias importantes entre los tratamientos. Al llegar a 2007 las relaciones volvieron a ser significativas, con $K_y = 0,39$ y $R^2 = 0,87$; sin embargo, el efecto sobre la producción volvió a ser despreciable. Sólo a partir del siguiente año, 2008, las diferencias entre los distintos tratamientos RDS empiezan a ser significativas, y esa significación sigue creciendo en los tres años siguientes hasta el fin del estudio en 2010.

Los resultados del experimento mostraron una clara tendencia en la respuesta del cultivo al estrés hídrico a lo largo de varios años consecutivos, sugiriendo que los efectos no son similares para diferentes estaciones y que la K_y no muestra una tendencia al crecimiento a lo largo del tiempo. Es más, existe una oscilación en los valores de K_y , con años en los que los valores de esta magnitud son elevados (2005, 2007 y 2009, los años impares) y años con K_y más bajos (los años pares correspondientes).

Es por eso que, a la hora de modelar los efectos del riego deficitario sobre la producción en cítricos, se ha de tener en cuenta dos parámetros: el índice de estrés hídrico y la duración de dicho estrés.

Varios autores que han estudiado funciones CWPF en cultivos anuales han mostrado relaciones lineales entre las pérdidas de producción y el agua aplicada (Stewart y Hagan [1973]; Hanks [1974]; Hanks [1983]; Hexem y Heady [1978]). Estas relaciones pueden resultar útiles para el diseño de estrategias de riego, eligiendo los tiempos de riego y la cantidad de agua aplicada, permitiendo además comparar eficiencias relativas del uso del agua (Al-Jamal y otros [2000]). Sin embargo, resulta complicado establecer una única función CWPF para un cultivo leñoso perenne, ya que en ese caso entran en juego diversos factores que

provocan variaciones en los valores de K_y . Entre esos factores destacan, como se ha visto, la variabilidad temporal, pero también la espacial (depende de la parcela) y los estados fenológicos del cultivo en los que se aplica el déficit hídrico.

En este sentido, Clumpner y K. [1987] y Sammis [1981] obtuvieron resultados similares a los de este estudio. De acuerdo con esta argumentación, para cultivos anuales, K_y variará según el lugar pero los valores deberían ser similares año a año, viéndose afectadas tan sólo por las condiciones meteorológicas (Al-Jamal y otros [2000]). De este modo, si se acepta la hipótesis de que las condiciones climáticas fueron las mismas durante todo el periodo del ensayo, la variación interanual de K_y podría estar relacionada con el efecto acumulativo del estrés hídricos, y la capacidad de respuesta de un árbol sometido a dicho estrés acumulado a lo largo de varios años.

5.2.3. Funciones de pérdida de producción

De acuerdo con los resultados anteriores, puede definirse una función de pérdida de producción en frutos $L(x, t)$, donde x es el nivel de estrés hídrico y t es el tiempo. Esta función permitiría una estimación de la pérdida de producción en un año k cuando se aplique un cierto nivel de estrés x en ese año y en los $k - 1$ años anteriores. Aplicando el cálculo de la minimización de la función definida en la ecuación 5.2, se obtiene:

$$L(x, t) = (0,4127x - 0,1553x^2) \{0,1871t - 0,4731[e^{-t/12,11} \cos(\pi t) - 1]\} \quad (5.15)$$

La figura 5.4 muestra la curva tridimensional que sigue la pérdida de producción como función de los años de observación y el estrés hídricos. Para la evaluación de esta función de pérdida de producción, se agruparon los datos según su nivel de estrés, analizando la bondad del ajuste en tres escenarios diferentes de riego deficitario sostenido.

$$L(x = x_i, t) = k(x_i) \{b_2 t + b_3 e^{-t/\tau} [\cos(\pi t) - 1]\} \quad (5.16)$$

Donde x_i son los tres escenarios diferentes estudiados.

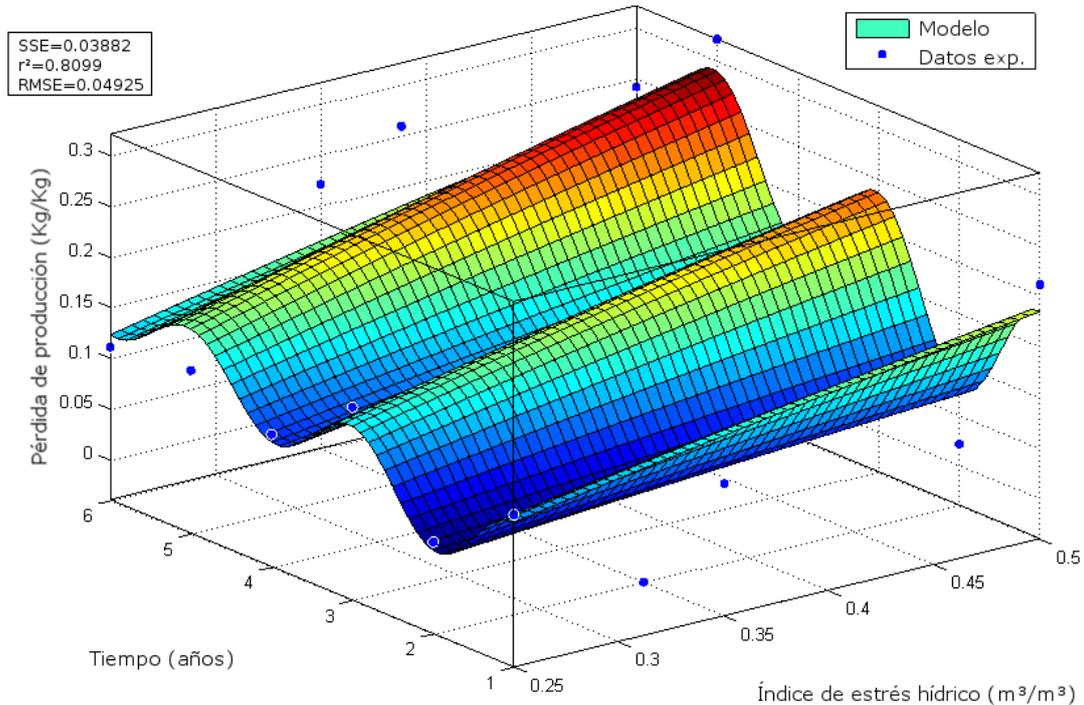


Figura 5.4: Curva de superficie para la función de pérdida de producción $y = L(x, t)$; comparación del modelo con los resultados experimentales. RMSE: Raíz del error cuadrático; SSE: Suma de los residuos al cuadrado; r^2 : Coeficiente de determinación.

La tabla 5.4 muestra las relaciones de significación calculadas para los tres niveles de estrés hídrico considerados para el ajuste en tiempo continuo, considerando esas relaciones definidas por el estrés hídrico durante seis años consecutivos. Se puede observar que dichas relaciones vendrán definidas por tres funciones oscilantes en las que los efectos del estrés no son constantes a lo largo del tiempo del ensayo. Sin embargo, se pudo observar cambios en dichos efectos en forma de recuperación parcial seguidos de años con pérdidas significativamente mayores en la producción (figura 5.4). También puede observarse que la amplitud de esas oscilaciones va decreciendo progresivamente, aunque ese efecto de atenuación es mayor para niveles de estrés menores.

El modelo propuesto define una serie de funciones para calcular la función de pérdida de producción en función del tiempo, asumiendo que éste es una variable continua. Sin embargo, los efectos del estrés hídrico sobre la producción en un cultivo frutal como el de los cítricos sólo pueden ser evaluados al

Tabla 5.4: Cálculo de las estadísticas de la bondad del ajuste en los escenarios de estrés hídrico analizados.

Índice de estrés hídrico	RMSE (kg/kg)	SSE (10 ⁻³ [Kg/Kg] ²)	r ²
Tiempo continuo			
RDS ₅₀	0,039	1,509	0,88**
RDS ₆₅	0,065	4,280	0,66**
RDS ₇₅	0,018	0,323	0,85**
Tiempo discreto simplificado			
RDS ₅₀	0,037	1,40	0,89**
RDS ₆₅	0,064	4,1	0,68**
RDS ₇₅	0,018	0,315	0,85**
Tiempo discreto completo			
RDS ₅₀	0,023	0,513	0,96**
RDS ₆₅	0,046	2,144	0,83**
RDS ₇₅	0,031	0,978	0,54**

** : significativo con $p < 0,01$; RMSE: Raíz del error cuadrático.

SSE: Suma de los residuos al cuadrado.

r²: Coeficiente de determinación.

final de la temporada, por lo que la variable *tiempo* debería ser considerada como discreta; sólo año a año se podrá decidir qué estrategia de gestión del estrés hídrico se ha de seguir y observar sus efectos sobre la producción. A la vista de este hecho, no tendría sentido seguir calculando la función $L(x,t)$ en tiempo continuo.

Se definió un modelo en tiempo discreto para estimar la pérdida de producción anual cuando se aplicaba el mismo nivel de estrés (o un nivel similar) en los años anteriores. Tras llevar a cabo el proceso de minimización del error, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $a_1 = -0,1567$
- $a_2 = 0,4342$
- $b_2 = 0,1669$
- $b_3 = -0,4935$
- $\tau = 12,1214$

Como cabía esperar, se puede comprobar que los valores son similares a los del cálculo continuo. Aplicando estos valores a las ecuaciones 5.9, 5.10 y 5.11, se obtienen las expresiones 5.17, con un $SSE = 0,0019$; $RMSE = 0,0439$; $r^2 = 0,80$.

$$\begin{aligned}
 L(x, k) &= (0,4342x - 0,1567x^2) \{0,1669k - 0,4935[(-1)^k e^{-k/12,1214} - 1]\} \\
 L(x, k) &= 0,3206C(x) + 0,0792L(x, k - 1) + 0,9208L(k, x - 2) \\
 L(x, 0) &= 0, \forall x \\
 L(x, 1) &= -0,1747x^2 + 1,1148x, \forall x
 \end{aligned}
 \tag{5.17}$$

Tras el cálculo de las funciones de pérdida de producción, se agrupan los datos bajo tres diferentes escenarios (tabla 5.4, figura 5.5).

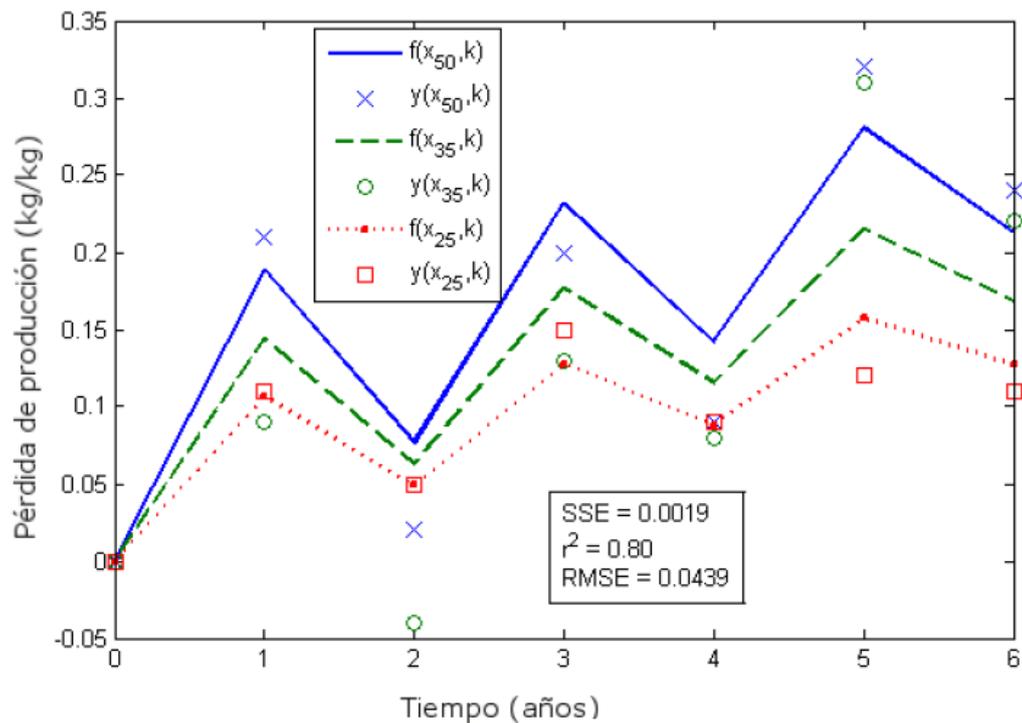


Figura 5.5: Función de pérdida de producción $y = L(x, t)$; comparación del modelo simplificado con los resultados experimentales. RMSE: Raíz del error cuadrático; SSE: Suma de los residuos al cuadrado; r^2 : Coeficiente de determinación.

Llegando finalmente a:

$$L(x = x_i, k) = C(x_i) \{b_2 k + [1 + (-1)^k] b_3 e^{-k/\tau}\} \quad (5.18)$$

Donde x_i son los tres escenarios distintos estudiados.

Para evaluar el rendimiento de este modelo simplificado es necesario compararlo con el rendimiento de un modelo completo. Esto implica obtener una función análoga que incluya los efectos de la variabilidad temporal en el estrés hídrico; aplicando el proceso de minimización, se obtuvieron los siguientes valores:

- $a_1 = -0,0616$
- $a_2 = 0,4392$
- $b_2 = 0,2054$
- $b_3 = -0,3724$
- $\tau = 12,1111$

Llevándolos a las ecuaciones 5.13 y 5.14, se obtiene la expresión en el dominio de la transformada Z de la función de transferencia 5.19.

$$L(x_k, z) = C(x) \frac{-0,5262z^{-2} + 0,9208z^{-1}}{0,9208z^{-3} - 0,8416z^{-2} - 1,079z^{-1} + 1} \quad (5.19)$$

$$C(x_i) = -0,567x_i^2 + 0,4044x_i; \quad i = k, k-1, k-2...$$

A su vez, dicha función de transferencia da lugar a la ecuación en diferencias 5.20.

$$L(x_k, k) = -0,5262C(x_{k-2}) + 0,9208C(x_{k-1}) + 0,8416L(x_{k-1}, k-1) + 1,079L(x_{k-2}, k-2) - 0,9208L(x_{k-3}, k-3) \quad (5.20)$$

Tras el cálculo de las funciones de pérdida de producción, se agruparon los datos según los distintos niveles de estrés del ensayo en tres escenarios distintos

(tabla 5.4, figura 5.6), empleando las mismas condiciones iniciales que para el modelo simplificado.

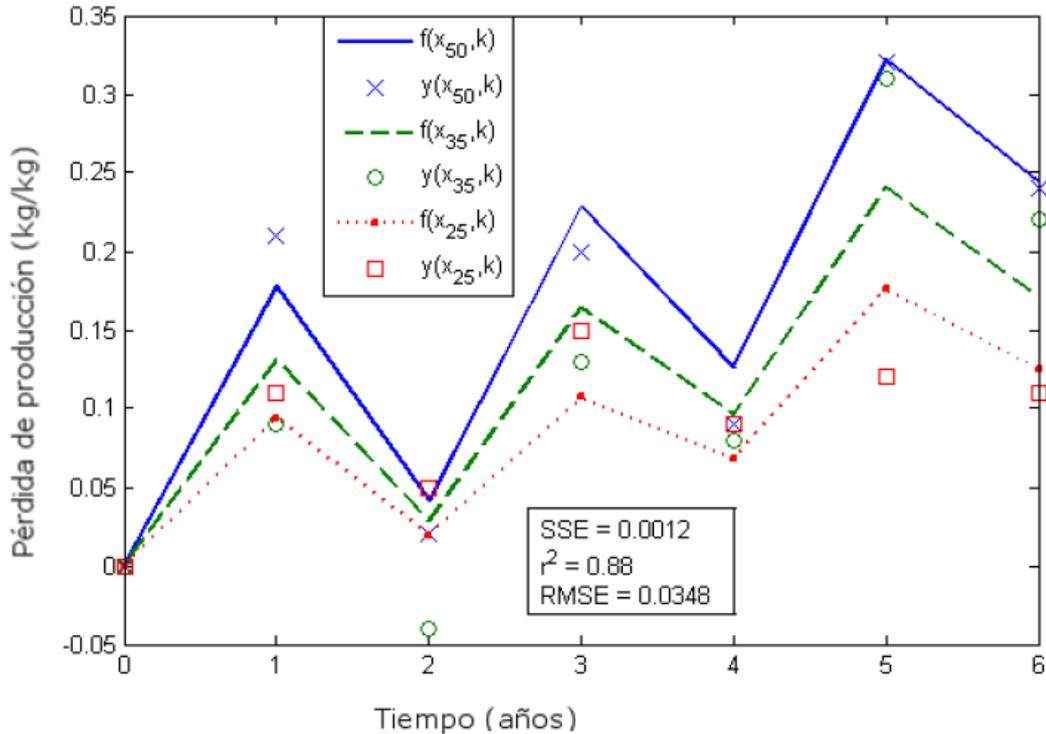


Figura 5.6: Función de pérdida de producción $y = L(x, t)$; comparación del modelo completo con los resultados experimentales. RMSE: Raíz del error cuadrático; SSE: Suma de los residuos al cuadrado; r^2 : Coeficiente de determinación.

Los valores obtenidos provocaron la cancelación de un cero y un polo, lo que hizo al modelo dependiente de los tres años anteriores. Este modelo presenta unos valores de $SSE = 0,0012$; $RMSE = 0,0348$; $R^2 = 0,8755$.

Una vez obtenidos todos estos valores, se pudo comparar la bondad de dos modelos. Para eso se emplea el índice de mejora de Nash-Sutcliffe; al obtenerse para el modelo simplificado un $R^2 = 0,8030$ y para el modelo completo $R^2 = 0,8755$, con un índice de mejora $r^2 = 1 - \frac{R_2^2}{R_1^2} = 0,090$, inferior al 10%.

Por lo tanto, pudo comprobarse que bajo la hipótesis de una baja variación del estrés hídrico a lo largo de varios años, el modelo simplificado puede ser empleado para predecir la respuesta del cultivo en forma de pérdida de pro-

ducción. El siguiente paso debe ser determinar una cota para cuantificar qué se puede considerar una baja variación. A la vista de los datos experimentales, se puede dar una cota de variación a la que el modelo simplificado funciona adecuadamente en torno al 15 %. Por tanto, $0,85 < \frac{x_{k+1}-x_k}{x_k} < 1,15$

5.3. Conclusiones

En una situación de escasez de medios hídricos, el uso de modelos permite a un usuario ajustar su consumo de agua y predecir con facilidad el comportamiento de su cultivo, ayudándolo a decidir la mejor estrategia de riego. En contraste con la utilidad de las funciones de productividad de agua del cultivo para determinar la dependencia entre producción y riego, hay que tener en cuenta que estos modelos son bastante costosos de determinar, tanto en lo relativo a recursos como al tiempo.

Más allá de la capacidad inherente de estas funciones de cuantificar de la forma más precisa posible la relación entre la cantidad de agua y la producción del cultivo, el comportamiento del cultivo de cítricos al verse sometido a un déficit hídrico prolongado son conclusiones que deben extraerse de este estudio. En este sentido, para estas funciones, la zona de déficit hídrico es la región de funcionamiento en la que dichas funciones proporcionan la información más valiosa.

Sin embargo, estas funciones basadas en producción y relaciones evapotranspirativas no proporcionan la producción del cultivo en términos absolutos sino relativos. En este contexto, Paul y otros [2000] aplicaron distintos mecanismos de optimización como por ejemplo la programación dinámica para determinar funciones de productividad del agua basadas en el modelo de la relación entre evapotranspiración y pérdida de producción.

Existen numerosos factores endógenos que influyen o incluso determinan la producción final, además por supuesto del aporte de agua. Por eso es más útil estudiar la respuesta del cultivo al agua incluso en términos relativos a un estrés prolongado para conseguir determinar, entre otros factores, en qué instante de tiempo se alcanza un valor umbral.

Por lo tanto, la respuesta del cultivo al riego deficitario es una relación con interdependencia entre la cantidad de riego y la efectividad de ese riego cuan-

do fue aplicado en periodos anteriores. En referencia a las distintas funciones de producción obtenidas en este capítulo, se puede concluir que en el cultivo de cítricos en condiciones climatológicas semi-áridas, un déficit hídrico prolongado no provoca una respuesta creciente en el tiempo; la planta es capaz de mitigar de forma gradual los efectos de ese estrés, siguiendo un patrón de comportamiento sinusoidal a lo largo del tiempo hasta que se alcance un equilibrio. Este cambio se va ralentizando a lo largo del tiempo, especialmente cuanto menor sea el grado de estrés hídrico aplicado. En ese sentido, el tratamiento RDS₇₅ mostró una atenuación mayor de los efectos del RD que la de los demás, que mantuvieron una tendencia creciente. Por lo tanto, aunque los tratamientos RDS₅₀ y RDS₆₅ mostraron un comportamiento similar, el mayor nivel de estrés hizo que su atenuación no fuera suficiente para alcanzar un punto de estabilización tras seis años consecutivos de estrés hídrico.

A la vista de los resultados experimentales, es posible concluir que como consecuencia de la aplicación de estrés hídrico a largo plazo, hay dos factores fundamentales que definen la respuesta del cultivo de cítricos: el nivel de estrés hídrico aplicado y la duración de dicho estrés hídrico. En este sentido, existe una fluctuación en la pérdida de producción a lo largo de años sucesivos, lo que podría correlacionarse con la capacidad de los árboles de responder al estrés acumulado a lo largo del tiempo. Esta variación se vería atenuada a lo largo de los años, alcanzando un valor de estabilidad que será mayor (en el sentido de mayores pérdidas) cuanto más intenso sea el nivel de estrés hídrico soportado por el cultivo.

En cuanto a las diferentes funciones de pérdida de producción, el modelo simplificado de tiempo discreto proporciona una aproximación óptima para predecir la pérdida de producción a lo largo del tiempo cuando se aplica un índice de estrés hídrico similar a lo largo de varios años. Sin embargo, en el caso de introducir cambios significativos en dicho estrés, el modelo completo en tiempo discreto proporcionaría mejores resultados. A pesar de esta distinción, ambos modelos permiten el ajuste dinámico del consumo de agua y la predicción del comportamiento del cultivo con gran facilidad para decidir la mejor estrategia de Riego Deficitario.

Capítulo 6

Efecto sobre la producción de la aplicación de déficit hídrico en distintos periodos fenológicos

6.1. Material y métodos

6.1.1. Parcela experimental

El ensayo se llevó a cabo a lo largo de tres años consecutivos, en una explotación comercial de naranjos (*Citrus sinensis* L. Osb. cv. Navelina) sobre patrón Carrizo (*Citrus sinensis* Osb. x *Poncirus trifoliata*. Raf.), situado en el término municipal de Palma del Río (37°44'4,59" N, 5°12'35,2" O), en el valle del Guadalquivir. Los árboles fueron plantados diez años antes del comienzo del estudio, con un marco de plantación de 6 x 5 metros. El sistema de riego era localizado, con dos ramales por fila de árboles y emisores autocompensados. La altura media de los árboles fue de 3 m, y su diámetro de copa 4 m. Los árboles se plantaron en caballones de 30 cm de alto con orientación espacial noroeste-

sudeste. El área sombreada del suelo y la zona de riego forman el 30% y el 17% de la superficie total.

El suelo de la zona del ensayo es Fluvisol típico FAO98 [1998], con textura franco-arcillo-arenosa (350 g/kg de arena; 400 g/kg de limo; 250 g/kg de arcilla) y contenido de materia orgánica por debajo de los 15 g/kg. Tiene una profundidad de 1,5m, con capacidad de campo y punto de marchitez permanente de 235 mm/m y 100 mm/m respectivamente.

La climatología local es mediterránea, con una ET_0 media de 1500 mm/año y precipitaciones anuales de 475 mm, distribuidas fundamentalmente entre finales del otoño y principios de la primavera, con una gran variabilidad interanual. Las temperaturas se ven sometidas a grandes variaciones a lo largo del año, con temperaturas medias que van desde los 10°C del invierno a los 35°C del verano, superando a menudo los 40°C durante las horas de mayor efecto de la radiación solar.

6.1.2. Diseño experimental. Tratamientos RDC

El diseño experimental fue de bloques al azar, con cinco repeticiones por tratamiento. La unidad experimental ($360 m^2$) consistía tres filas con cinco árboles por fila, y los tres árboles centrales (en lo sucesivo, fila central) fueron los escogidos para medir la productividad del cultivo frutal. La distribución puede verse en la figura 6.1.

Tabla 6.1: Definición de los tratamientos de riego.

Tratamiento	Floración	Crecimiento	Maduración
RDI ₁	0,55	0,70	0,55
RDI ₂	0,55	0,70	0,70
RDI ₃	0,55	0,55	0,70
RDI ₄	0,70	0,70	0,55
C ₁₀₀	Regado permanentemente al 100% de la ET_c		

Los tratamientos de riego se establecieron en función de diferentes índices de estrés, definidos a través de la relación entre el volumen de agua aplicado en cada tratamiento y el valor de la evapotranspiración real del cultivo (ET_c), teniendo en cuenta la etapa fenológica del cultivo (floración, crecimiento o maduración), según se relacionan en la tabla 6.1. Se instalaron contadores volumétricos para registrar el volumen de agua aplicada a cada tratamiento.



Figura 6.1: Distribución de los tratamientos de riego en el ensayo de RDC.

Las distintas fase consideradas se corresponden con los principales periodos fenológicos en el cultivo del cítrico. La primera fase abarca la floración y el establecimiento del fruto; la segunda fase, los meses de julio y agosto en los que la fruta alcanza el tamaño máximo; finalmente, durante la fase de maduración, se producen diversos cambios químicos en el fruto, que provocan un cambio de color y un incremento en el total de sólidos solubles.

Los valores estacionales de la ET_c fueron determinados empleando la ecuación de Doorenbos y Pruitt (Doorenbos y Pruitt [1977], ecuación 5.1), recogiendo datos meteorológicos en una estación automatizada situada en las proximidades del cultivo. Los coeficientes del cultivo variaron entre 0,50 entre marzo y mayo, 0,55 entre junio y octubre y de nuevo 0,50 en noviembre y diciembre.

Al final de cada estación se analizaron para su cálculo los valores de la producción de fruto, la productividad del agua y la productividad del agua de riego. Se llevó a cabo un análisis exploratorio y descriptivo de la producción seguido de un análisis con un análisis de separación de media usando el test de significación estadística honesta (HSD) de Tukey Linton y Harder [2007].

El objetivo principal fue determinar una expresión para determinar la pérdida de producción en función del nivel de estrés hídrico aplicado. La función óptima se determinó mediante la minimización del error cuadrático medio (RMSE), tal y como se mostró en la ecuación 5.2 en el capítulo 5.

Donde $\hat{f}(x)$ es cada una de las posibles funciones de producción, $x = x(t)$ es el nivel de estrés hídrico aplicado (que puede ser dependiente del tiempo) e y_i es la pérdida de producción medida tras la aplicación del nivel de estrés x_i .

6.1.3. Modelando la función de producción del cultivo

Se determinaron diferentes relaciones entre el estrés hídrico aplicado y la pérdida de producción, teniendo en cuenta que los diferentes niveles de estrés hídrico fueron definidos en diferentes fases: floración, crecimiento de fruto y maduración. Si se parte de la hipótesis de que el estrés hídrico en una fase no tiene efectos sobre las siguientes:

$$f(\vec{x}) = f(x_f, x_g, x_r) \quad (6.1)$$

Donde $f(\vec{x})$ es la función de pérdida de producción y los índices de estrés en las fases de floración, crecimiento de fruto (growing) y maduración (ripening) vienen dados por las variables x_f, x_g, x_r respectivamente.

Se propusieron funciones cuasi-lineales, cuadráticas y cúbicas, obteniendo la máxima precisión con las últimas. Para resolver el problema de minimización se emplearon las funciones de minimización del software matemático MATLAB®(The Mathworks Inc., Natick, Ma., EE.UU.) y el algoritmo de programación secuencial cuadrático Fletcher y Powell [1963] Gill y otros [1981], que nos proporcionaron las funciones más adecuadas.

La ecuación general para cada fase se definió como se muestra en la ecuación 6.2.

$$f_k(x_k) = a_k x_k^3 + b_k x_k^2 + c_k x_k \quad (6.2)$$

Considerando que cuando no se produce estrés hídrico, no hay pérdida de la producción, es razonable asumir que la función $f_k(x_k)$ no tenga ordenada en el origen: $f_k(0) = 0$.

6.1.4. Modelo aditivo

La ecuación general que incluye las tres fases es la suma de las tres ecuaciones previas definidas en la ecuación 6.2. Llevadas a la ecuación 6.1, se obtiene:

$$f(\vec{x}) = f(x_f, x_g, x_r) = f_f(x_f) + f_g(x_g) + f_m(x_m) \quad (6.3)$$

Se tuvieron en cuenta cuatro restricciones para cada función $f_k(x_k)$:

1. En el rango de interés, $x_k \in [0, 1]$, la función debe ser monótona creciente:

$$f'_k(x_k) \geq 0, \forall x_k \in [0, 1] \rightarrow 3a_k x_k^2 + 2b_k x_k + c_k \geq 0 \quad (6.4)$$

2. La productividad no puede reducirse en un factor mayor que 1:

$$f_k(x_k) \leq 1, \forall x_k \in [0, 1] \quad (6.5)$$

3. Por definición, la función vale 0 en el origen

$$f_k(0) = 0 \quad (6.6)$$

4. Para que el modelo aditivo sea coherente, la suma de las tres componentes no puede ser mayor que uno en ningún momento (esta condición hace la condición 6.5 redundante). Como, por la condición 6.4 las funciones son monótonas crecientes:

$$f_f(1) + f_g(1) + f_m(1) \leq 1 \rightarrow f(1, 1, 1) = \sum_{k=f,g,r} a_k + b_k + c_k \leq 1 \quad (6.7)$$

Dadas esas cuatro restricciones, la función a minimizar es:

$$\begin{aligned} \text{Min: } RMSE &= E_r \cdot E_r^T \\ E_r &= (AX + -B) \oslash B \end{aligned} \tag{6.8}$$

$$\begin{aligned} A &= [k_{ij}^n], B = [y_i]^T; i = 1..,4; j = f, g, r; n = 1..,3 \\ X &= [a_f \quad a_g \quad a_r \quad b_f \quad b_g \quad b_r \quad c_f \quad c_g \quad c_r] \end{aligned}$$

Lo que forma un problema de minimización en forma matricial donde la incógnita es el vector X . k_{ij} son los niveles de estrés aplicados en la fase j del experimento i ; la expresión $M \oslash N$ implica el cociente de Hadamard (elemento a elemento) de dos vectores M y N Byung-Gook y Yunbeom [1998]. Finalmente, y siguiendo a Moriasi y otros [2007], se empleó el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe R^2 para cuantificar la eficiencia del modelo resultante Nash y Sutcliffe [1970].

6.1.5. Modelo por ajuste con términos cruzados

La principal hipótesis de partida de este modelo es que el estrés inducido en dos periodos fenológicos diferentes debería tener un efecto mayor que su aplicación en tan sólo una fase, pero podría tener un efecto más débil que la simple suma de dos componentes separados. Dado que f es una función de pérdida de producción, si el estrés se induce en la primera fase, la producción de fruto se reducirá; consecuentemente, el estrés hídrico aplicado en periodos posteriores no podrá tener efecto sobre la parte de la producción que ya se ha perdido.

$$\begin{aligned} f(x_f, 0, 0) &= f_f(x_f) \rightarrow P(t_1) = 1 - f(x_f, 0, 0) = 1 - f(x_f) \\ f(x_f, x_g, 0) &= f_f(x_f) + f_g(x_g)P(t_1) \rightarrow P(t_2) = 1 - f(x_f, x_g, 0) \\ f(x_f, x_g, x_r) &= f_f(x_f) + f_g(x_g)P(t_1) + f_r(x_r)P(t_2) \end{aligned} \tag{6.9}$$

Donde $P(t)$ es una función que describe la producción resultante de aplicar estrés hídrico (es decir, el complementario de las pérdidas); t_1, t_2 son los instantes de tiempo al final de las fases de floración y crecimiento respectivamente. Por lo tanto, $P(t_1), P(t_2)$ son las producciones resultantes de aplicar estrés hídrico en las dos primeras fases. Obviamente, si tomamos t_0 como el instante de tiempo anterior a la fase de maduración, $P(t_0) = 1$.

La ecuación 6.9 se puede desarrollar:

$$\begin{aligned}
 f(x_f, x_g, 0) &= f_f(x_f) + f_g(x_g)P(t_1) = f_f(x_f) + f_g(x_g) - f_f(x_f)f_g(x_g) \\
 f(\vec{x}) &= f(x_f, x_g, x_r) = f_f(x_f) + f_g(x_g)P(t_1) + f_r(x_r)P(t_2) \rightarrow \\
 f(\vec{x}) &= f_f(x_f) + f_g(x_g) + f_r(x_r) - f_f(x_f)f_g(x_g) - f_f(x_f)f_r(x_r) \\
 &\quad - f_g(x_g)f_r(x_r) + f_f(x_f)f_g(x_g)f_r(x_r)
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

Esta ecuación puede escribirse en forma resumida tal y como muestra 6.11.

$$f(x_f, x_g, x_r) = \sum_{i=f,g,r} f_i(x_i) + \sum_{i=f,g,r; i \neq j} f_{ij}(x_i, x_j) + f_{fgr}(x_f, x_g, x_r) \tag{6.11}$$

Donde las $f_k(x_k)$ pueden calcularse con las restricciones previamente propuestas, y las $f_{ij}(x_i, x_j)$ y $f_{fgr}(\vec{x})$ se pueden calcular según la ecuación 6.12.

$$\begin{aligned}
 f_{ij}(x_i, x_j) &= -f_i(x_i)f_j(x_j) \\
 f_{fgr}(\vec{x}) &= f_f(x_f)f_g(x_g)f_r(x_r)
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

Si se garantiza el cumplimiento de esas restricciones, el efecto del estrés hídrico en dos fases ha de ser mayor (o, en el caso degenerado, igual) que el efecto del estrés en una cualquiera de ellas, lo que viene garantizado por la restricción 6.5: $0 \leq f_i(x_i) \leq 1, \forall x_i \in [0, 1]$.

Además, la superposición de dos de estos efectos ha de dar como resultado una función monótona creciente, lo que a su vez viene garantizado por las condiciones 6.4 y 6.5.

$$\begin{aligned} f_{ij} + f_j + f_i = f_i + f_j - f_i f_j \leq 1, \forall (x_i, x_j) \in [0, 1]^2 \rightarrow f_j(1 - f_i) \leq 1 - f_i \\ 1 - f_i \geq 0, \forall x_i \in [0, 1] \rightarrow f_j(x_j) \leq 1, \forall x_j \in [0, 1] \end{aligned} \quad (6.13)$$

Sumando los términos cruzados de las tres fases (floración, crecimiento de fruto y maduración), el efecto del estrés hídrico ha de ser mayor que el efecto del estrés aplicado tan sólo sobre dos de dichas fases cualesquiera. Esto nos lleva a la ecuación 6.14, garantizada por la restricción 6.5.

$$\begin{aligned} f_i + f_j + f_k - f_i f_j - f_i f_k - f_j f_k + f_i f_j f_k \geq f_i + f_j - f_i f_j \rightarrow f_k - f_i f_k - f_j f_k + f_i f_j f_k \geq 0 \\ f_k(x_k) \geq 0, \forall x_k \in [0, 1] \rightarrow 1 - f_i - f_j + f_i f_j \geq 0 \rightarrow f_i + f_j - f_i f_j \leq 1, \forall (x_i, x_j) \in [0, 1]^2 \end{aligned} \quad (6.14)$$

Como indicaba la condición 6.5, la pérdida de producción tiene una cota superior de 1, como muestra la ecuación 6.15.

$$\begin{aligned} f(\vec{x}) = f_f + f_g + f_r - f_f f_g - f_f f_r - f_g f_r + f_f f_g f_r \leq 1, \forall (x_f, x_g, x_r) \in [0, 1]^3 \\ 1 - f_g(x_g) \geq 0, \forall x_g \in [0, 1] \rightarrow f_f(1 - f_g) + f_r(1 - f_g) + f_f f_r(1 - f_g) \leq 1 - f_g \rightarrow \\ f_f + f_r + f_f f_r \leq 1, \forall (f_f, f_r) \in [0, 1]^2 \end{aligned} \quad (6.15)$$

Desgraciadamente, no es posible transformar todas las restricciones del problema en condiciones lineales. La condición 6.4 ($\frac{df_k(x_k)}{dx_k} \geq 0, \forall x_k \in [0, 1]$) ha de ser satisfecha en todos los puntos del intervalo $[0, 1]$, dando lugar a infinitas restricciones lineales. Para evitar este problema, se escogieron una serie de puntos representativos (por ejemplo, 0, 0,5, 1) lo bastante numerosos para evaluar la restricción en dichos puntos. Las restricciones sobre esos puntos se almacenaron

en un archivo de script Matlab®(.m), dando lugar a un total de 20 restricciones para las nueve variables del problema.

El problema de minimización propuesto para resolver este modelo sigue estando definido por la ecuación 6.8, pero las matrices han cambiado tanto que el problema debe ser redefinido:

$$\begin{aligned}
 \text{Min : } RMSE &= E_r \cdot E_r^T \\
 E_r &= \hat{F} \odot B \\
 B &= [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4]^T \\
 F_i &= [a_i k_{ij}^3 \quad b_i k_{ij}^2 \quad c_i k_{ij}]; j = 1..,4; i = f, g, r \\
 P_1 &= [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T - F_f \\
 P_2 &= [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T - (F_f + F_g \odot P_1) \\
 \hat{F} &= F_f + F_g \odot P_1 + F_r \odot P_2
 \end{aligned} \tag{6.16}$$

Donde $M \odot N$ implica el producto de Hadamard (término a término) de dos vectores Byung-Gook y Yunbeom [1998].

Finalmente, se evaluó el coeficiente de determinación R^2 . Además, para comparar los dos modelos (el aditivo y el de términos cruzados) se emplea el índice de mejora r^2 que permite evaluar el grado de mejora que aporta un modelo sobre otro (Nash y Sutcliffe [1970]), actuando como descripción cuantitativa de hasta qué punto mejora la fiabilidad del modelo añadir los términos cruzados.

6.2. Resultados y discusión

6.2.1. Producción y tratamientos de RDC

El efecto del déficit hídrico sobre la producción de fruto y la productividad del agua fueron evidentes, con ciertas diferencias significativas entre tratamientos que se pueden observar en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Efectos del RDC sobre la producción y la productividad del agua en los tres periodos de monitorización de un año.

Trats.	Riego (mm)	Riego+Lluvia (mm)	Producción kg/árbol	Reducción (%)	PA (g/L)	PAR (g/L)
Año 1						
RDC ₁	180	513	125,2 ^{bc}	18,7	8,1 ^c	23,2 ^b
RDC ₂	209	542	130,9 ^b	14,9	9,7 ^a	25,1 ^a
RDC ₃	174	507	121,9 ^c	20,8	8,0 ^c	23,3 ^b
RDC ₄	215	548	142,2 ^a	7,6	8,6 ^b	22,0 ^b
C100	311	644	153,9 ^a	-	8,0 ^c	16,5 ^c
Año 2						
RDC ₁	207	470	154,5 ^b	15,3	10,9 ^b	24,9 ^b
RDC ₂	212	475	153,2 ^b	16,0	10,8 ^b	24,1 ^b
RDC ₃	183	446	147,7 ^c	19,0	11,0 ^b	26,9 ^a
RDC ₄	215	478	169,6 ^{ab}	7,0	11,8 ^a	26,3 ^a
C100	318	581	182,4 ^a	-	10,4 ^c	19,1 ^c
Año 3						
RDC ₁	214	539	129,8 ^b	17,8	8,0 ^b	20,2 ^b
RDC ₂	219	544	121,4 ^b	23,1	7,2 ^c	18,4 ^c
RDC ₃	185	510	117,2 ^c	25,8	7,7 ^c	21,1 ^a
RDC ₄	219	544	141,3 ^a	10,5	8,6 ^a	21,5 ^a
C100	322	647	157,9 ^a	-	8,1 ^b	16,3 ^d

Las diferentes letras (*a, b, c*) indican diferencias significativas con $p < 0,05$ según el test HSD de Tukey

PA: Productividad del Agua; PAR: Productividad del Agua de Riego

Ciertos tratamientos en los que se aplicaron cantidades similares de agua de riego proporcionaron distintas respuestas productivas, lo que puede correlacionarse con la estrategia de riego seguida para cada tratamiento; tal y como se

evidencia en García-Tejero y otros [2008], mostrando la importancia del periodo fenológico en que se aplica el estrés hídrico.

En términos productivos, los mejores resultados se consiguieron con el tratamiento RDC₄, en el que se aplicó un severo estrés hídrico durante la fase de maduración: el cultivo recibió durante ese periodo un 55% de la ET_c; en cambio, durante los otros dos periodos las restricciones se limitaron a proporcionar al cultivo un 70% de la ET_c. Otros tratamientos de RDC con similares cantidades de agua aplicada mostraron respuestas productivas positivas, pero en ningún caso tan positivas como en dicho tratamiento. En este sentido, la cantidad de agua aportada al cultivo en el segundo tratamiento RDC₂, en el que se regó hasta lograr el 55% de la ET_c durante la fase de floración y el 70% en las fases de crecimiento de fruto y su maduración, fue similar al del cuarto tratamiento, pero la producción se vio considerablemente más restringida (llegando a perder un 18% de media sobre la producción del tratamiento control).

Estos resultados resaltan la importancia del periodo fenológico en el que se aplica el estrés hídrico. El tercer tratamiento RDC₃ proporcionó un ahorro de agua de aproximadamente 130 mm y una reducción de la producción del 22% con respecto al control, mientras que el RDC₁, con una media de 117 mm de ahorro de agua, alcanzó valores relativos de producción similares a los obtenidos con el RDC₂. Estos tratamientos se vieron sometidos a las mismas restricciones de riego durante los periodos fenológicos de floración y crecimiento respectivamente, pero el tratamiento RDC₂ tuvo una recuperación parcial durante la fase de maduración; esta recuperación parcial, contrariamente a lo que cabría esperar, no supuso un incremento significativo en la producción con respecto al RDC₁. Por lo tanto, el esfuerzo de riego durante la fase de maduración no puede ser considerado como especialmente significativo en comparación con las otras dos fases.

En término medio el tratamiento RDC₄ mostró una reducción del 8%, con ahorros de agua próximos a 101 mm. Es digno de reseñarse que las restricciones más severas de este tratamiento se llevaron a cabo durante la fase de maduración, lo que resulta coherente con la hipótesis anterior y resalta a su vez la importancia de las fases de floración y crecimiento en cuanto a la producción final.

El efecto global de los efectos del estrés hídrico sobre la producción están fuertemente correlacionados con los periodos fenológicos en los que se aplicó el estrés, según los resultados de González-Altozano y Castel [2000]. Por otro lado, los mismos autores en González-Altozano y Castel [2003], estudiando cí-

tricos de la variedad *Clementina de Nules* expusieron que los principales efectos del riego deficitario durante el periodo de maduración se reflejaron fundamentalmente en el tamaño del fruto, con reducciones en la producción próximas al 25 % cuando se sometió a los árboles a una restricción hídrica severa en la que sólo se cubrió el 25 % de las necesidades del cultivo en forma de ET_c ; al mismo tiempo, la producción de fruta se redujo de forma sustancial cuando se aplicó dicha restricción durante los periodos de floración y crecimiento de fruto.

Con respecto a la productividad del agua, en términos de riego y agua total aplicada, las diferencias resultaron más apreciables en la productividad del agua de riego, demostrando así la importancia de la distribución del agua de riego durante los diferentes periodos fenológicos. En término medio, el riego deficitario provocó incrementos significativos en la productividad del agua del riego, siendo los tratamientos RDI₃ y RDI₄ los que registraron mejores resultados en comparación con el tratamiento control. Esto, obviamente, se debe al mayor efecto que la restricción hídrica tuvo sobre la producción en los dos tratamientos restantes.

6.2.2. Ajuste sin términos cruzados

Una vez quedó clara la importancia de la distribución del estrés hídrico en los diferentes periodos fenológicos, se definieron diferentes funciones para estimar los resultados de la aplicación estrés hídrico en cada uno de ellos. El objetivo era lograr funciones que permitiesen estimar la pérdida de producción en función de la restricción aplicada en cada fase. Las ecuaciones 6.17 muestran los resultados de aplicar la minimización del error cuadrático medio a un modelo con funciones polinómicas cúbicas, donde f son las funciones de pérdida de producción, x_f, x_r, x_m son los índices de restricción hídrica aplicados en floración, crecimiento de fruto y maduración respectivamente calculados en relación a la ET_c . La ecuación 6.18 y la figura 6.2 muestran el vector de errores relativos E_r , la raíz del error cuadrático medio (E_{RMS}) y el coeficiente de determinación de Nash-Sutcliffe R_2 .

$$\begin{aligned} f_f(x_f) &= -0,5139x_f^3 + 1,0372x_f^2 \\ f_g(x_g) &= 0,02029x_g^3 - 0,1577x_g^2 \\ f_r(x_r) &= 0,3744x_r^3 - 0,3931x_r^2 + 0,1348x_r \end{aligned} \quad (6.17)$$

$$E_r = [-0,1108 \quad 0,1003 \quad -0,0777 \quad 0,0455]^T \rightarrow E_{RMS} = 0,0304$$

$$R^2 = 1 - \frac{F^2}{F_0^2} = 0,9959 \quad (6.18)$$

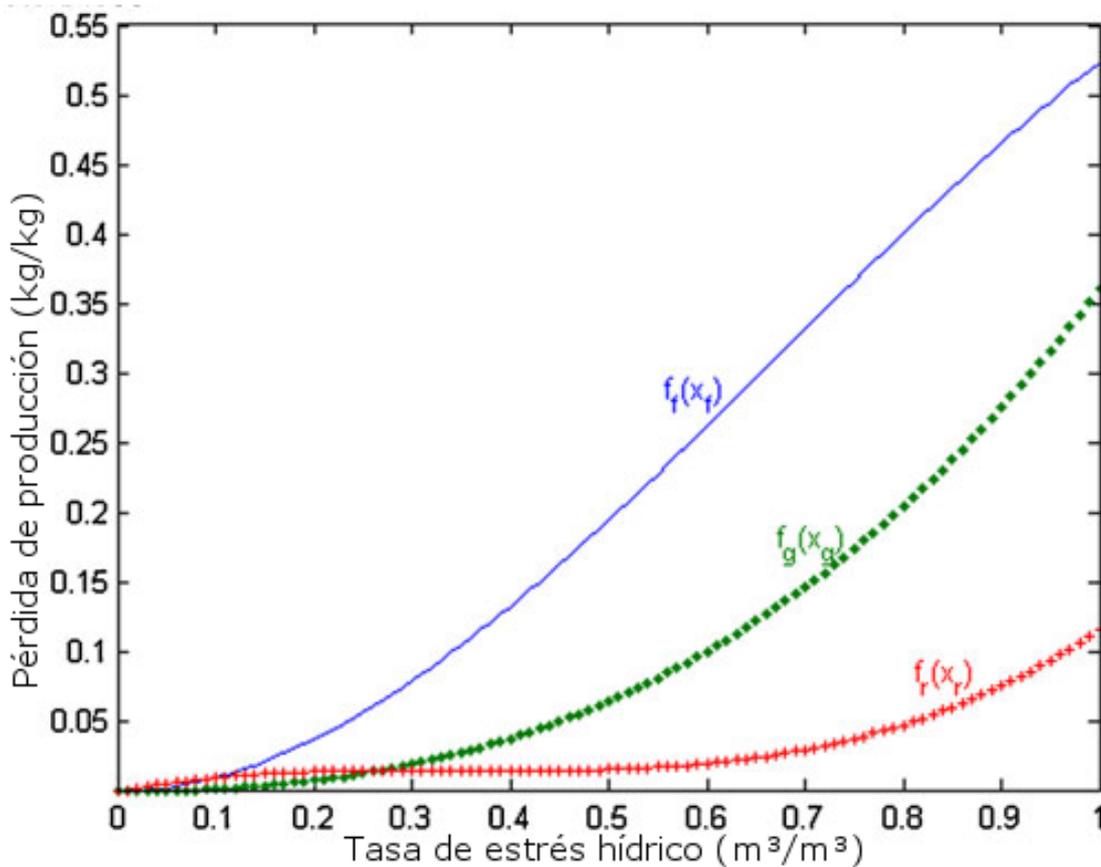


Figura 6.2: Tasa de pérdida de producción (en tanto por uno) en función del estrés hídrico aplicado, definido como la cantidad de agua aplicada dividida por la ET_c . f: fase de floración; g: fase de crecimiento del fruto; r: fase de maduración.

En lo relativo a este análisis, basta con observar la figura 6.2 para concluir que los periodos fenológicos más sensibles al efecto del estrés hídrico son la floración y el crecimiento de fruto. Una restricción del 50% en el aporte hídrico provocaría unas pérdidas de menos del 10% al ser aplicadas durante la etapa

de crecimiento de fruto y un 20% al ser aplicadas durante la fase de floración. En contraste, sería necesario llegar a una restricción casi completa (100%) del aporte hídrico durante el periodo de maduración para provocar pérdidas de producción del mismo orden (en torno a un 10%).

Las primeras funciones de productividad del agua en los cultivos se propusieron en Doorenbos y otros [1979], obteniendo relaciones lineales, en las que se asumía que el riego se aplicaba con el objetivo de conseguir satisfacer completamente la demanda hídrica del cultivo, sin considerar la posibilidad de estrategias de riego deficitario ni su efecto sobre la producción. Al mismo tiempo, tampoco observaban las diferencias en la influencia que tiene esa productividad del agua según se aplicasen distintas condiciones en diferentes periodos fenológicos. Para conseguir tener en cuenta este efecto, es necesaria la normalización de los datos tanto para la respuesta en la producción como para los distintos riegos, como se llevó a cabo en este ensayo. En este sentido, Hexem y Heady [1978] propusieron varias funciones no lineales (p.ej, cuadráticas) en las que se estudió la relación entre el agua de riego aportada y la producción del cultivo, obteniendo resultados más favorables. Martin y otros [1984] aplicaron modelos similares, obteniendo funciones altamente significativas.

6.2.3. Ajuste con términos cruzados

A la vista de los resultados anteriores, se consideró la posibilidad de añadir términos cruzados a las expresiones de las funciones de producción para la estimación de pérdidas de producción parciales y totales.

Cuando se aplica una restricción hídrica en una o varias fases fenológicas, es una hipótesis razonable que el estrés hídrico aplicado en dos fases diferentes tenga mayor efecto que aplicarlo por separado. Sin embargo, si se induce estrés hídrico en una fase se reduce la producción, por lo que inducir estrés en fases posteriores no tendría efecto alguno sobre la parte de la producción que ya se perdió en la fase anterior. Es por eso que a la hora de determinar las funciones de pérdida de producción, se asumió que los términos cruzados tienen un efecto negativo sobre la pérdida de producción (esto es, un efecto positivo sobre la producción) que se produciría si tan sólo se suman los dos términos, tal y como se muestra en las ecuaciones 6.11 y 6.12.

De acuerdo con el análisis en términos cruzados, estos resultados son consistentes con la influencia en las distintas fases, en las que la fase de maduración es la menos sensible al estrés, como se muestra en la figura 6.3.

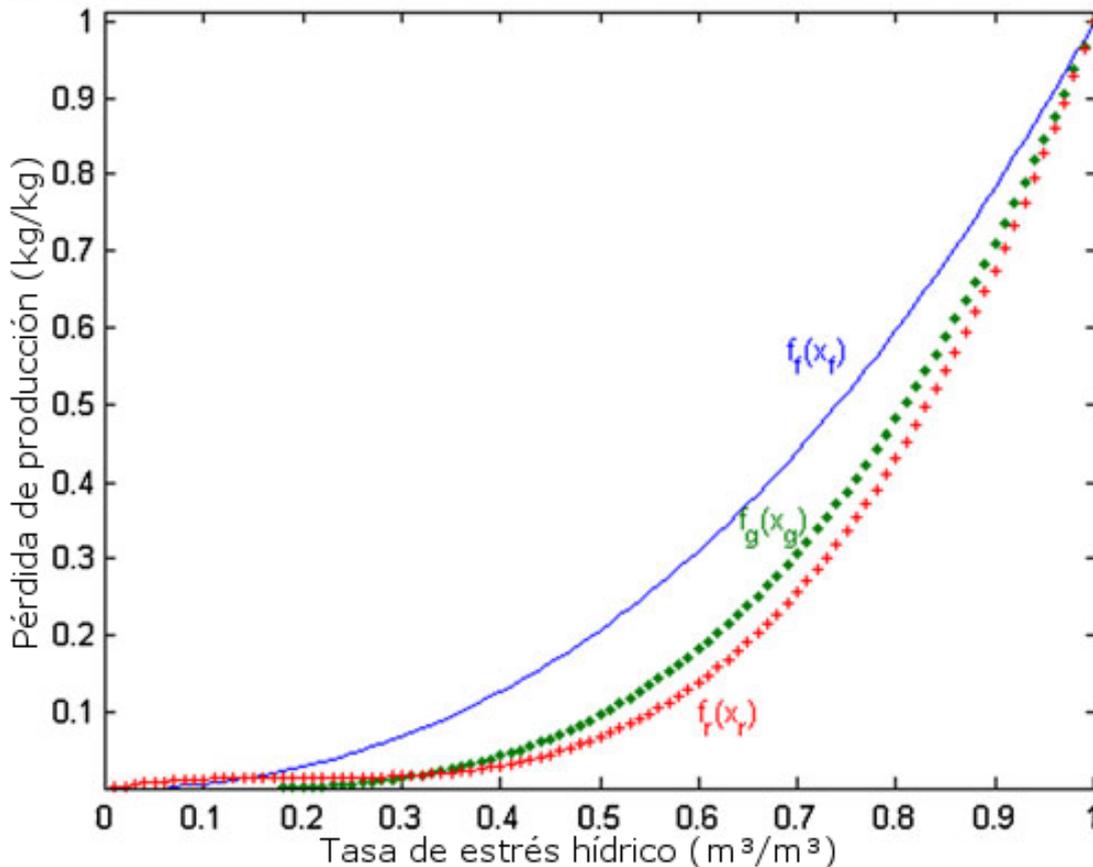


Figura 6.3: Componentes por separado de la pérdida de producción en función del estrés hídrico, definido como la relación entre el agua suministrada en un periodo fenológico y la ET_c . f, g, r representan respectivamente las fases de floración, crecimiento del fruto y maduración.

Finalmente, considerando la suma de los términos globales, la expresión final y el error vienen definidos por las ecuaciones 6.19 y 6.20 respectivamente, donde f es la función de pérdida de producción; x_f, x_g, x_r son las restricciones hídricas en relación con la ET_c ; E_r es el vector de errores relativos; E_{RMS} la raíz del error cuadrático medio; y R^2 es el coeficiente de determinación de Nash-Sutcliffe.

$$\begin{aligned}
f(\vec{x}) &= f_f(x_f) + f_g(x_g) + f_r(x_r) - f_f(x_f)f_r(x_r) - f_f(x_f)f_g(x_g) - f_g(x_g)f_r(x_r) + \\
&\quad + f_f(x_f)f_g(x_f)f_r(x_r) \\
f_f(x_f) &= 0,3404x_f^3 + 0,6596x_f^2 \\
f_g(x_g) &= 1,2658x_g^3 - 0,2848x_g^2 + 0,019x_g \\
f_r(x_r) &= 1,9144x_r^3 - 1,1411x_r^2 + 0,2267x_r
\end{aligned} \tag{6.19}$$

$$\begin{aligned}
E_r &= [0,0707 \quad 0,0583 \quad 0,0381 \quad 0,0253]^T \rightarrow E_{RMS} = 0,0105 \\
R^2 &= 1 - \frac{F^2}{F_0^2} = 0,9995
\end{aligned} \tag{6.20}$$

Una vez definidos los dos modelos, el aditivo simple y el de términos cruzados, se pudo comparar la mejora que supuso el segundo frente al primero (que tiene la ventaja de su mayor sencillez) mediante el índice de mejora de Nash-Sutcliffe, concluyendo que el segundo modelo mejora al primero en un 87%.

$$r^2 = \frac{R_2^2 - R_1^2}{1 - R_1^2} = 0,87 \tag{6.21}$$

La figura 6.4 muestra el efecto de aplicar un estrés hídrico en varios periodos fenológicos. Teniendo en cuenta estos resultados, se observa que cuando el estrés se aplica durante las etapas de floración y crecimiento, las pérdidas en la producción son particularmente significativas, lo que convierte a estos periodos fenológicos en los más determinantes a efectos de producción, especialmente el primero de ellos.

A lo largo de toda esta sección, se ha estado trabajando con funciones de producción polinómicas de grado 3. Sin embargo, no se ha justificado la elección de este tipo concreto de función.

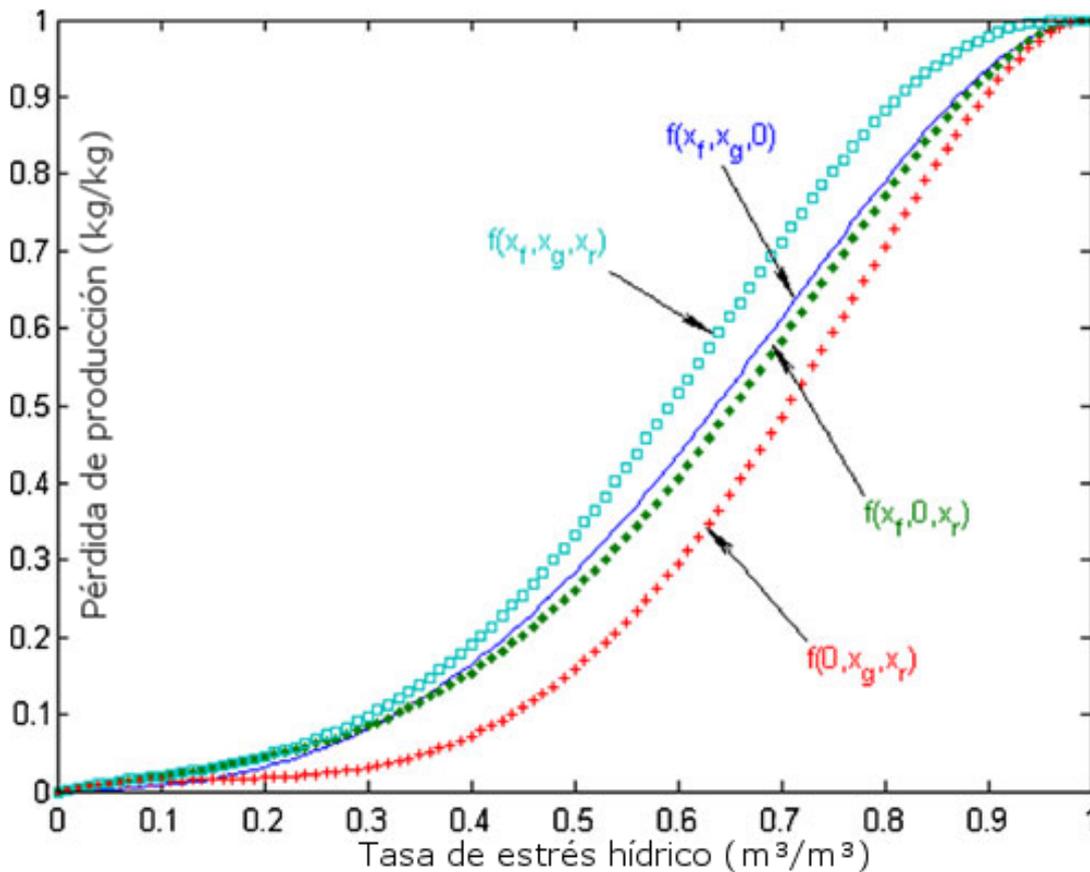


Figura 6.4: Efecto de aplicar estrés hídrico en diferentes fases sobre la tasa de pérdida de producción. Dicho estrés se define como la relación entre el agua suministrada en un periodo fenológico y la ET_c . f, g, r representan respectivamente las fases de floración, crecimiento del fruto y maduración.

El motivo de la elección de funciones polinómicas es simple: su sencillez. Sin embargo, la elección del grado no es trivial: cuanto mayor sea el grado, más grados de libertad tendrá nuestro modelo, y por lo tanto mayores posibilidades existirán de provocar un una solución excesivamente vinculada a este modelo. Hubiera sido deseable un grado menor, pero con un grado mayor se hubiera alcanzado mayor fiabilidad en el modelo. Hay que tener en cuenta, además, que el número de puntos de muestra con los que se trabaja en el experimento es limitado, por lo que es deseable evitar una dependencia excesiva con respecto de esos puntos en el problema.

La tabla 6.3 muestra los resultados de repetir estos cálculos con funciones polinómicas de grado 2 y grado 4.

Tabla 6.3: Errores e índices de eficiencia para modelos con funciones polinómicas de distintos grados.

Grado de las funciones		2	3	4
Sin términos cruzados	E_{RMS}	0,0597	0,0304	0,0171
	R^2	0,7922	0,9959	0,9988
Con términos cruzados	E_{RMS}	0,0105	0,0105	0,0029
	R^2	0,8098	0,9995	1
	r^2	0,0847	0,8700	1

E_{RMS} : raíz del error cuadrático medio

R^2 : coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe

r^2 : índice de mejora del modelo con términos cruzados

A la vista de los resultados de la tabla:

1. Las funciones de grado 2 proporcionaron unos resultados con bajo índice de eficiencia ($R^2 = 0,80$). Los términos cruzados sólo tuvieron un efecto marginal a la hora de mejorar esa eficiencia ($r^2 = 0,0847$).
2. Las funciones de grado 3 redujeron a la mitad el error RMS y proporcionaron un índice de eficiencia próximo a la unidad. La adición de los términos cruzados mejoró aún más esa eficiencia ($r^2 = 0,87$).
3. Las funciones de grado 4 redujeron el error RMS a la mitad una vez más llegando a una eficiencia igual a la unidad al producirse el añadido de los términos cruzados.

El grado 4 sería óptimo pero el grado 3 es, incluso desde el punto de vista más exigente, *suficientemente* bueno y reduce las posibilidades de un exceso de condicionamiento del problema. Por eso se escoge el grado 3.

La tabla 6.4 muestra los resultados esperados según el modelo con términos cruzados con funciones de grado 3 y los resultados obtenidos en el ensayo. Se puede observar que las diferencias entre ambos son pequeñas, entre $-0,05$ y $0,04$ de reducción de producción.

Estos resultados, que pueden observarse gráficamente en la figura 6.5, sugieren que el modelo con funciones de grado 3 tiene suficiente precisión como

Tabla 6.4: Tasas de pérdida de producción (kg/kg) medidas (med.) y previstas (prev.) con respecto a la producción del tratamiento control según tratamiento y año.

Tratam.	Campaña 1			Campaña 2			Campaña 3		
	Med.	Prev.	Error	Med.	Prev.	Error	Med.	Prev.	Error
RDC ₁	0,19	0,21	0,02	0,15	0,19	0,04	0,18	0,20	0,02
RDC ₂	0,15	0,19	0,04	0,16	0,17	0,01	0,23	0,18	-0,05
RDC ₃	0,21	0,23	0,02	0,19	0,21	0,02	0,26	0,22	-0,04
RDC ₄	0,08	0,11	0,03	0,07	0,11	0,04	0,11	0,12	0,01
RDC ₄	0,21	0,23	0,02	0,19	0,21	0,02	0,26	0,22	-0,04

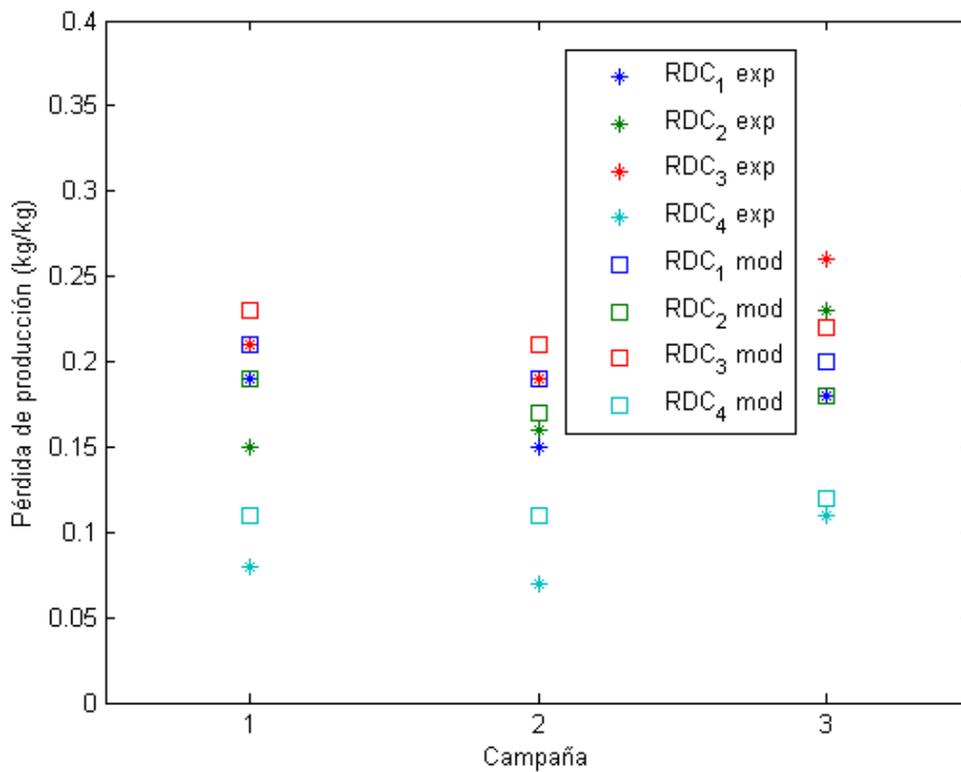


Figura 6.5: Comparación gráfica entre los resultados del modelo (mod) y los experimentales (exp) para los cuatro tratamientos a lo largo de tres campañas.

para estimar una pérdida de producción cuando el estrés hídrico es aplicado durante dos o más periodos fenológicos.

Se han definido diferentes factores de respuesta del cultivo K_y según la metodología propuesta por varios autores: Stewart y Hagan [1973], Azaiez [2008], Houndari y Azaiez [2001]. Sin embargo, Stewart y Hagan [1973] mostraron diferentes relaciones entre producción y evapotranspiración del cultivo, desarrollando una ecuación multiplicativa para la producción del cultivo en función del agua de riego aplicada.

Por otro lado, Hexem y Heady [1978] definieron una ecuación general para definir las funciones de producción del agua como polinomios de tercer orden. Kipkorir y otros [2002] encontraron un ajuste significativo con polinomios de segundo y tercer orden para cultivos de cebollas y maíz respectivamente.

En este sentido, en Severini y Cortignani [2008] se propone un modelo de programación matemática positiva para estudiar la viabilidad de las estrategias de riego deficitario, exponiendo que esas técnicas describen de forma eficaz el impacto negativo de la limitación de la disponibilidad de agua en los resultados económicos de explotaciones agrícolas. Además, en Azaiez [2008] se desarrolla un modelo integral de programación dinámica para analizar los efectos del riego deficitario para incrementar el área regada a costa de reducir la producción por unidad de superficie, considerando que los efectos del riego deficitario están fuertemente correlacionados con la cantidad de agua aplicada para cada periodo fenológico.

6.3. Conclusiones

Cuando se aplica déficit hídrico en una fase determinada, la respuesta del cultivo depende tanto de la magnitud de ese estrés como de su duración. Estos efectos son fuertemente dependientes del cultivo, tanto en especie como en variedad: la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico varía, incluso la importancia de cada periodo fenológico -que es el principal objeto de este ensayo-.

Generalmente, los efectos de la escasez de agua en diferentes periodos interaccionan entre sí de forma compleja, aunque en la mayoría de los casos se pueden introducir simplificaciones mediante la hipótesis de que los efectos del estrés son independientes para cada periodo. En consecuencia, los efectos combinados del estrés hídrico a lo largo de varios periodos se tienden a evaluar considerando esos efectos como aditivos o multiplicativos; dichos modelos re-

quieren calibración local, como se indica en Rao y otros [1988], dado que esas funciones de producción son específicas del ensayo.

En un contexto de escasez de agua, estrategias de riego deficitario pueden resultar clave en posibles futuros escenarios de escasez de agua, dado que podrían permitir la supervivencia de agro-ecosistemas en condiciones limitadas.

Funciones como las obtenidas en el presente capítulo mejoran nuestro conocimiento respecto a la relación entre el estrés hídrico y la producción de cítricos, y por lo tanto sobre sus implicaciones a la hora de buscar una gestión sostenible de los recursos hídricos disponibles. Según los resultados del estudio, el nuevo modelo propuesto para explicar el efecto combinado del riego deficitario en varios periodos sería un modelo híbrido aditivo-multiplicativo, considerando que el efecto del estrés hídrico en periodos anteriores determina el efecto que tendrá el mismo estrés sobre periodos posteriores. Nuestros modelos indican que la función de productividad del agua para el cultivo sometido a estrategias de riego deficitario tendría una relación cuasi-lineal para déficits hídricos por debajo del 40% de la ET_c .

Concluimos que los modelos multiplicativos considerando la adición de términos cruzados son aplicables en un rango amplio de condiciones de estrés, especialmente cuando se aplica estrés hídrico en dos o más periodos fenológicos. Simultáneamente, los modelos simples sin considerar esos términos cruzados pueden ser válidos cuando sólo se aplica el estrés en uno de los periodos. Asimismo, analizando la relación entre el estrés hídrico y la pérdida de producción, deducimos que los periodos de floración y crecimiento de fruto (especialmente el primero de ellos) son más sensibles al riego deficitario que el periodo de maduración. De este modo, los modelos desarrollados pueden ser considerados como un paso previo para conseguir una gestión más sostenible y precisa de los recursos hídricos bajo estrategias de riego deficitario en cítricos, especialmente en situaciones de escasez de agua, que son cada vez más frecuentes en zonas áridas y semi-áridas como el sur de España.

Capítulo 7

Planificación de una estrategia de riego deficitario en cítricos a medio y largo plazo

7.1. Introducción

Como se ha visto, es posible crear una serie de modelos matemáticos para prever la respuesta productiva del cultivo a diferentes grados de estrés hídrico gracias a las funciones de productividad del agua en el cultivo o CWPF. El mero hecho de mejorar nuestro conocimiento acerca de la fisiología del cultivo ya es más que suficiente justificación para emprender la tarea de elaborar esos modelos, pero eso no significa que debamos detenernos ahí. El empleo de técnicas de control y de optimización nos permitiría optimizar los recursos hídricos disponibles, maximizando así la producción y los beneficios.

En primer lugar, es preciso afrontar el primer y principal problema de un agricultor que desarrolle su actividad en una zona de clima árido o semi-árido en lo referente al riego: las restricciones. De acuerdo con las observaciones meteorológicas disponibles, se puede esperar significativos incrementos en las

temperaturas globales y descensos en las precipitaciones, lo que provocará de forma inmediata una reducción de la disponibilidad de recursos hídricos (Turrall y otros [2011]).

Dado que el 70% del agua dulce disponible del mundo se consume en la agricultura (WWAP2009 [2009]), será la agricultura la primera en sufrir esta reducción en forma de restricciones al riego. Ni que decir tiene que la perspectiva de poder ofrecer a los agricultores un calendario detallado con recomendaciones sobre cuándo y cómo aplicar esas restricciones tiene un valor económico inmediato.

El siguiente paso es más ambicioso: si anteriormente se ofrecía al agricultor una respuesta a un problema inmediato (las restricciones), a continuación se plantea una forma de ayudarlo a anticiparse a la restricción. Si fuera posible prever que a lo largo de los próximos años la disponibilidad de agua para el riego fuera a reducirse paulatinamente, se podría aprovechar el conocimiento que adquirido acerca de los efectos del riego deficitario a largo plazo en cítricos para planificar un calendario anual de riegos que permita adaptar el cultivo a la previsible nueva situación de forma que el inevitable efecto negativo sobre el cultivo y su producción sea el menor posible.

En este sentido, el modelo basado en los efectos a largo plazo tomaba como punto de partida la observación de un efecto oscilante de las restricciones hídricas sobre la producción; sin embargo, en nuestro modelo este efecto oscilante se veía complementado con una pendiente creciente. Según Kozlowski y Pallardy [2002], los cultivos arbóreos que han sido expuestos con anterioridad a un estrés hídrico frecuente tienden a sufrir menores efectos en sequías posteriores. En Bréda y otros [2006] se estudia el efecto que provocaban las sequías severas sobre cultivos arbóreos silvestres (bosques) a largo plazo, y concluyó que si bien las sequías extremas podían provocar daños irreversibles y con frecuencia fatales en el cultivo, niveles de estrés hídrico moderados permitían a los árboles adaptarse a las nuevas condiciones y encontrar la estabilidad en ellas. Dickson y Tomlinson [1996] estudiaron la forma en la que las hojas, tallos y raíces se adaptan en el caso de los robles para evitar los efectos de la sequía mientras sea posible y cómo actúan para paliar dichos efectos cuando son inevitables.

Es por eso que parece necesario adaptar el modelo anterior a estas propiedades de los cultivos arbóreos, buscando una estabilidad a largo plazo. La figura 7.1 muestra la comparación de las curvas de adaptación a un estrés hídrico muy leve, del 10% constante a lo largo de diez años, siguiendo dos modelos: el primero de ellos es el ya visto, en el que los efectos del estrés siguen creciendo a

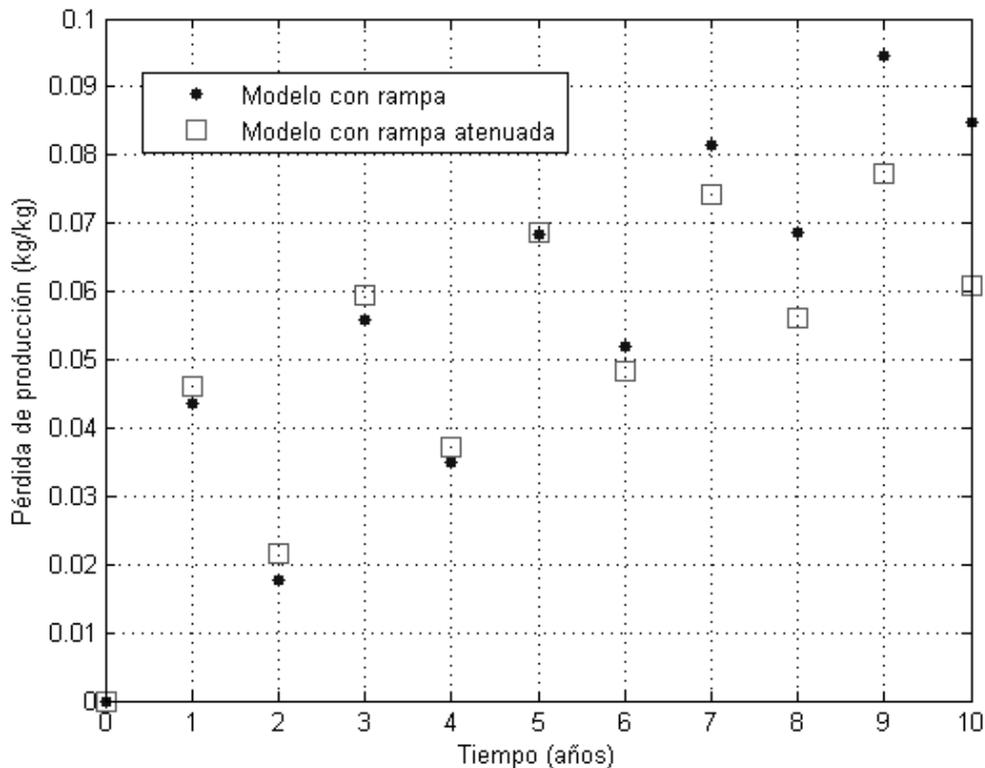


Figura 7.1: Dos modelos diferentes para la pérdida de producción a largo plazo para un estrés hídrico del 10%.

lo largo del tiempo con una función rampa; el segundo modelo tiene esa rampa atenuada por la exponencial negativa, lo que implica que a largo plazo el efecto creciente de la rampa queda anulado. Puede verse cómo en el modelo original, incluso con un nivel de estrés tan leve como el 10%, la pérdida de la producción -si bien se observa un comportamiento oscilante en ella- sigue creciendo indefinidamente, mientras que en el segundo modelo parece estabilizarse en torno a una pérdida de producción del 6%.

En este capítulo se trabajará en la búsqueda de técnicas que permitan la planificación del riego a medio y largo plazo. En primer lugar, a partir del modelo de planificación de riego deficitario en cultivo de cítricos en función del periodo fenológico, se planteará una planificación óptima.

Finalmente, se buscará aunar ambas estrategias para aprovechar nuestro conocimiento de la productividad del agua a corto plazo para mejorar la respuesta

del cultivo a largo plazo. Esto puede presentar ciertas complicaciones en tanto en cuanto los modelos obtenidos para la planificación en una campaña se obtuvieron a partir de ensayos de Riego Deficitario Controlado y los obtenidos para la planificación a largo plazo se obtuvieron a partir de ensayos con Riego Deficitario Sostenido.

7.2. Material y métodos

7.2.1. Planificación a largo plazo

Tal y como vimos en el apartado 7.1, el modelo obtenido anteriormente no resulta útil en tanto en cuanto no se pueden planificar unas restricciones a largo plazo si la conclusión inevitable de esas restricciones es la muerte de la planta. Además, por los argumentos ya expuestos, resulta razonable pensar que el árbol, organismo vivo, puede adaptarse a las nuevas condiciones climatológicas reduciendo sus necesidades (y con ellas, su producción frutícola).

El nuevo modelo propuesto, por consiguiente, sigue una ley muy similar al anterior, como puede verse en la ecuación 7.1: un modelo en variables separables x y t donde la función $g_1(x)$ es un polinomio de segundo grado y $g_2(t)$ incluye un coseno atenuado con una exponencial negativa; la diferencia es que en este caso no existe componente de rampa.

$$\begin{aligned}
 L(x, t) &= g_1(x)g_2(t) \\
 g_1(x) &= a_1x^2 + a_2x + a_3 \\
 g_2(t) &= b_1 + e^{-t/\tau} [b_3\cos(\omega t) + b_2]
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

Igual que en el modelo original, hay que establecer una serie de condiciones de contorno: se asume que no se produce pérdida de producción en el momento de inicio del experimento o si el estrés es nulo. Además, se establece que la pérdida de producción en régimen permanente tiene un valor de 1 cuando la restricción es absoluta; este valor actuará como máximo de pérdida de la producción.

$$\begin{aligned}
L(x=0, t) &= 0, \forall t \rightarrow a_3 = 0 \\
L(x, t=0) &= 0, \forall x \rightarrow b_1 + b_2 + b_3 = 0 \rightarrow b_2 = -b_3 - b_1 \\
\lim_{t \rightarrow \infty} L(x, t) &= L_{r.p.}(x) = g_1(x)b_1 \rightarrow L_{rp}(x=1) = 1 \rightarrow b_1 = \frac{1}{a_1 + a_2}
\end{aligned} \tag{7.2}$$

Además, como las medidas se realizan año a año, tiene sentido postular que los extremos locales (mínimos y máximos debido a la componentes oscilatoria) se encuentren en $t = k, \omega = \pi + 2n\pi, k \in \mathbb{Z}$.

Llevadas estas condiciones a 7.1, se obtiene la expresión de la ecuación 7.3.

$$L(x, t) = (a_1 x^2 + a_2 x) \left\{ \frac{1}{a_1 + a_2} + e^{-t/\tau} \left[b_3 \cos(\pi t) - b_3 - \frac{1}{a_1 + a_2} \right] \right\} \tag{7.3}$$

Considerando que la función fue creada para estimar la pérdida de producción durante un año, no tiene sentido evaluar la función $L(x, t)$ en tiempo continuo. Llevando a cabo un muestreo con $t = 1$ año, se llega a la ecuación 7.4.

$$L(x, k) = (a_1 x^2 + a_2 x) \left\{ \frac{1}{a_1 + a_2} + e^{-k/\tau} \left[b_3 (-1)^k - b_3 - \frac{1}{a_1 + a_2} \right] \right\}, k \in \mathbb{Z} \tag{7.4}$$

Esta función permite estimar la pérdida de fruto en un año k cuando se aplica el mismo nivel de estrés en los anteriores $(k-1)$ años. Sin embargo, esto hace imposible predecir el resultado de variar el nivel de estrés hídrico. Para resolver este problema, es preciso transformar esta ecuación general en una ley de recurrencia, donde la pérdida en el año n sea una función de las pérdidas en años anteriores.

Este paso no es inmediato. Al no tratarse de un sistema lineal e invariante en el tiempo, no tiene sentido emplear la transformada Z . La forma más simple, tal y como se hizo en el capítulo 5, es trabajar con la hipótesis de baja variación de $g_1(x)$. Por ejemplo, si asumimos que $g_1(x_k) \approx g_1(x_{k-2})$, se puede poner la

ecuación tal y como se muestra en 7.5. Por ello, decimos que estamos tomando la hipótesis de bajas variaciones en el estrés hídrico, hipótesis que habrá que confirmar más adelante.

$$\begin{aligned}
 L(x, k) &= (a_1 x^2 + a_2 x) \left\{ \frac{1}{a_1 + a_2} + e^{-k/\tau} \left[b_3 (-1)^k - b_3 - \frac{1}{a_1 + a_2} \right] \right\} \\
 L(x, k-2) &= (a_1 x^2 + a_2 x) \left\{ \frac{1}{a_1 + a_2} + e^{2/\tau} e^{-k/\tau} \left[b_3 (-1)^k - b_3 - \frac{1}{a_1 + a_2} \right] \right\} \quad (7.5) \\
 L(x, k) - e^{-2/\tau} L(x, k-2) &= g_1(x) \left[\frac{1}{a_1 + a_2} (1 - e^{-2/\tau}) \right]
 \end{aligned}$$

Comoquiera que $L(x, k) = g_1(x)g_2(t)$, la hipótesis de que el término de $g_1(x)$ tiene una variación muy pequeña en términos alternos nos permite dividir la expresión final de la ecuación 7.5 por dicho término de modo que se obtiene la ley de recurrencia que se muestra en la ecuación 7.6, donde $p = e^{-1/\tau}$.

$$g_2(k) - p^2 g_2(k-2) = \frac{1 - p^2}{a_1 + a_2} \quad (7.6)$$

Se ha conseguido una ecuación en diferencias (Greene y Knuth [2008]) donde las condiciones iniciales vienen dadas por las expresiones 7.7.

$$\begin{aligned}
 g_2(k \leq 0) &= 0 \\
 g_2(k = 1) &= \frac{1}{a_1 + a_2} + p \left(-2b_3 - \frac{1}{a_1 + a_2} \right) \\
 g_2(k = 2) &= \frac{1}{a_1 + a_2} + p^2 \left(-\frac{1}{a_1 + a_2} \right)
 \end{aligned} \quad (7.7)$$

Esta expresión puede pasarse al dominio de la transformada Z, quedando en la forma mostrada en la ecuación 7.8. La salida del sistema $G_2(z)$ son las

pérdidas de producción, la entrada el resultado de aplicar el bloque no lineal G_1 a la restricción hídrica, siempre bajo la hipótesis de baja variación.

$$G_2(z) = \frac{1 - p^2}{(a_1 + a_2)(1 - p^2 z^{-2})} = \frac{L(x, k)}{G_1(x)} \quad (7.8)$$

El sistema tiene sendos polos en $z = \pm p$, esto es, según Ogata [1996] el sistema tiene una zona de convergencia z.o.c. de $|p| < 1 \Rightarrow \tau > 0$.

Una vez obtenido el modelo, el siguiente paso del problema es la determinación de la estrategia de riego deficitario a escoger, esto es, el nivel de estrés hídrico a aplicar año a año para minimizar el impacto sobre la producción global.

Diseño de un controlador PID discreto

La figura 7.2 muestra un diseño básico de control con realimentación del error en el que el sistema en tiempo discreto $G(z)$, de una entrada y una salida (SISO), viene regulado por un controlador $C(z)$ que actúa sobre el error entre una señal de referencia $R(z)$, que es la salida deseada, y la señal de salida del sistema $Y(z)$.

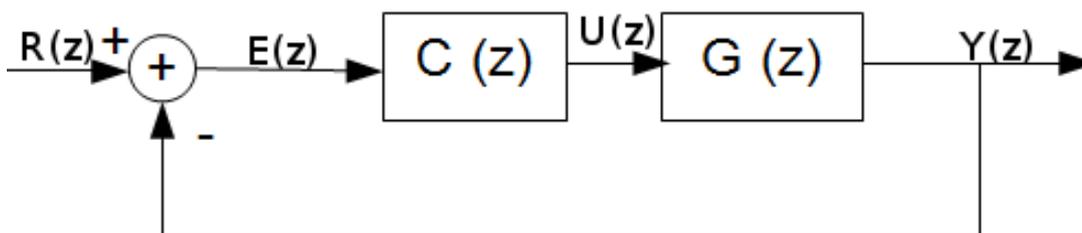


Figura 7.2: Diagrama de bloques básico de un sistema con control por realimentación del error.

Si tuviéramos un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI), cuya entrada fuera la variable x , podríamos diseñar un controlador $C(z)$ que actuara sobre el error y determinara la entrada adecuada para el sistema.

Sin embargo, no es el caso: tal y como se puede ver en la ecuación 7.4, el sistema no depende linealmente de x . Sólo gracias a la hipótesis de baja variación en el índice de estrés hídrico pudimos calcular una expresión para en variables separables, $G(x, z) = G_1(x)G_2(z)$.

La figura 7.3 muestra la técnica empleada para la construcción del controlador. $G_1(x)$ es una función no lineal estática; sin embargo, es fácil de invertir, calculando $G_1^{-1}(x)$. Puesto que $G = G_1(x)G_2(z)$, diseñamos un controlador $C = C_2(z)C_1(x)$, donde $C_1(x)$ es, precisamente, esa inversión de la no linealidad. En el segundo diagrama puede verse cómo $G_1^{-1}(x)$ y $G_1(x)$ se contrarrestan, dejando en el tercer diagrama el diseño básico de un controlador para un sistema SISO LTI.

El bloque funcional $G_1^{-1}(x)$ es tan simple como despejar el valor de x en la expresión $g_1(x)$, tal y como se hace en la ecuación 7.9.

$$\begin{aligned}
 g_1(x) &= a_1x^2 + a_2x \rightarrow a_1x^2 + a_2x - g_1 = 0 \\
 x &= \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1g_1}}{2a_1} \\
 x > 0 &\rightarrow x = \frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 + 3g_1a_1}}{2a_1}
 \end{aligned} \tag{7.9}$$

Para el diseño del controlador $G_2(z)$, siguiendo a Ogata [1996], se escogerá un controlador PID discreto, cuya expresión puede verse en la ecuación 7.10, donde $T_s = 1$ es el tiempo de muestreo.

$$C_2(z) = K \frac{(1 + a\frac{z-1}{T_s})(1 + b\frac{z-1}{T_s})}{\frac{z-1}{T_s}(1 + \frac{z-1}{T_s})} \tag{7.10}$$

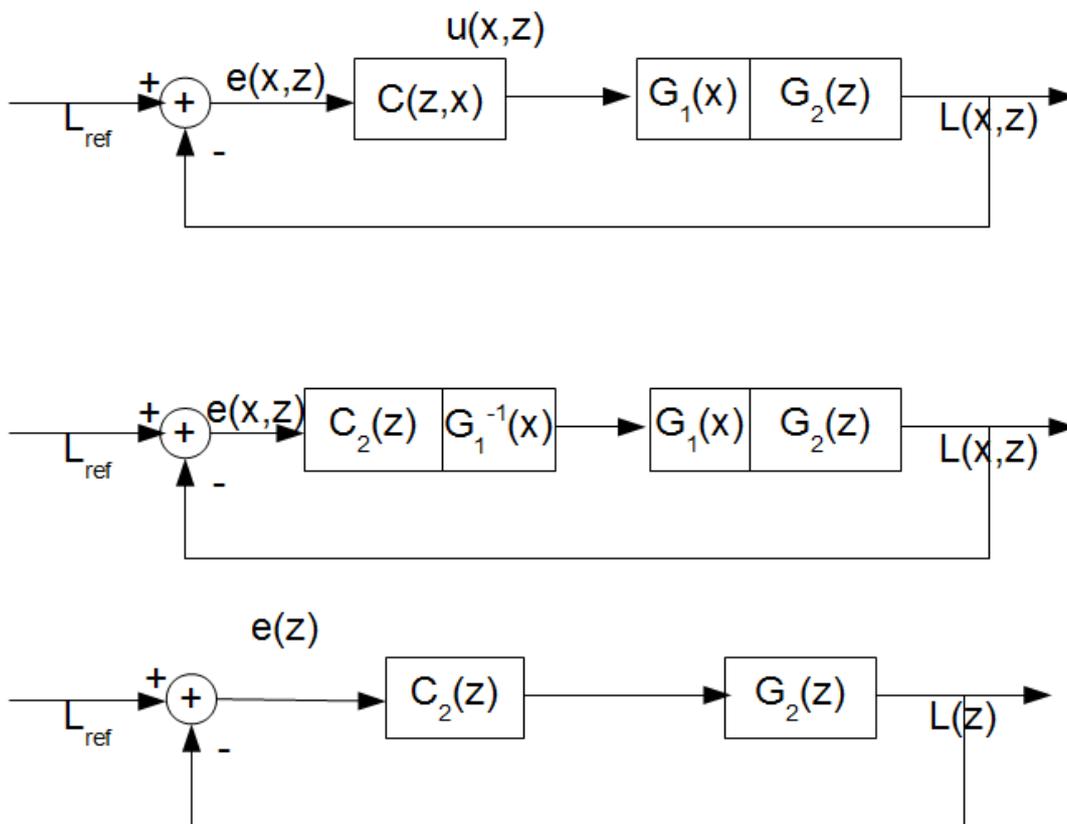


Figura 7.3: Diseño del controlador en tiempo discreto.

Sustituyendo y descomponiendo, y considerando que $C_2(z) = \frac{U(z)}{E(z)}$, donde $U(z)$ es la señal de control y $E(z)$ el error en la referencia, se obtiene la expresión de la ecuación 7.11.

$$U(z) = Kab \frac{1 + \left(\frac{1-b}{b} + \frac{1-a}{a}\right)z^{-1} + \frac{(1-b)(1-a)}{ba}}{1 - z^{-1}} E(z) \quad (7.11)$$

Lo que lleva, haciendo la transformada Z inversa, a la ecuación en diferencias 7.12.

$$u(k) = u(k-1) + kab \left[e(k) + \left(\frac{1-b}{b} + \frac{1-a}{a} \right) e(k-1) + \frac{(1-b)(1-a)}{ba} e(k-2) \right] \quad (7.12)$$

Una vez determinado el modelo y decidido el controlador a utilizar, llega el momento de sintonizar ese controlador; esto es, de escoger sus parámetros. En el caso del PID discreto se necesitan tres parámetros: K , a y b .

A lo largo de los seis años del ensayo, es posible definir un precio medio del fruto (descontando la inflación), P_f (€/kg). Conociendo el peso medio recolectado por hectárea P_h (kg/ha) y definiendo un coste medio del agua de riego por hectárea, incluyendo el gasto energético necesario para el regadío (bombeo, regulación, etc), C_a (€/ha), dado que se conoce la relación entre la pérdida de producción y el estrés hídrico, se puede definir un funcional de costes con un horizonte temporal de N años en la ecuación 7.13

$$F(\vec{x}, n) = \sum_{k=1}^n [P_f P_h L(x_k, k) - x_k C_a] (1+R)^{n-k} \quad (7.13)$$

Donde R se define como la tasa interna de rentabilidad (T.I.R.) de la explotación agrícola descontando la inflación. De este modo, y mediante la minimización del funcional de costes, es posible determinar una estrategia óptima de riego deficitario: el problema reside en diseñar dicha estrategia estabilizando el sistema en un horizonte temporal de n años minimizando al mismo tiempo la ecuación 7.13. Por simplicidad, se tomará un TIR nulo, lo que equivale a decir que la rentabilidad de la explotación iguala a la inflación.

El primer paso es escoger la referencia, esto es, el punto de la función de pérdida de producción $L(x, k)$ en el que se desea que se alcance la estabilidad. Partiendo de la ecuación 7.4, si calculamos el límite en el tiempo infinito, se obtiene la ecuación 7.14.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} L(x, k) = -b_3 g_1(x_\infty) = \frac{g_1(x_\infty)}{a_1 + a_2} = \frac{a_1 x_\infty^2 + a_2 x_\infty}{a_1 + a_2} \quad (7.14)$$

Si se prevé que en el plazo de N años la disponibilidad hídrica bajará un $x\%$ debido a las restricciones, es posible diseñar un controlador que estabilice la señal en ese nivel en N años minimizando el funcional de costes. Para ello, se empleó un algoritmo de minimización y el software matemático Matlab®(The Mathworks Inc., Natick, Ma., EE.UU.).

Como punto de partida para el controlador, se empleó la técnica de autoajuste PID de Matlab®por búsqueda de parámetros, concretamente buscando la minimización del error integral absoluto. A continuación, se empleó el algoritmo de la región de confianza (Sorensen [1982]) para encontrar los parámetros del PID que minimizan el funcional de costes.

Al llevar a cabo todos estos cálculos, se ha perdido de vista un hecho fundamental: el tiempo de muestreo es de un año. Es decir, existe suficiente tiempo para tomar las decisiones sin necesidad de acudir a las técnicas empleadas hasta ahora. Eso plantea un posible enfoque distinto, llevando a cabo un proceso de optimización mediante algoritmos de búsqueda de soluciones óptimas, como por ejemplo:

1. Definir $X_0 = x_{ref} \cdot [1 \quad 1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]$
2. Calcular las pérdidas $L(X_0)$ que provoca la secuencia de déficits hídricos X_0 .
3. Crear vector X restando porcentajes de un año y sumándolos en otro de forma aleatoria.
4. Calcular $L(X)$. Si $L(X) < L(X_0) \implies X_0 \leftarrow X; L(X_0) \leftarrow L(X)$
5. Volver a (3).

Evidentemente esta secuencia es un bucle infinito, para romperlo se introduce una condición de salida; si tras N iteraciones no se ha conseguido una mejora mayor que cierto umbral, se considera que se ha alcanzado el nivel óptimo y se sale del programa.

Este sistema de búsqueda de parámetros tiene la ventaja de mantener un ahorro medio de agua constante, mientras que en el diseño del controlador PID autoajustado no se tiene en cuenta esa limitación, ni la restricción de que $x \in [0, 1]$.

7.2.2. Planificación a medio plazo

Con el modelo aportado en 6, se puede calcular el efecto sobre la producción de la distribución del estrés hídrico. El siguiente paso es crear una función que minimice la pérdida de la producción distribuyendo ese estrés de forma óptima.

Para ello hay multitud de herramientas informáticas, el uso de algunas de las cuales ya ha sido presentado en este trabajo. Sin embargo, eso es sólo la mitad del problema; la otra mitad es que esas herramientas han de estar disponibles para el agricultor y ser fáciles de emplear. Se ha de crear una interfaz de usuario simple de manejar y atractiva al mismo tiempo.

Una posible solución es crear una aplicación móvil para *smartphones*: en pleno auge de dicho producto, parece casi obligatorio que todo se haga en ese formato. Sin embargo, no todo son ventajas: el coste de su producción no es trivial, los conocimientos de programación necesarios tampoco y además hay que tener en cuenta la barrera de entrada para el desarrollador que supone tener que programar para (al menos) las dos plataformas más empleadas, con sistemas operativos distintos, lenguajes de programación diferentes y canales de distribución propios. Y aún así, no es sencillo llegar a toda la población: según Urueña y otros [2013], el 53,7% de los españoles poseía un *smartphone* en 2013. Ahora bien, según el mismo informe, casi un 70% de la población tenía acceso a internet en el hogar y el 74,3% de los encuestados tuvo acceso a él, bien en el hogar o fuera de él.

Por ello, emplear una herramienta online tiene sentido para llegar a la mayor cantidad de público posible. Para ello, es necesario una aplicación web o *webapp*. Existen multitud de plataformas de desarrollo para ellas, pero una de las más simples y populares es la programación en PHP (PHP: Hypertext Processor, Schlossnagle [2004]). Una gran ventaja de esta plataforma es su precio (gratis) y su disponibilidad: es perfectamente posible diseñar, programar y poner en producción una aplicación diseñada en PHP a coste literalmente cero (excepto el tiempo de desarrollo, claro está).

La aplicación diseñada es simple: un interfaz de usuario con un formulario, una aplicación que recoja datos de ese formulario y calcule la distribución óptima; y una generación de resultados que muestre esa distribución óptima en forma numérica (y gráfica, si es posible). De estas tres partes, la única realmente complicada es la función de minimización.

Si bien existen funciones de minimización programadas para PHP, la mayoría de ellas requieren una curva de aprendizaje para su adaptación y aplicación al código, de modo que finalmente se optó por programar un algoritmo simplex primal (Murty [1983]).

7.3. Resultados

7.3.1. Planificación a largo plazo

De acuerdo con los resultados del ensayo, se llevó a cabo un ajuste del modelo empleando, igual que en el modelo original, un algoritmo de minimización del error cuadrático medio (ec. 5.2) y el algoritmo de programación secuencial cuadrático (Fletcher y Powell [1963]; Gill y otros [1981]). Los resultados obtenidos fueron:

- $a_1 = 0,8274$
- $a_2 = 0,8274$
- $b_3 = -0,1581$
- $\tau = 13,5262$

Con estos resultados, la ecuación 7.15 muestra la expresión completa en el dominio del tiempo.

$$L(x = x_i, t_k) = 0,8274(x_i^2 + x_i) \{0,6043 + e^{-t_k/13,5262} [-0,1581 \cos(\pi t_k) - 0,4462]\} \quad (7.15)$$

Este modelo presenta una raíz de su error cuadrático medio (RMSE) de 0,0617 y un coeficiente de determinación $R^2 = 0,7685$. La figura 7.4 muestra una superficie tridimensional que describe la función $L(x,t)$ en función del tiempo (años) y el nivel de estrés hídrico.

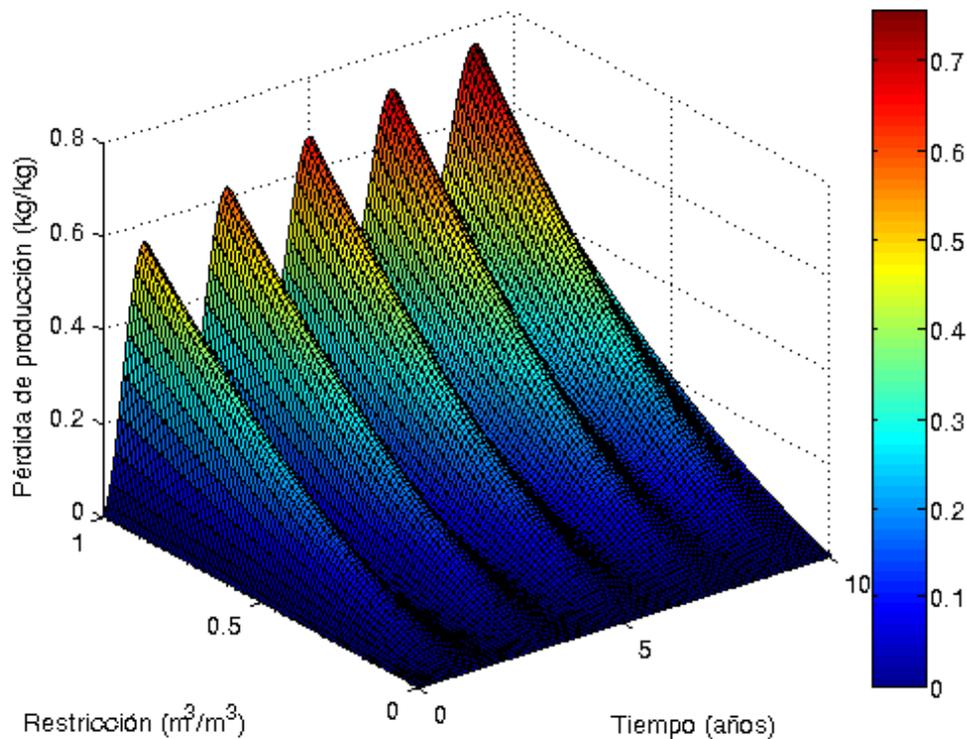


Figura 7.4: Curva de superficie para la función de pérdida de producción.

Para evaluar esta función de pérdida de producción, se agruparon los datos por nivel de estrés, evaluando la bondad del ajuste en tres escenarios diferentes, donde x_i fueron los tres diferentes escenarios de riego deficitario estudiados.

Se obtuvieron relaciones significativas para las tres situaciones consideradas, con los errores que se muestran en la tabla 7.1.

Tabla 7.1: Errores del modelo según tratamiento

Nivel de estrés	RMSE	R^2
50 %	0,0359	0,88
35 %	0,0610	0,67
25 %	0,0214	0,74

La figura 7.5, en la que y son los datos experimentales y f el resultado de aplicar el modelo, muestra cómo la amplitud de las oscilaciones va decremen-

tándose progresivamente, así como que la atenuación de esa amplitud es más rápida en los niveles más bajos de estrés, como por otra parte era previsible.

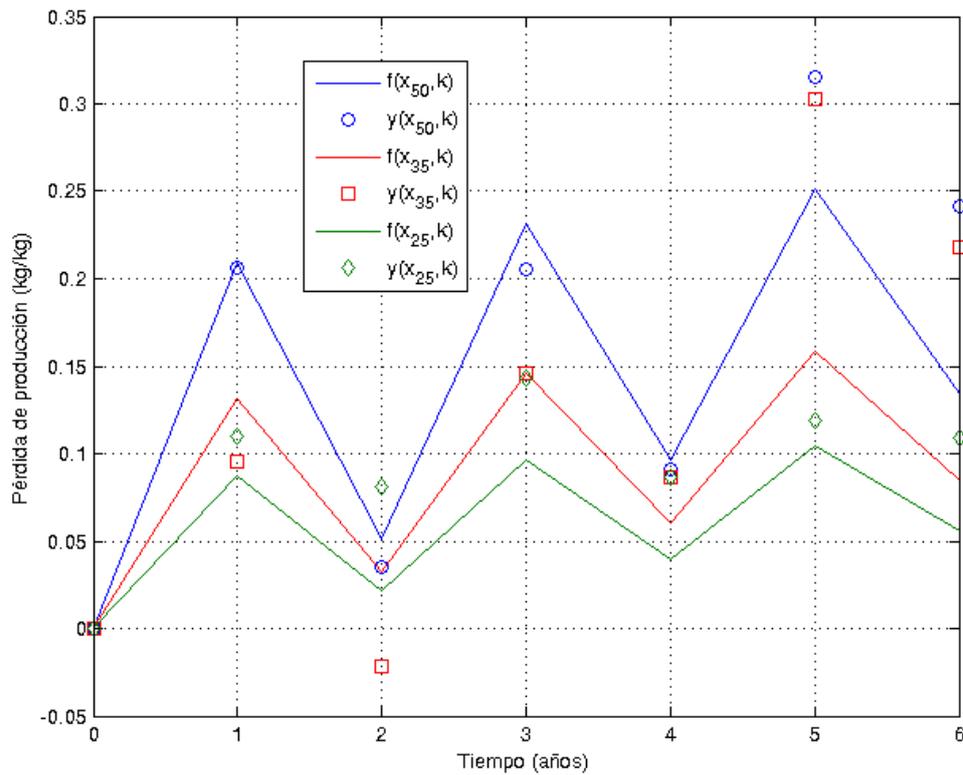


Figura 7.5: Pérdida de producción de fruto para tres niveles diferentes de estrés hídrico: 0,50; 0,35 y 0,25.

Para el cálculo de la planificación de riego óptimo, se emplearon las siguientes condiciones:

1. Objetivo deseado: ahorro de agua del 20% en estado estacionario.
2. Tiempo para alcanzar el estado estacionario: 10 años.
3. Tiempo adicional de simulación para comprobar que en efecto el estado es estacionario: 5 años.

A partir de la expresión 7.14, sustituyendo el valor de a_1 , a_2 y $x_\infty = 0,2$, se obtiene que:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} L(x, k) = g_1(x_\infty) \frac{1}{a_1 + a_2} = \frac{a_1 x_\infty^2 + a_2 x_\infty}{a_1 + a_2} = 0,12 \quad (7.16)$$

Con un ahorro del 20% del agua se pierde un 12% de la producción en régimen permanente.

En la expresión del funcional de costes 7.13, sustituimos las variables del problema por datos observados durante el ensayo. El coste de la electricidad necesaria para alimentar bombas y sistemas de control de regadío asciende en término medio a 108 €/ha. El coste del agua permaneció constante durante todo el tiempo del ensayo en 0,04 €/m³, lo que considerando el riego que se ha aportado a la parcela, resulta en unos costes medios de 257,40 €/ha. Por simplicidad, se asumirá una tasa interna de rentabilidad de la explotación igual a la inflación, esto es, $R = 0$.

Por otro lado, el precio de la naranja (variedad salustiana, objeto del ensayo) varió en torno a los 0,19 €/kg, que considerando la productividad por árbol y la cantidad de árboles por hectárea, resulta en un valor medio de 8.553 €/ha. Por lo tanto, en régimen permanente, un descenso en los costes de riego de un 20% y una pérdida de producción del 1% resulta en una pérdida económica de 51,48–940,83 = –889,35 €/ha al año. A falta de probar otras técnicas de ahorro de agua que reduzcan las pérdidas, es posible concluir que mientras el coste del agua de riego sea tan bajo, el riego deficitario sostenido no es económicamente rentable ya que las pérdidas que provoca ascienden a un 10,4% sobre los ingresos de la explotación.

Aún así, si la restricción viene forzada por las circunstancias, esta técnica puede ayudar a amortiguar el impacto económico resultante.

El objetivo a continuación es encontrar una secuencia de ahorro a lo largo de n años que permita alcanzar esa estabilización con unas pérdidas económicas mínimas. Para eso empleamos la sintonización de un controlador PID discreto que minimice el funcional de pérdidas.

Como punto de partida para un primer controlador, es necesario el cálculo de la expresión de la función $G_2(z)$.

$$G_2(z) = \frac{1 - p^2}{(a_1 + a_2)(1 - p^2 z^{-2})} = \frac{0,0831}{1 - 0,8626z^{-2}} \tag{7.17}$$

se empleó la técnica de autoajuste PI de MATLAB® por búsqueda de parámetros, concretamente buscando la minimización del error integral absoluto; esta técnica dio lugar al controlador de la ecuación 7.18.

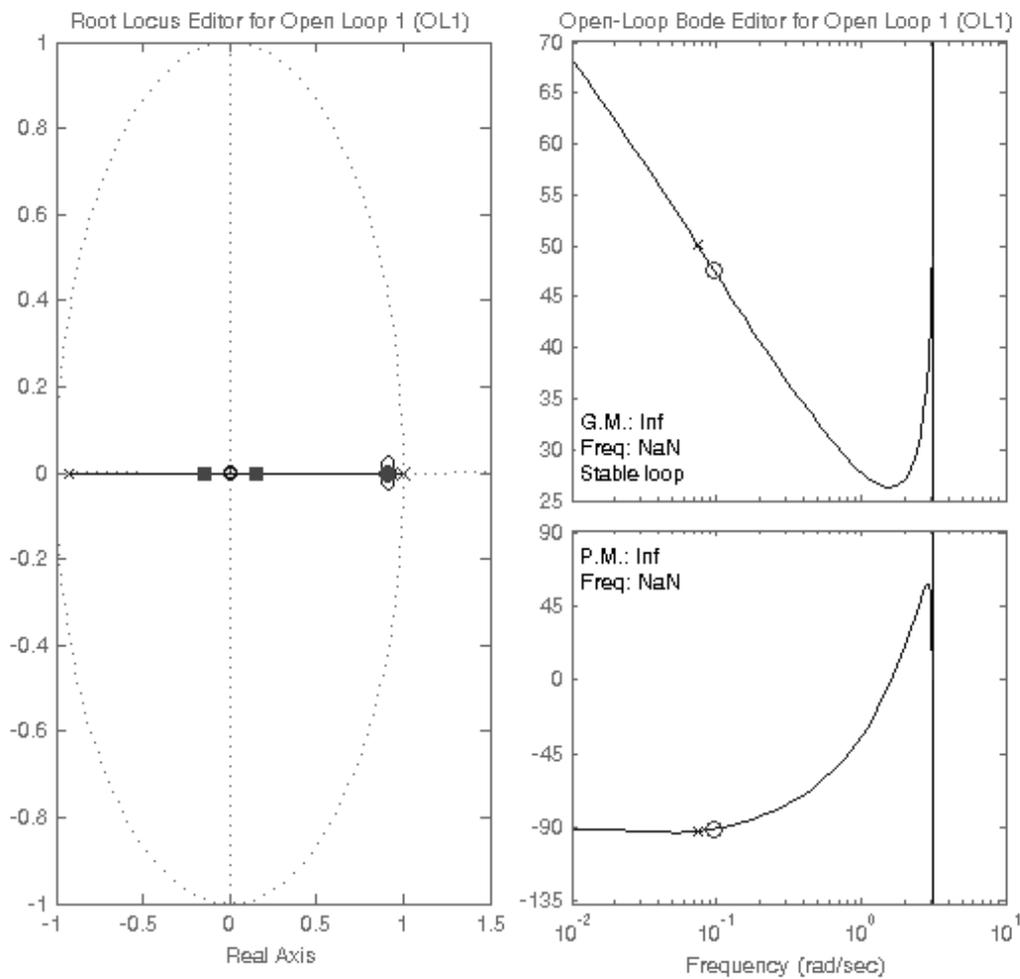


Figura 7.6: Análisis en el lugar de las raíces del controlador PI diseñado por autoajuste.

$$C(z) = 43,873 \frac{11z - 10}{z - 1} \quad (7.18)$$

La figura 7.6 muestra el análisis en el lugar de las raíces de este sistema controlado. Puede observarse que el sistema, que ya de por sí era estable, gana estabilidad con el control, alcanzando márgenes de fase y ganancia elevados.

Sin embargo, este controlador tiene el problema de que no tiene en cuenta los límites del control: la señal de control es una función de la restricción hídrica, en este caso $g_1(x)$, como se muestra en la ecuación 7.9. La restricción hídrica está acotada entre 0 y 1, por lo que la restricción de la señal de control estará acotada como se muestra en 7.19. La función $g_1(x)$ es monótona creciente en el intervalo $[0, 1]$, por lo que el cálculo del máximo y el mínimo es tan simple como sustituir los valores máximo y mínimo de x .

$$\begin{aligned} x_{min} = 0 &\rightarrow u_{min} = g_1(x = 0) = 0 \\ x_{max} = 1 &\rightarrow u_{max} = g_1(x = 1) = 1,6548 \\ &u \in [0, 1,6548] \end{aligned} \quad (7.19)$$

Para impedir que la señal de control exceda estos límites, se aplica un saturador a la salida del controlador. Al hacerlo, el diseño de control queda como se muestra en la figura 7.7.

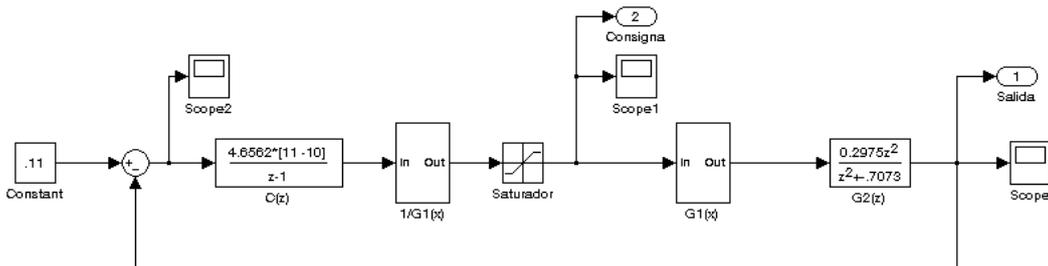


Figura 7.7: Diagrama Simulink® del diseño del controlador. Obsérvese el saturador para la consigna x .

Al aplicar el controlador al sistema, con una señal de referencia $L_{ref} = 0,12$, se obtienen los resultados mostrados en la figura 7.8. Como se puede observar, el controlador estabiliza el sistema, pero la señal de control alcanza valores negativos, lo que contradice la condición de la expresión 7.19.

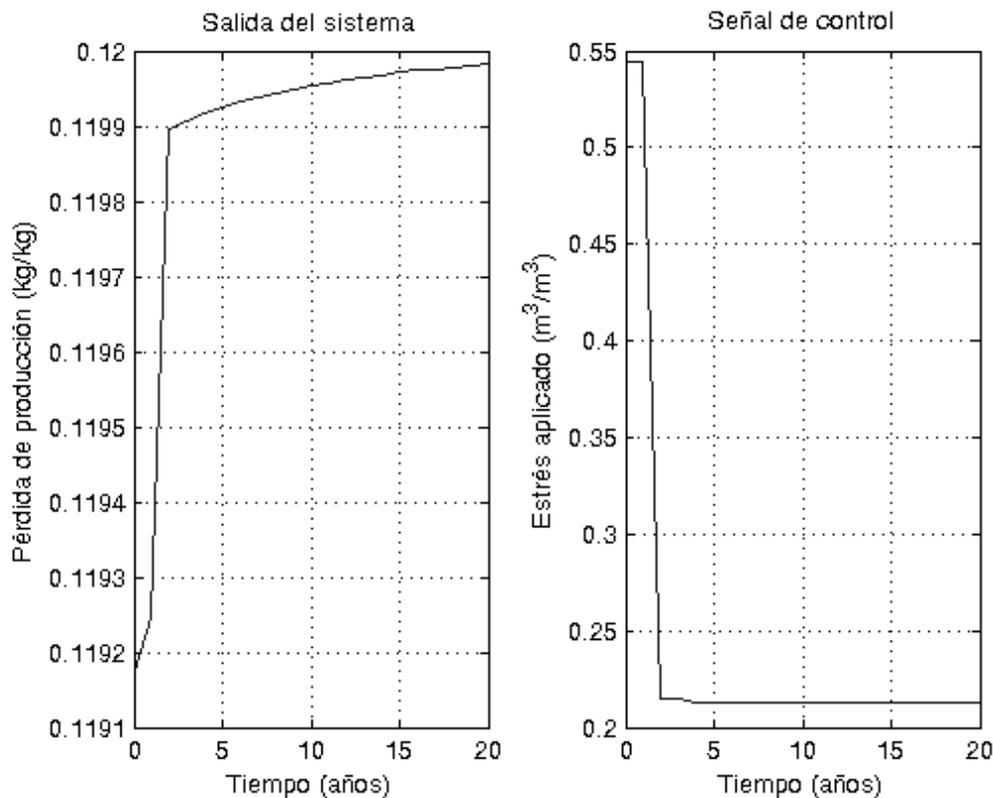


Figura 7.8: Simulación del sistema controlado con un PI Discreto.

Parece razonable pensar que aportando una cantidad de agua ligeramente superior a la necesidad teórica del cultivo, éste pueda recuperarse más de lo esperado. En este sentido, la técnica conocida como Riego Deficitario de Baja Frecuencia (RDBF) se basa precisamente en este principio: alternar largos períodos de estrés con breves períodos de riego intenso, por encima de las necesidades hídricas, para permitir que el árbol se recupere. Goldhamer y Fereres [2001] estudiaron estos efectos en cultivos arbóreos de melocotón *Prunus Persica* (L.) Batsch, cv. September Snow) y almendro *Prunus dulcis* (Mill.) Webb cv. Price.

En la figura 7.8 puede observarse cómo en ningún momento la pérdida de producción alcanza valores negativos, lo que resulta coherente con las premisas iniciales. Empleando este controlador, el funcional de costes vale 1362,5€.

El siguiente paso es añadir un término derivativo al controlador para acelerar el proceso: pasar de un PI a un PID. Empleando la misma técnica de minimización del error integral absoluto, se obtienen los siguientes parámetros para la ecuación 7.12:

- $K = -294,79$
- $a = 1,6$
- $b = 0,73$

El análisis del lugar de las raíces del sistema controlado se muestra en la figura 7.9. Puede observarse cómo el margen de fase sigue siendo alto pero el de ganancia se ha reducido hasta hacerse negativo. La conclusión es que se ha perdido robustez a cambio de ganar velocidad.

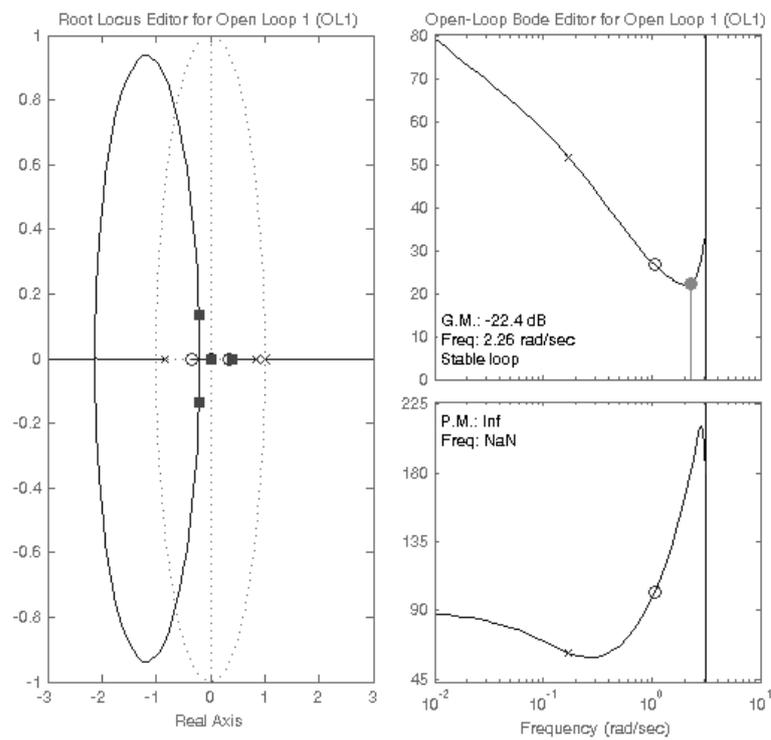


Figura 7.9: Análisis en el lugar de las raíces del sistema controlado con un PID discreto.

Para comprobar realmente el rendimiento de este controlador necesitamos analizarlo en el sistema completo, esto es, incluyendo el saturador. Aplicando

este controlador $C(z)$ al diseño mostrado en la figura 7.7, se obtiene una respuesta inestable: el controlador no funciona. Esto puede verse por la respuesta y la consigna en el sistema sin saturación, mostradas en la figura 7.10. Puede apreciarse cómo la estabilización del sistema es rápida y eficiente, con una pequeña oscilación difícilmente relevante... pero sólo es posible con consignas negativas; y ni siquiera con consignas levemente negativas que sean aplicables en la práctica, como por ejemplo aplicando un sobrerriego del 5%, sino sencillamente absurdas. El sistema, desgraciadamente, no se puede estabilizar con este controlador. Será preciso renunciar a utilizarlo, escogiendo en su lugar el controlador PI calculado anteriormente.

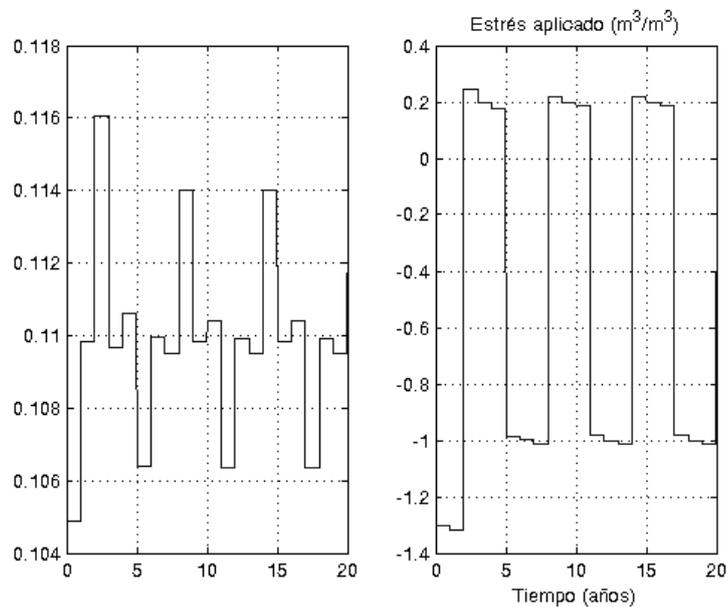


Figura 7.10: Simulación del sistema controlado con un PID Discreto.

Planificación por programación lineal

Al llevar a cabo todos estos cálculos, no se ha tenido en cuenta un hecho fundamental: el tiempo de muestreo es de un año. Es decir, no es necesario un controlador automático para buscar el rendimiento óptimo de la planta. Es perfectamente factible llevar a cabo un proceso de optimización, incluso corrigiendo año a año el modelo si fuera preciso, mediante algoritmos de búsqueda de soluciones óptimas. Por ejemplo:

1. Definir $X = X_0 = x_{ref} \cdot [1 \quad 1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]$
2. Repetir cien veces
 - a) Simular el sistema con la tasa de pérdidas X a lo largo de los diez primeros años y con pérdidas x_{ref} a lo largo de los últimos cinco. Si el funcional de costes es menor que la que habíamos definida como mínima, hacer $X_0 \rightarrow X$.
 - b) Incrementar en p la restricción en el año i , decrementando en p la restricción en el año j (teniendo en cuenta los límites teóricos de $[0, 1]$). Los años i, j son elegidos aleatoriamente; el valor p es fijo, y en el caso probado valía 0,01.
 - c) Generar con este cambio un nuevo vector X .
3. Si se ha conseguido mejorar el funcional de costes con un decremento mayor que un cierto umbral (en el caso probado, 10^{-8}), volver a 2.

Este algoritmo tiene la particularidad de mantener una restricción hídrica media constante: si se reduce esa restricción en un año, es necesario que compensarlo en años posteriores. Tras la ejecución, se obtuvo la secuencia mostrada en la ec. 7.20.

$$X = [0,25 \quad 0,29 \quad 0,19 \quad 0,27 \quad 0,15 \quad 0,23 \quad 0,13 \quad 0,21 \quad 0,11 \quad 0,17] \quad (7.20)$$

Esta secuencia de restricciones hídricas, donde puede observarse que las mayores restricciones se dan al principio (hasta el 30% en el segundo año), da como resultado una pérdida media de 1383 €/año a lo largo de diez años. Para

tener una idea de la utilidad de esta herramienta, si hubiéramos aplicado la restricción del régimen permanente desde el principio habríamos tenido una pérdida de 973 €/año; sólo se han reducido las pérdidas en un 5,3%.

La figura 7.11 muestra las pérdidas de producción resultado de aplicar la distribución óptima calculada en comparación con las pérdidas que habrían ocurrido de aplicar la restricción de referencia (20%) desde el principio. La gráfica inferior muestra cómo cambian los niveles de restricción hídrica en el tiempo.

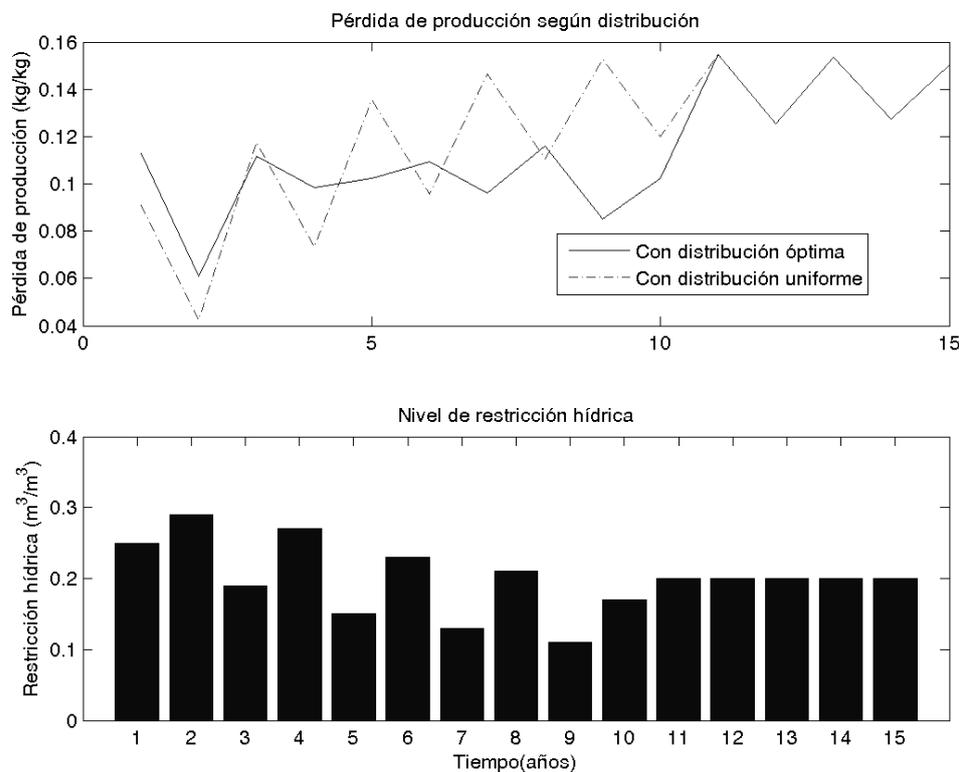


Figura 7.11: Resultado de simular la aplicación al cultivo de una distribución óptima y una distribución uniforme de estrés hídrico.

7.3.2. Planificación a medio plazo

Se diseñó y programó una página HTML intentando cumplir con los requisitos de imagen corporativa del IFAPA. El resultado puede observarse en la figura 7.12.



Figura 7.12: Muestra de la interfaz de la aplicación web.

A partir de los datos del experimento expuesto en 6, se obtuvieron los siguientes valores medios para las necesidades hídricas del cultivo en ausencia de estrés a lo largo de los cuatro años del experimento:

- Floración: $79m^3$
- Crecimiento de fruto: $187,5m^3$
- Maduración: $51m^3$.

La suma asciende a $317,5m^3$ en un año. Si aplicamos una reducción del 20% a esta cantidad se obtienen $254m^3$; introduciendo estos datos en la interfaz, la herramienta muestra la pantalla de la figura 7.13. La distribución óptima de regadío es:

- Floración: $69m^3$
- Crecimiento de fruto: $152m^3$
- Maduración: $33m^3$.

Aplicando estos valores, se obtiene una pérdida de producción de tan sólo el 3,1%; es conveniente recordar que en el caso del riego deficitario sostenido se obtenían pérdidas del 11%.

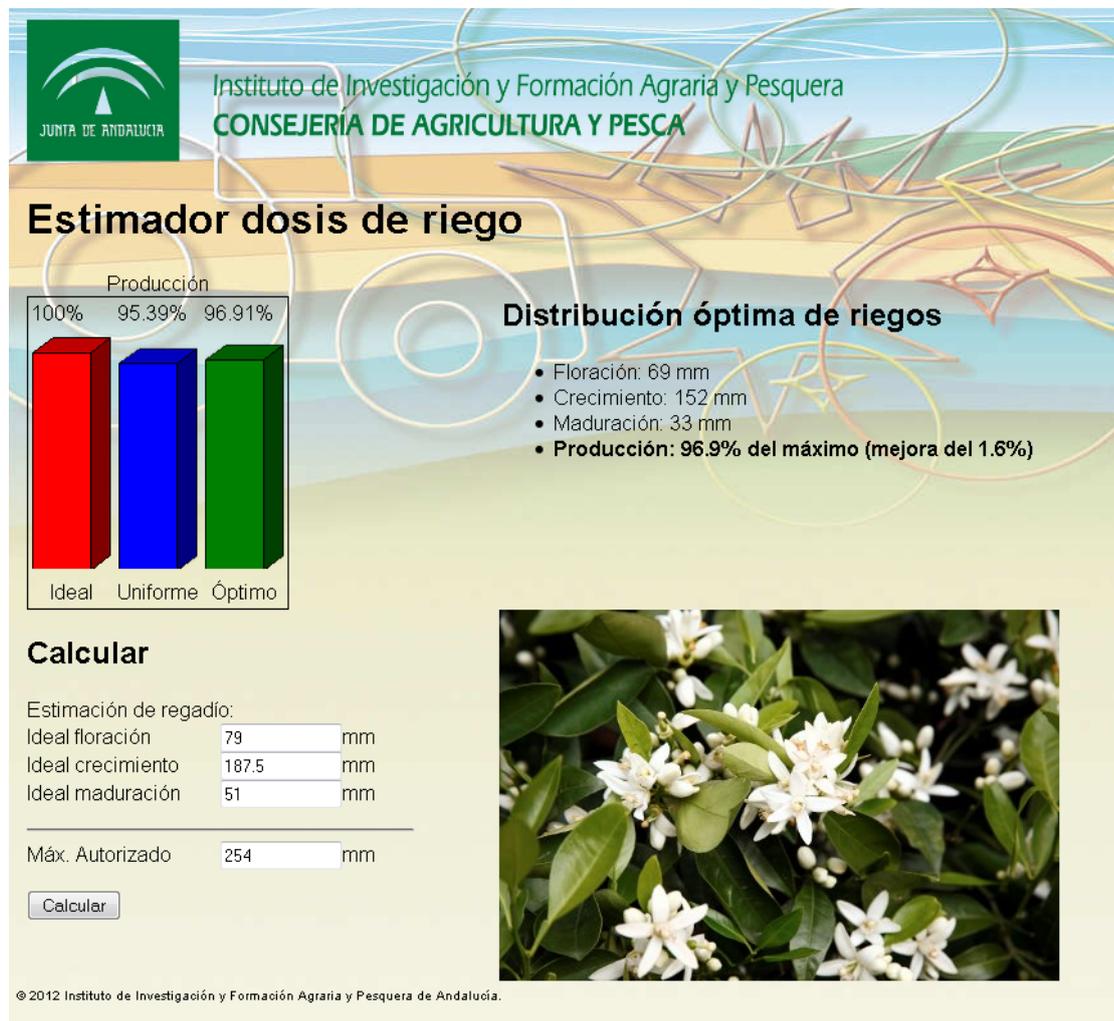


Figura 7.13: Resultado de la aplicación tras introducir una restricción del 20%.

En conclusión, el uso de esta herramienta permitirá al agricultor reducir sus pérdidas al mínimo de forma sencilla e intuitiva. Siempre y cuando, claro está,

esté dispuesto a hacer la inversión necesaria para aplicar un sistema de Riego Deficitario Controlado.

7.4. Propuesta de aplicación mixta

En los apartados anteriores, se han expuesto modelos para la planificación de Riego Deficitario Controlado a medio plazo, y de Riego Deficitario Sostenido a largo plazo. Los resultados muestran cómo el RDC produce menores pérdidas que el RDS, por lo que entra dentro de lo razonable adoptarlo como nuestra política a seguir.

Sin embargo, no se han estudiado los efectos que tendría la aplicación de un RDC a largo plazo. Resultaría conveniente un ensayo en el que se estudiara este aspecto, sin embargo no resulta sencillo llevar a cabo un experimento de estas características. Es por eso que este apartado se ha separado del resto del capítulo, dado que es una propuesta meramente teórica sin ensayos para respaldarla.

7.4.1. Hipótesis de partida

Se parte de dos supuestos básicos:

1. Las funciones de pérdida de producción de largo plazo mostradas en la ecuación 7.15 están descritas en variables separables: el estrés hídrico (x) por un lado, el tiempo (t) por el otro. Es por ello que la primera hipótesis es que la función $g_2(t)$ dependiente únicamente del tiempo, puede emplearse sin cambios para un hipotético Riego Deficitario Controlado a lo largo de un período amplio de tiempo. Por lo tanto, la $g_2(t)$ se mantiene.
2. Las funciones de pérdida de producción en la planificación de una campaña de riegos, mostradas en la ecuación 6.19 son aplicables a largo plazo, esto es, pueden ser utilizadas como nuestra nueva $g_1(x)$.

Nunca se puede insistir lo suficiente en la necesidad de comprobar estas hipótesis. Sin embargo, y desde un punto de vista meramente teórico, tiene sentido asumir que el árbol no va a sufrir un efecto mayor de estrés por el hecho

de que ese estrés no sea sostenido sino controlado; antes bien, un sistema controlado tiende a repartir el agua de forma más constante, y por lo tanto con menor estrés para el árbol. En el próximo capítulo, precisamente, se propondrá un riego deficitario controlado para el cultivo del almendro que estabilice el crecimiento diario de tronco, lo que implica mayor estabilidad, y con ello un daño menor para la planta.

Bastante más complicado resulta asumir el siguiente principio: que repartir el estrés de forma no homogénea entre los distintos periodos fenológicos no va a perjudicar el estado del árbol a largo plazo más que hacerlo de forma homogénea. No tenemos forma de comprobar este extremo; será preciso asumirlo como axioma hasta que se lleve a cabo un estudio del estado hídrico de la planta a través de sus variables fisiológicas a largo plazo. Para ser conservador en ese extremo, se propone lo siguiente: dado que el daño sobre la producción del RDC es menor que en el RDS, se asumirá que la producción sufre los daños provocados por el RDC pero la planta sufre a largo plazo los daños provocados por el RDS. De este modo, asumimos una hipótesis conservadora según la cual el daño sobre la producción será mayor del previsto, pero la magnitud seguirá controlada; al mismo tiempo, los cálculos necesarios se simplifican considerablemente.

7.4.2. Metodología

No se puede emplear el modelo a largo plazo simplemente sustituyendo la $g_1(x)$ por las funciones de producción de la ecuación 6.19: hay que tener en cuenta que $g_1(x)$ es sólo un término de la ecuación, no una pérdida por sí sola. Para obtener ese valor, es necesario dividir el resultado de esa ecuación por $g_2(t = 1)$, que vale 0,3367.

$$L(x, t) = g_1(x)g_2(t)$$

Si la función de pérdida de producción es $L(x, 1)$, entonces $g_1(x) = \frac{L(x, 1)}{g_2(t=1)}$.

El resultado obtenido muestra que ya existe una distribución óptima de riegos a largo plazo calculada en la ecuación 7.20. De este modo, lo único que resta por hacer es ir a la aplicación de distribución óptima con las cantidades ya calculadas:

$$X = [0,25 \quad 0,29 \quad 0,19 \quad 0,27 \quad 0,15 \quad 0,23 \quad 0,13 \quad 0,21 \quad 0,11 \quad 0,17]$$

Sobre una cantidad de riego ideal (teórica) de $317,5m^3$ al año, esto da lugar a la tabla 7.2. Estos resultados se muestran gráficamente en la figura 7.14.

Tabla 7.2: Distribución de riegos óptima (en mm): resultados de aplicar año a año la secuencia calculada para RDS con RDC. Las pérdidas se miden en tanto por uno (kg/kg). El reparto óptimo es: 79 mm en floración, 187 mm en crecimiento y 51 mm en maduración.

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Florac.	66	63	71	61	74	68	76	69	77	73
Crecim.	141	133	152	140	159	144	163	148	167	156
Madur.	32	30	35	30	37	33	38	34	39	35
Pérdidas	0.050	0.183	0.030	0.029	0.023	0.026	0.022	0.027	0.022	0.023

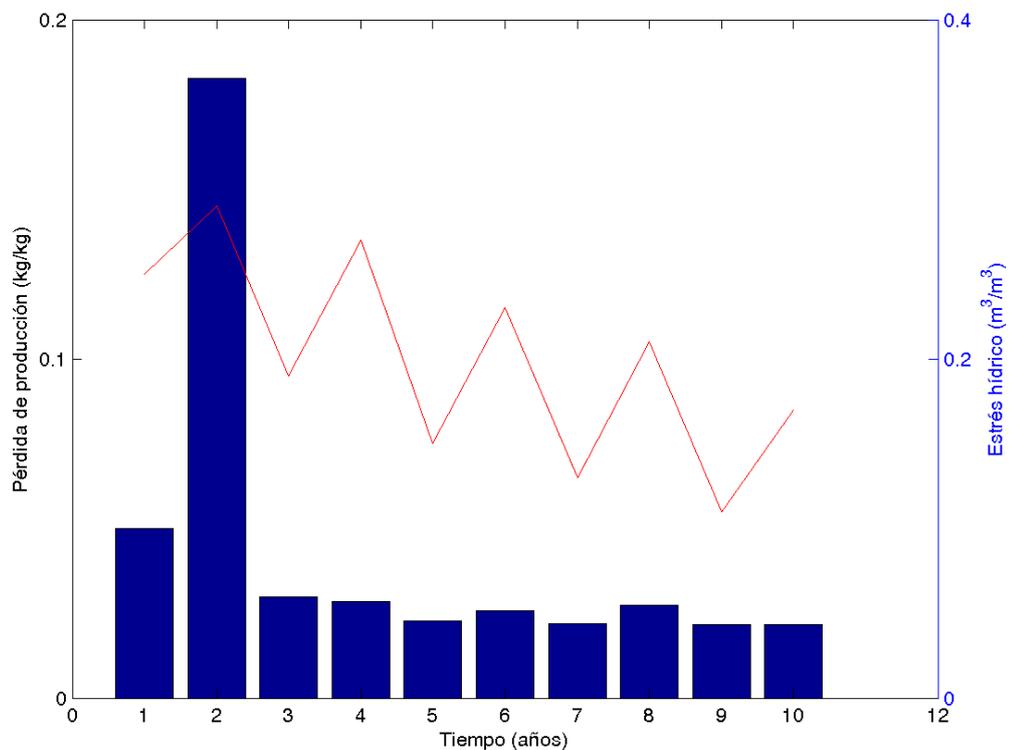


Figura 7.14: Resultado de aplicar la secuencia óptima aplicando Riego Deficitario Controlado optimizando por periodos fenológicos.

7.5. Conclusiones

El Riego Deficitario no es sólo una técnica para ahorrar agua: es una necesidad, muchas veces impuesta por las circunstancias. En este capítulo se han propuesto varias técnicas de control de riego aprovechando modelos obtenidos en capítulos anteriores.

En primer lugar, se ha planteado un modelo que distribuya de forma óptima el riego a lo largo de varios años de modo que la pérdida global de producción sea mínima. Evidentemente, a largo plazo el *sufrimiento* de la producción está fuertemente condicionado por el de la planta: serán los daños que provoque el estrés hídrico a largo plazo en la planta lo que provoque la mayor parte de la pérdida de la producción. Desde ese punto de vista, se han propuesto dos controladores automáticos y una técnica de búsqueda de una secuencia óptima de riegos que minimice las pérdidas económicas.

En segundo lugar, se ha aprovechado el modelo de pérdida de producción a lo largo de una campaña según el periodo fenológico empleando riego deficitario controlado; se ha creado una aplicación de fácil uso para la planificación de la campaña de riegos de modo que se pueda atender lo mejor posible a las necesidades del cultivo consiguiendo un ahorro de agua que a menudo viene impuesto al agricultor.

Finalmente, se han unido ambos modelos para aprovechar las ventajas que da el Riego Deficitario Controlado frente al Sostenido para simular el resultado de aplicar la secuencia obtenida para largo plazo distribuyendo de forma óptima, logrando unas pérdidas sensiblemente inferiores.

El siguiente paso debería ser un ensayo que probara este último extremo, lo que permitiría no sólo comprobar la precisión del modelo sino la respuesta del cultivo al control.

Capítulo 8

Modelado, simulación y control de riego en almendros jóvenes

8.1. Introducción

El uso de agua para riego implica la combinación de técnicas fisiológicas, tecnológicas y de ingeniería, especialmente en lo que se refiere a la continua observación del estado hidrológico del cultivo sometido a Riego Deficitario.

El almendro (*Prunus dulcis* Mill. D.A. Webb), con una superficie de 650 000 hectáreas, es tras el olivo (*Olea europaea* L.) y la vid (*Vitis vinifera* L.), el tercer cultivo leñoso en las zonas cultivables españolas (FAOSTAT, 2011). Aunque tradicionalmente se ha considerado al almendro un cultivo tolerante a la sequía con gran capacidad de adaptación a condiciones de estrés hídrico, se ha observado que en condiciones de riego sin restricción su productividad mejora significativamente, lo que permite generar grandes beneficios económicos manteniendo la productividad del agua en valores altos.

En muchas regiones áridas y semi-áridas, esto es un lujo que a menudo no pueden permitirse los agricultores: la disponibilidad de agua para riego es uno de los principales factores limitantes para incrementar la productividad del cultivo; es por eso que a menudo se considera el Riego Deficitario como una alternativa válida para lograr mantener la productividad del cultivo a niveles similares a los que alcanzaría en condiciones de riego no restringido (Romero y otros [2004]). Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que el Riego Deficitario busca la estabilización de la producción maximizando la productividad de agua en el cultivo antes que la maximización (optimización) de la producción del propio cultivo (Zhang y Oweis [1999]).

La medida adecuada del contenido volumétrico de agua en suelo y ciertos parámetros fisiológicos de la planta son de una importancia crítica a la hora de comprender los procesos biológicos y químicos del sistema suelo-planta. Estos parámetros son necesarios para planear una adecuada estrategia de Riego Deficitario; teniendo este hecho en cuenta, el primer paso para llevar a cabo una planificación de riegos es determinar un modelo matemático que describa el comportamiento del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico (riego por debajo de la evapotranspiración de referencia, ET_0). Una vez calculado este modelo, es factible diseñar un sistema de control automático para optimizar la producción y la productividad del agua de riego.

La fluctuación diaria de tronco (TDF) y el crecimiento diario de tronco (TDG) se emplean como señales fisiológicas que sirvan para establecer una planificación de riegos; la selección de esas variables se debe a su relación con el conte-

nido de agua en suelo, como se establece en Moriana y Fereres [2002], y otros parámetros fisiológicos.

La teoría de control (Ogata [2001]) estudia el diseño de controladores y reguladores automáticos que permitan obtener comportamiento óptimo en sistemas dinámicos, incrementando la productividad y reduciendo la carga de trabajo y los costes implicados en el proceso. El regulador cuadrático lineal (LQR) es una de las soluciones propuestas al problema lineal cuadrático, en el que los sistemas dinámicos se describen a partir de ecuaciones diferenciales lineales (o ecuaciones lineales en diferencias, si el sistema actúa en tiempo discreto) y el coste se caracteriza como una función cuadrática (Rubio y López [1996]). Cuando se combinan con un predictor como un filtro de Kalman (Kalman [1960]) para obtener estimaciones de estados no accesibles, forman un regulador Lineal Cuadrático Gaussiano (LQG).

En este capítulo se presenta un controlador de riego automático diseñado mediante técnicas de control óptimo usando la fluctuación diaria de tronco TDF como señal de salida; se incluyen simulaciones de su rendimiento mediante el uso de software matemático.

8.2. Material y métodos

8.2.1. Condiciones del experimento

El ensayo se llevó a cabo a lo largo del verano de 2011 en un entorno controlado situado en Alcalá del Río, a 18 km. de Sevilla 37°30'N, 5°58' O). Incluyó almendros jóvenes plantados en macetas de gran tamaño. Se instaló un sistema de riego por goteo con líneas que incluían un emisor compensado por presión por cada árbol, con un flujo de salida de dos litros por hora (figura 8.1).

El suelo en el que se plantaron es franco limoso, típico Fluvisol (FAO98 [1998]), fértil y con un bajo contenido de materia orgánica ($< 15,0\text{g/kg}$). Los valores del contenido de agua en suelo en capacidad de campo ($-0,3\text{ MPa}$) y punto de marchitez ($-1,5\text{ MPa}$) fueron de $0,39\text{ m}^3/\text{m}^3$ y de $0,13\text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente. La capacidad media de humedad en suelo asciende a $0,26\text{m}^3/\text{m}^3$.



Figura 8.1: Experimento con almendros jóvenes. Puede observarse la colocación del dendrómetro y los cables de las sondas de humedad en suelo.

El clima de la zona es meso-mediterráneo atenuado (UNESCO [1963]), con unas precipitaciones medias anuales de 534 mm/año y una evapotranspiración de referencia ET_0 de 1400 mm/año.

8.2.2. Tratamientos de riego

Se separaron los almendros en dos filas, con una línea de riego asignada a cada una. Gracias a la continua monitorización del contenido gravimétrico de agua en suelo, se pudo emplear un sistema de riego automático con un controlador «bang-bang» (sí/no) realimentado: activaba el riego cuando el contenido de agua en suelo bajaba de determinado umbral mínimo y lo desactivaba cuando superaba cierto umbral máximo, creando así un ciclo de histéresis. Para ambas filas se tomó como umbral máximo el 100% de la capacidad de campo estimada, mientras que para los umbrales mínimos se hizo una distinción: para una fila se tomó el 90% de dicha capacidad de campo (tratamiento control), para la otra el 50% (tratamiento de riego deficitario)

8.2.3. Mediciones en planta

Durante el tiempo en que se desarrolló el experimento, entre los días del año (DOY) 203 y 242, se monitorizaron diferentes propiedades del árbol mediante sensores. En cada árbol se aplicó una sonda capacitiva de humedad en suelo 10HS conectada a uno de los dos dataloggers EM50 (Decagon Devices, Inc. Pullman, WA, USA) disponibles en el lugar del ensayo, además de un dendrómetro modelo DF conectado a un datalogger DL10 (Ecomatik GmbH, Dachau/Munich, Alemania) para medir las fluctuaciones diarias de tronco (TDF). El montaje completo puede verse en la figura 8.1.

Finalmente, los pesos de las macetas fueron monitorizados de forma continua empleando células de peso modelo AH200 (Scaime, Annemasse, Francia) conectadas a un logger central PMS-90R (Aplisens S.A., Varsovia, Polonia). La figura 8.2 muestra la preinstalación de las células de carga y el logger en el lugar del ensayo antes de colocar las macetas.

Las condiciones meteorológicas locales se midieron gracias a una instalación meteorológica cercana, ubicada en el mismo complejo.



Figura 8.2: Preinstalación de células de carga en el lugar del ensayo.

8.2.4. Análisis de datos y modelado

Después del periodo experimental, los datos resultantes fueron analizados empleando el software matemático Matlab®(The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts, USA).

El objetivo del problema de identificación fue encontrar una relación entre la TDF y las dos variables de entrada: extracción de agua de suelo y riego. Si las medidas hubieran sido continuas (o con un tiempo de muestreo lo bastante pequeño), la forma estándar en tiempo continuo hubiera sido un sistema de ecuaciones diferenciales. Sin embargo, el tiempo de muestreo fue de un día, lo que nos fuerza a enfocar el problema en forma discreta, con la ecuación en diferencias mostrada en la ecuación 8.1, donde la E se refiere a la extracción y la I al riego (*irrigation*).

$$TDF[k] = f(E[k, k-1, k-2, \dots], I[k, k-1, k-2, \dots], TDF[k-1, k-2, \dots]) \quad (8.1)$$

Este modelo presenta una ventaja crucial: la segunda entrada, el riego, es una auténtica señal de entrada. Empleando la transformada z (Oppenheim y Schaffer [1999]), el sistema puede ser descrito tal y como se muestra en la ecuación 8.2, un sistema de dos entradas y una salida lineal e invariante en el tiempo (LTI), donde la Y es la salida del sistema, esto es, la TDF.

$$Y(z) = \frac{a + bz^{-1}}{c + dz^{-1}}I(z) + \frac{e + fz^{-1}}{c + dz^{-1}}E(z) \quad (8.2)$$

8.2.5. Diseño del controlador

Regulador Lineal Cuadrático (LQR)

El control LQR es una metodología que proporciona leyes explícitas de re-alimentación de estado para sistemas lineales (como el mostrado en la ecuación 8.2) en la forma $u = -Kx$, donde u es la consigna de control, x es el vector de los estados del sistema y la matriz de control K se obtiene mediante la minimización del funcional de costes J que se muestra en la ecuación 8.3, donde las matrices Q y R ponderan el error en los estados y el esfuerzo de control respectivamente.

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k \quad (8.3)$$

Sin embargo, la extracción E no es accesible: sólo se puede obtener a partir de los datos de la estación meteorológica, a los que sólo se tiene acceso al final del día, por lo que la señal de control no se puede determinar al ser la E del estado x desconocida.

El regulador LQG. Filtro de Kalman.

El regulador LQG trata de resolver el problema de los estados no accesibles añadiendo un estimador de estados al diseño. El filtro de Kalman, también conocido como estimador lineal cuadrático (LQE), es un algoritmo diseñado para identificar un estado oculto en un sistema dinámico lineal. Conociendo las varianzas del error y los ruidos que le afectan, la ganancia K de realimentación del error puede ser diseñada de forma óptima. dada la planta discreta de la ec. 8.4, donde w es la entrada oculta y v el error en la salida, se puede considerar w la extracción y v la diferencia entre los resultados experimentales y la salida del modelo.

$$\begin{aligned} x[k+1] &= AX[k] + Bu[k] + Gw[k] \\ y[k] &= Cx[k] + Du[k] + Hw[k] + v[k] \end{aligned} \quad (8.4)$$

Un diagrama básico del estimador de Kalman puede observarse en la figura 8.3. El filtro de Kalman predice el comportamiento de los estados no accesibles, haciendo posible emplear la ley de control diseñada previamente.

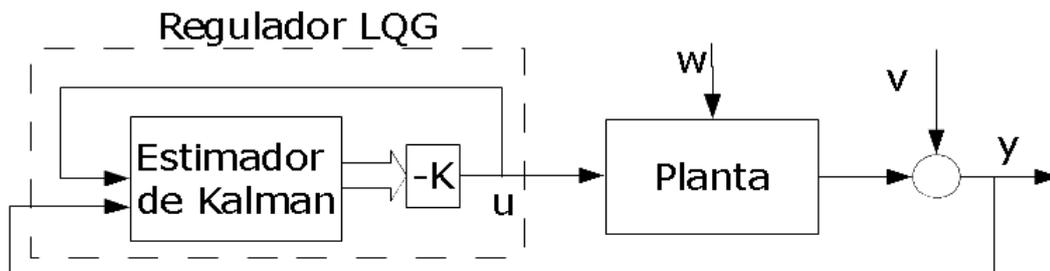


Figura 8.3: Diagrama del regulador lineal cuadrático gaussiano con filtro de Kalman. w es la entrada oculta y v el ruido a la salida.

El estimador tiene la ecuación de estados mostrada en la ec. 8.5, donde Q es la covarianza del ruido w , R la covarianza del error v y N la covarianza cruzada

de ambas señales; la matriz de ganancias L se calcula resolviendo una ecuación discreta de Ricatti (Kučera [1972]).

$$\hat{x}[k+1|k] = A\hat{x}[k|k-1] + Bu[k] + L(y[k] - c\hat{x}[k|k-1] - Du[k]) \quad (8.5)$$

Con el estimador y el controlador ya diseñados, el sistema completo fue simulado empleando la herramienta Simulink®. Un diagrama completo del sistema controlado por el regulador LQG puede verse en la figura 8.4. La salida del controlador, esto es, la señal de control, sufre una limitación: ha de ser mayor o igual que cero dado que no es posible regar menos que cero.

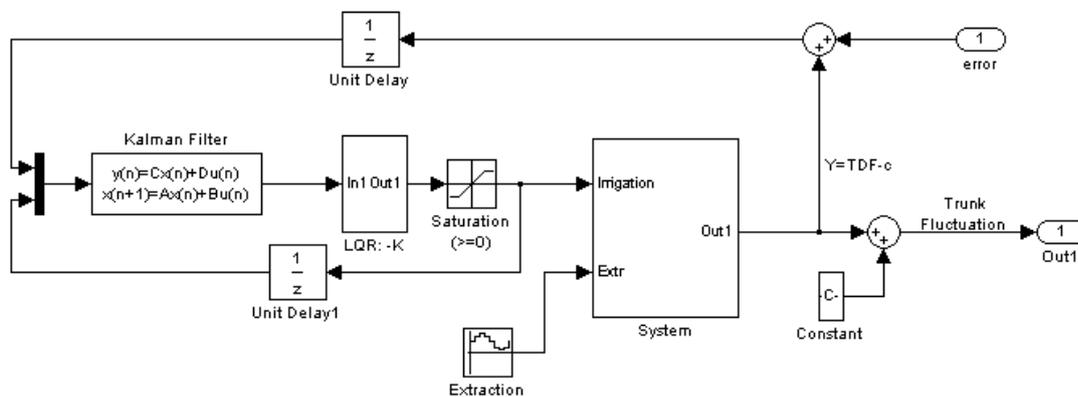


Figura 8.4: Diagrama Simulink® del sistema completo incluyendo el regulador.

8.3. Resultados y discusión

Los datos recogidos fueron almacenados en un fichero de texto y procesados con el software matemático Matlab®. Tras un simple análisis de correlación, los coeficientes con mayores índices de correlación cruzada con la TDF son la extracción diaria máxima, con $R = 0,40$, y el riego, con $R = 0,27$. La extracción diaria, a su vez, tiene un elevado índice de correlación con la evapotranspiración ET ($R = 0,41$), TDF (la matriz de correlación es simétrica), riego ($R = 0,32$) y con los valores diarios máximo, mínimo y medio de la temperatura ($R = 0,23$, $R = 0,20$, y $R = 0,27$ respectivamente).

Desde un primer momento, consideramos la TDF como el parámetro fundamental a estabilizar y regular para poder controlar el estrés de la planta. La primera aproximación fue la búsqueda de un ajuste lineal con la extracción de agua; los datos muestran una elevada dispersión que complicó sobremanera el ajuste, obteniendo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,2684$; el resultado puede verse en la figura 8.5. La expresión de la ecuación 8.6 muestra este ajuste, donde la extracción se mide en m^3/m^3 (esto es, es adimensional) y la TDF se mide en micrómetros.

$$TDF = 1686E + 9,931 \quad (8.6)$$

Además del bajo valor del coeficiente de determinación, este ajuste tiene un inconveniente adicional: el término I (riego) no aparece. Para corregir esto, se añadió una relación adicional entre esta función TDF y el riego.

8.3.1. Modelo multivariable LTI en tiempo discreto

Para mantener el modelo lo más simple posible, la forma escogida fue lineal (esto es, sin presencia de términos E^k , I^k o de productos cruzados) e invariante en el tiempo. El modelo de primer orden desarrollado presenta la forma mostrada en la ecuación 8.7, donde a, b, d, e, f y k son los parámetros del modelo.

$$TDF[k] = aI[k] + bI[k-1] + dTDF[k-1] + eE[k] + fE[k-1] + g \quad (8.7)$$

Si se hace la sustitución $g = c(1-d)$, la ecuación resultante es la 8.8.

$$\begin{aligned} TDF[k] &= aI[k] + bI[k-1] + d(TDF[k-1] - c) + eE[k] + fE[k-1] + c \\ \Rightarrow TDF[k] - c &= aI[k] + bI[k-1] + d(TDF[k-1] - c) + eE[k] + fE[k-1] \end{aligned} \quad (8.8)$$

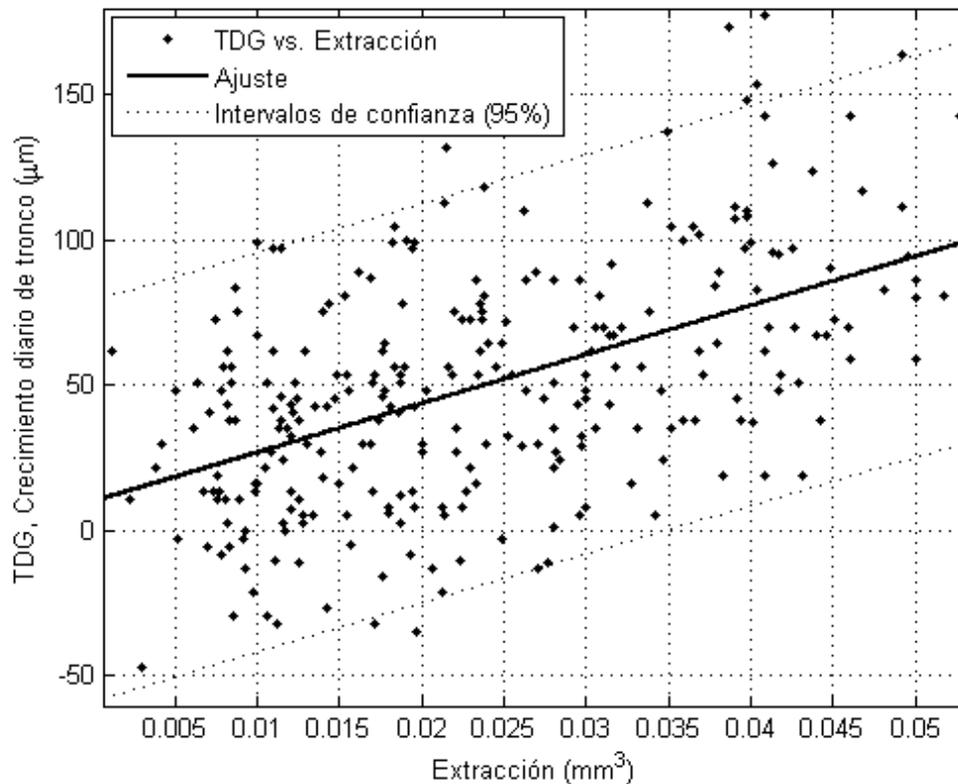


Figura 8.5: Ajuste lineal de TDG frente a Extracción.

Se ha llevado a cabo este cambio en los parámetros para, a continuación, hacer posible el cambio de variable $y[k] = TDF[k] - c$. Esto permite redefinir el problema en la forma mostrada en la ecuación 8.9.

$$y[k] = aI[k] + bI[k - 1] + dy[k - 1] + eE[k] + fE[k - 1] \quad (8.9)$$

Usando funciones de optimización propias de Matlab®(Mathworks [2012]), se obtuvieron valores óptimos para los parámetros:

- $a = 14,41$
- $b = -2,992$

- $c = 5,068$
- $d = 0,2838$
- $e = 1361,9$
- $f = -59,81$

Al aplicarlo al modelo de primer orden, estos parámetros resultaron en una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 20,086 y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,5774$. Al compararlo con el ajuste lineal original, esto resulta en un coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe [1970]) de 0,363, esto es, mejora el modelo original en un 36%. Se probaron modelos similares de segundo orden sin conseguir mejoras significativas.

La figura 8.6 muestra una comparación entre los resultados del modelo obtenido y los resultados experimentales para siete árboles: tres recibieron tratamiento control (hubo un cuarto árbol que debía formar parte del experimento, pero desgraciadamente se produjeron errores en el equipo de medida que obligaron a excluirlo) y cuatro el tratamiento de Riego Deficitario Controlado descrito.

8.3.2. Diseño del controlador

Empleando matrices identidad para Q y R en el modelo descrito en la ecuación 8.2, traducido al espacio de estados, el controlador digital LQR proporciona una ley de control como la mostrada en la ecuación 8.10.

$$u = -0,2018x[k] \tag{8.10}$$

Empleando los valores obtenidos para la ecuación 8.9 y las covarianzas del ruido, se obtuvo un modelo en espacio de estados para el filtro de Kalman que se muestra en 8.11, donde u es la señal de control e y la verdadera salida del sistema, añadiendo la salida del modelo y el error.

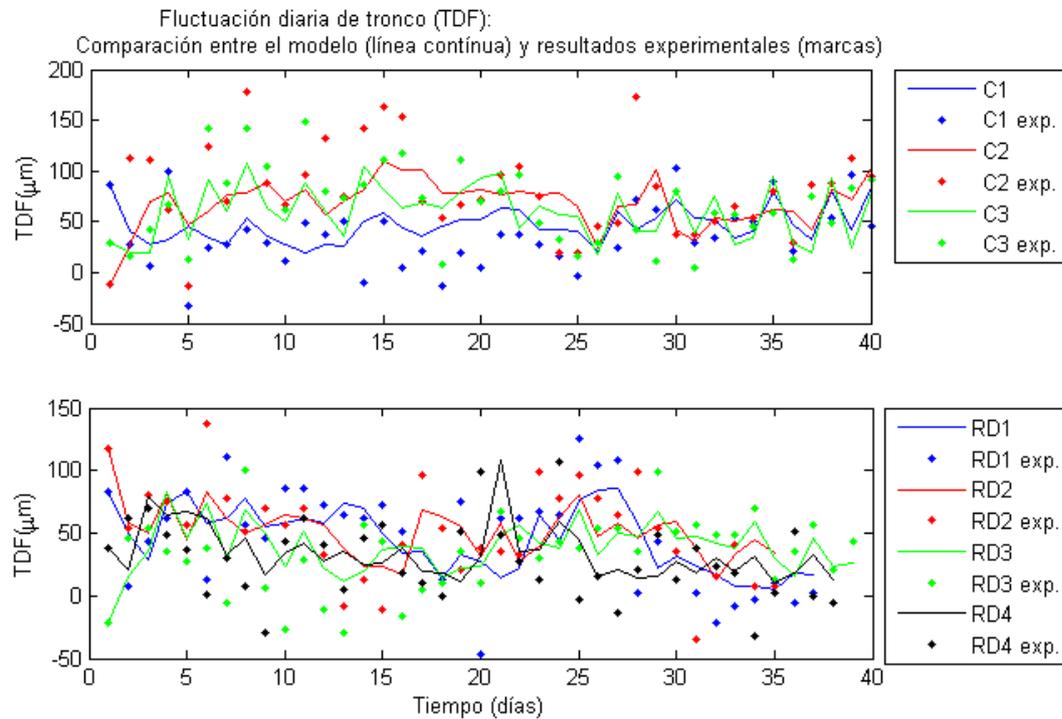


Figura 8.6: Comparación entre resultados experimentales y del modelo para ambos tratamientos. Cx: tratamiento control; RDx: tratamiento de riego deficitario.

$$\begin{aligned}
 x_e[k+1] &= ax_e[k] + b \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} y_e \\ x_e \end{bmatrix} &= c x_e + d \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \\
 a &= 0,09646; \quad b = \begin{bmatrix} -0,3583 & 0,01828 \end{bmatrix} \\
 c &= \begin{bmatrix} 16 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad d = \begin{bmatrix} 16,11 & -2,634 \cdot 10^{-6} \\ 2,653 \cdot 10^{-6} & -0,1647 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{8.11}$$

Aplicando el estado estimado de la ecuación 8.11 en la 8.10, el controlador LQG resultante es una solución del problema de control óptimo lineal cuadrático.

8.3.3. Simulación del sistema

La figura 3 muestra un diagrama básico del sistema controlado por el regulador LQG. Se pueden observar dos generadores de señal en dicho diagrama: la extracción se modela como una señal oscilatoria con la misma media que se observó en el experimento, esto es, $0,023m^3/m^3$. La amplitud, sin embargo, se redujo a 0,015, esto es, un 65% del valor máximo observado en el experimento, bajo la hipótesis -quizá demasiado optimista- de que la regulación automática ayudará a reducir las variaciones en la extracción; el error en la salida se modeló como la salida de un generador de ruido blanco aleatorio gaussiano (*Additive White Gaussian Noise*, AWGN), con la misma media y varianza observadas en el experimento.

Los resultados se muestran en la figura 8.7. El crecimiento diario de tronco es siempre positivo: estabilizado en torno a 55 micrómetros (el 90% del tiempo entre 46 y 64). La señal de riego fluctúa en torno a una media diaria de $0,58 \cdot ET_0$. Cambiar los valores de Q y R en el diseño del controlador LQR podría llevar a valores de TDF mayores a cambio de conseguir una oscilación superior.

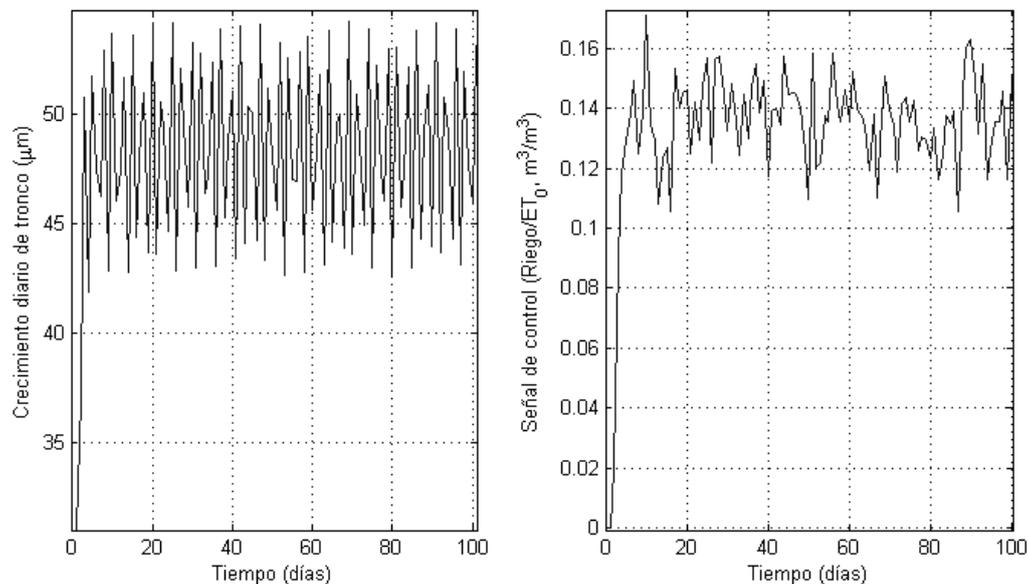


Figura 8.7: Resultados de la simulación: salida controlada (TDG) y señal de control (riego/ ET_0).

8.4. Conclusiones

Se llevó a cabo un experimento con almendros jóvenes en un entorno controlado para evaluar los efectos del riego deficitario en el contenido de agua en suelo y ciertos parámetros fenológicos. Considerando como prioridad del riego la estabilización de la fluctuación diaria de tronco TDF, se encontró una relación entre TDF, extracción de agua de suelo y riego.

El modelo resultante, en tiempo discreto, es un sistema lineal e invariante en el tiempo con dos entradas y una salida. El modelo fue ajustado y comprobado, logrando un R^2 próximo a 0,58, lo que resulta satisfactorio para un ensayo de campo pero revela la necesidad de un mayor número de experimentos para conseguir muestras en diversas circunstancias, especialmente meteorológicas; hay que recordar que el experimento se llevó a cabo en unas condiciones de temperatura y precipitaciones muy concretas, y siempre existe el riesgo de que el modelo esté excesivamente adaptado a esas condiciones.

A partir de este modelo, se diseñó un regulador lineal cuadrático LQR para mantener estable la fluctuación diaria de tronco. La extracción de agua del suelo, que es una de las entradas del controlador, no es un estado accesible para él, por lo que se añadió al diseño un estimador por filtro de Kalman para estimar su efecto en los estados, formando así un regulador Lineal Cuadrático Gaussiano (LQG).

En las simulaciones realizadas, el controlador automático resultante parece estabilizar el crecimiento de tronco. El siguiente paso debería ser llevar a cabo un ensayo con este controlador para validar los resultados.

Capítulo 9

Conclusiones

A partir de un modelo ya existente de la evolución temporal de agua en suelo a escala de cuenca, se propusieron modificaciones a éste para convertirlo en un modelo de parámetros distribuidos para la monitorización temporal y espacial de la misma variable a menor escala, teniendo en cuenta las particularidades orográficas del medio y el sistema de laboreo empleado. Para ello, se tuvieron en cuenta efectos como distintas estaciones, diferentes profundidades de zona radicular, aportes laterales entre sectores contiguos y escorrentía. Una vez establecidas esas modificaciones, se aplicó este modelo a una parcela donde se ha estado llevando a cabo un experimento a largo plazo de monitorización de agua en suelo con distintos tipos de laboreo.

El primer problema afrontado fue la calidad de los datos obtenidos por los sensores de humedad. Ante la falta de fiabilidad de los sensores, provocada por un tipo de suelo particularmente poco propicio para las sondas capacitivas disponibles en el experimento, se propuso un nuevo modelo de calibración mixto campo-laboratorio. Se consiguió así una calibración específica para el tipo de suelo de la parcela en un entorno controlado. La obtención de la humedad volumétrica a partir de los datos gravimétricos permitió una calibración más fiable y eficiente de los sensores de humedad en suelo.

Ante los problemas planteados por las calibraciones tradicionales, se emplearon redes neuronales artificiales; los resultados mostraron una mejora sustancial en la fiabilidad de la calibración empleando esta herramienta, propo-

niéndose un modelo de calibración basado en el empleo de varios sensores simultáneamente para afrontar el problema del control de calidad de los datos.

Una vez obtenidos datos fiables de humedad, se pudo afrontar el problema del modelo de parámetros distribuidos. En primer lugar, se programó un entorno de simulación siguiendo el paradigma de orientación a objetos empleando el software matemático Matlab®. Terminada esta fase de diseño, se llevó a cabo un ajuste de los parámetros del modelo mediante el método de mínimos cuadrados. Seguidamente, con los parámetros ya identificados, se empleó el entorno de simulación para la prueba de distintos controladores automáticos. Dichos controladores, basados en la técnica clásica de regulación PID, estabilizaron los sistemas en torno al nivel de humedad deseado reaccionando satisfactoriamente frente a perturbaciones.

En paralelo a este modelo para el estudio del agua en el suelo, primer componente del sistema Suelo-Planta-Atmósfera, se estudió el uso del agua en el segundo de estos componentes: la planta.

El Riego Deficitario, en una situación de escasez de medios hídricos, supone una alternativa lógica para el agricultor que se vea obligado a restringir el aporte de agua para su cultivo con el menor efecto posible sobre la producción. La creación de modelos permiten a un usuario ajustar su consumo de agua y predecir con facilidad el comportamiento de su cultivo, ayudándole a decidir la mejor estrategia de riego.

Se llevaron a cabo dos experimentos en cultivo de cítricos, para estudiar los efectos del Riego Deficitario sobre la producción tanto a largo plazo como en campañas aisladas. El segundo experimento se centró en provocar niveles de estrés diferentes en distintos periodos fenológicos del cultivo para observar la influencia sobre la producción final de estos periodos.

El primero de estos ensayos permitió observar un fenómeno interesante: en el cultivo de cítricos en condiciones climatológicas semi-áridas, un déficit hídrico prolongado no provoca una respuesta creciente en el tiempo; la planta es capaz de mitigar de forma gradual los efectos de ese estrés, siguiendo un patrón de comportamiento oscilatorio a lo largo del tiempo hasta que se alcance un equilibrio. Por lo tanto, se concluye que la variable temporal es tan importante como el nivel de estrés empleado a la hora de evaluar los efectos que sobre la producción tiene la aplicación de Riego Deficitario. Se diseñó un modelo que represente de forma suficientemente fidedigna esta evolución.

El segundo ensayo sobre cultivo de cítricos se centró en los efectos que tiene la aplicación de Riego Deficitario en distintos periodos fenológicos del cultivo sobre la producción de cítricos. Se observó que la fase de floración resulta crítica a la hora de mantener la pérdida de producción a niveles mínimos. Se desarrolló un modelo con términos cruzados que represente la dependencia con respecto no sólo al periodo fenológico en el que se aplicó el estrés sino a lo ocurrido en los periodos anteriores.

Estos dos modelos (si bien el primero de ellos sufrió una modificación) se unieron para desarrollar técnicas de planificación y control automático de regadíos para aplicar Riego Deficitario buscando la optimización de la producción, de la productividad del agua y, sobre todo, del beneficio económico. Se simuló los efectos de aplicar este tipo de políticas a largo plazo y se programó y desplegó una aplicación web de asistencia al regante que, a partir de las necesidades teóricas de un cultivo de cítricos y la restricción hídrica deseada (o, más bien, impuesta por las necesidades), ofrece las cantidades de agua que debe aplicar en cada periodo.

Finalmente, se llevó a cabo un estudio de los efectos del regadío sobre otro cultivo leñoso: el almendro. Sin embargo, en este caso, en lugar de estudiar el efecto económico (esto es, sobre la producción), se observó una magnitud fisiológica como el crecimiento diario del tronco: se diseñó e identificó un modelo dinámico que representa la dependencia entre esta variable fisiológica y el riego. Una vez establecido este modelo, se diseñó un controlador LQG con observador por filtro de Kalman que mantenga el crecimiento de tronco estable dentro de los niveles deseados.

A lo largo de todo este trabajo de Tesis Doctoral se han planteado modelos para representar tanto el comportamiento como los efectos del agua en la agricultura en distintas circunstancias: secano y regadío, distintos cultivos, e incluso distintos puntos de vista. A partir de esos modelos, se han propuesto técnicas de planificación, control y optimización del uso de este agua.

Se han empleado, en suma, distintas herramientas matemáticas, informáticas y de ingeniería con el objetivo de facilitar nuestro conocimiento de una sustancia cuya importancia es tan grande que se emplea como sinónimo de vida.

Bibliografía

- AGGARWAL, P.K.: «Impact of climate change on Indian agriculture.» *Journal of Plant Biology*, 2003, **30**, pp. 189–198.
- AKYILDIZ, IAN F; SU, WEILIAN; SANKARASUBRAMANIAM, YOGESH y CAYIRCI, ERDAL: «Wireless sensor networks: a survey». *Computer networks*, 2002, **38(4)**, pp. 393–422.
- AL-JAMAL, M.S.; SAMMIS, T.W.; BALL, S. y SMEAL, D.: «Computing the crop water production function for onion.» *Agricultural Water Management*, 2000, **46**, pp. 29–41.
- AL-KUFAISHI, SA; BLACKMORE, BS y SOURELL, H: «The feasibility of using variable rate water application under a central pivot irrigation system». *Irrigation and Drainage Systems*, 2006, **20(2-3)**, pp. 317–327.
- ALEXANDRATOS, NIKOS; BRUINSMA, JELLE y otros: «World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision». *Informe técnico*, ESA Working paper Rome, FAO, 2012.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. y SMITH, M.: *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. volumen 56 de *FAO Irrigation and Drainage*. United Nations Food and Agriculture Organization, Roma, Italia, 1998.
- ALLEY, WILLIAM M.: «On the Treatment of Evapotranspiration, Soil Moisture Accounting, and Aquifer Recharge in Monthly Water Balance Models». *Water Resources Research*, 1984, **20(8)**, pp. 1137–1149. ISSN 1944-7973. doi: 10.1029/WR020i008p01137.
<http://dx.doi.org/10.1029/WR020i008p01137>

- ANTHES, R.A. y MOORE, B.: *Earth Science and Applications from Space:: National Imperatives for the Next Decade and Beyond*. National Academies Press, 2007.
- ARAUZO, M.; MARTÍNEZ BASTIDA, J.J.; VALLADOLID, M. y HERNÁIZ, P.J.: «Comparación de un método directo y un método indirecto para la estimación del drenaje y el balance hídrico en la zona no saturada.» En: *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, volumen VII. Córdoba, 2007.
- ARBAT, G.; PUIG-BARGUÉS, J.; DURAN-ROS, M.; BARRAGÁN, J. y DE CARTAGENA, F. RAMÍREZ: «Drip-Irrigation: Computer software to simulate soil wetting patterns under surface drip irrigation». *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, **98(0)**, pp. 183 – 192. ISSN 0168-1699. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.009>.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169913001877>
- ARRIAGA, J.; GARCÍA-TEJERO, I.F.; MURIEL-FERNÁNDEZ, J.L.; DURÁN-ZUAZO, V.H. y RUBIO, F.R.: «Modeling, Simulation and Control of Irrigation on Young Almond Trees». En: *VII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 1038*, pp. 479–486, 2012.
- ÅSTRÖM, K.J. y HÄGGLUND, T.: *Advanced PID Control*. Research Triangle Park, N.C., EE.UU., 2006.
- AZAIEZ, M.N.: «Modeling optimal allocation of deficit irrigation: application to crop production in Saudi Arabia». *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 2008, **7**, pp. 277–289.
- BANDARANAYAKE, WM; PARSONS, LR; BORHAN, MS y HOLETON, JD: «Performance of a capacitance-type soil water probe in a well-drained sandy soil». *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71(3)**, pp. 993–1002.
- BLONQUIST, JM; JONES, SCOTT B y ROBINSON, DA: «Standardizing Characterization of Electromagnetic Water Content Sensors. Part II: Evaluation of seven sensing systems.» *Vadose Zone Journal*, 2005, **4(4)**, pp. 1059–1069.
- BOGENA, HR; HUISMAN, JA; OBERDÖRSTER, C y VEREECKEN, H: «Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications». *Journal of Hydrology*, 2007, **344(1)**, pp. 32–42.
- BRÉDA, N.; HUC, R.; GRANIER, A. y DREYER, E.: «Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences». *Annals of Forest Science*, 2006, **63(6)**, pp. 625–644.

- BRONER, ISRAEL y COMSTOCK, CARLTON R: «Combining expert systems and neural networks for learning site-specific conditions». *Computers and electronics in agriculture*, 1997, **19(1)**, pp. 37–53.
- BULL, L.J. y KIRKBY, M.J.: *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*. capítulo Dryland river characteristics and concepts. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, EE.UU., 2002.
- BURGESS, SSO y BLEBY, TM: «Redistribution of soil water by lateral roots mediated by stem tissues». *Journal of Experimental Botany*, 2006, **57(12)**, pp. 3283–3291.
- BYUNG-GOOK, L. y YUNBEOM, P.: «Approximate conversion of rational Bézier curves.» *Journal of the Korean Society for Industrial and Applied Mathematics (KSIAM)*, 1998, **2**, pp. 88–93.
- CHALMERS, D.J.; BURGE, G.; JERIE, P.H. y MITCHELL, P.D.: «The mechanism of regulation of Bartlett pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation.» *Journal of the American Society of Horticultural Sciences*, 1986, **111**, pp. 904–907.
- CHEN, YONGPING y OR, DANI: «Geometrical factors and interfacial processes affecting complex dielectric permittivity of partially saturated porous media». *Water resources research*, 2006, **42(6)**.
- CLUMPNER, G. y K., SOLOMON.: «Accuracy and geographic transferability of crop water production functions.» *Proceedings of the Conference on Irrigation Systems for the 21st Century*, Portland, OR, EE.UU., 1987.
- COSH, M.H.; JACKSON, T.J.; BINDLISH, R.; FAMIGLIETTI, J.S y RYU, D.: «Calibration of an impedance probe for estimation of surface soil water content over large regions». *Journal of Hydrology*, 2005, **311(1)**, pp. 49–58.
- CUTHBERT, M. O.; MACKAY, R. y NIMMO, J. R.: «Linking soil moisture balance and source-responsive models and source-responsive models to estimate diffuse and preferential components of groundwater recharge». *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17(3)**, pp. 1003–1019. doi: 10.5194/hess-17-1003-2013.
<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/1003/2013/>
- DAI, XIAOQIN; HUO, ZAILIN y WANG, HUIMIN: «Simulation for response of crop yield to soil moisture and salinity with artificial neural network». *Field Crops Research*, 2011, **121(3)**, pp. 441–449.

- DEARDORFF, JW: «A parameterization of ground-surface moisture content for use in atmospheric prediction models». *Journal of Applied Meteorology*, 1977, **16(11)**, pp. 1182–1185.
- DEJONGE, KENDALL C; KALEITA, AMY L y THORP, KELLY R: «Simulating the effects of spatially variable irrigation on corn yields, costs, and revenue in Iowa». *Agricultural water management*, 2007, **92(1)**, pp. 99–109.
- DELWORTH, T; MANABE, S y STOUFFER, RJ: «Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model». *Journal of Climate*, 1993, **6(11)**, pp. 1993–2011.
- DESA, UN: «World Population Prospects, The 2012 Revision». *New York: Department for Economic and Social Affairs*, 2013.
- DIAMOND, JARED: *Collapse: How societies choose to fail or succeed*. Viking Press, New York, EE.UU, 2005. ISBN 0-14-303655-6.
- DICKSON, R.E. y TOMLINSON, P.T.: «Oak growth, development and carbon metabolism in response to water stress». *Annals of Forest Science*, 1996, **53(2-3)**, pp. 181–196.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, y A.: *Yield response to water*. volumen 33 de *FAO Irrigation and Drainage*. United Nations Food and Agriculture Organization, Roma, Italia, 1979.
- DOORENBOS, J. y PRUITT, W.O.: *Crop water requirements*. volumen 24 de *FAO Irrigation and Drainage*. United Nations Food and Agriculture Organization, Roma, Italia, 1977.
- DORMAND, JOHN R y PRINCE, PETER J: «A family of embedded Runge-Kutta formulae». *Journal of computational and applied mathematics*, 1980, **6(1)**, pp. 19–26.
- DOWNWARD, S.R. y TAYLOR, R.: «An assessment of Spain's Programa AGUA and its implications for sustainable water management in the province of Almería, SE Spain.» *Journal of Environmental Management*, 2007, **82**, pp. 288–289.
- EAGLESON, PETER S: «Climate, soil, and vegetation: 1. Introduction to water balance dynamics». *Water Resources Research*, 1978, **14(5)**, pp. 705–712.
- : *Ecohydrology: Darwinian expression of vegetation form and function*. Cambridge University Press, 2002.

- ELSHORBAGY, AMIN y PARASURAMAN, K: «On the relevance of using artificial neural networks for estimating soil moisture content». *Journal of Hydrology*, 2008, **362(1)**, pp. 1–18.
- ENGLISH, M. y RAJA, S.N.: «Perspectives on deficit irrigation.» *Agricultural Water Management*, 1996, **32**, pp. 1–14.
- ESYRCE: *Encuesta sobre Superficies y Rendimientos*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, 2014.
- FAMIGLIETTI, JAMES S; RYU, DONGRYEOL; BERG, AARON A; RODELL, MATTHEW y JACKSON, THOMAS J: «Field observations of soil moisture variability across scales». *Water Resources Research*, 2008, **44(1)**.
- FAMIGLIETTI, J.S. y WOOD, E.F.: «Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes». *Water Resources Research*, 1994, **30(11)**, pp. 3061–3078.
- FAO98: *World reference base for soil resources*. United Nations Food and Agriculture Organization, Roma, Italia, 1998.
- FERERES, E. y SORIANO, M.A.: «Deficit irrigation for reducing agricultural water use.» *Journal of Experimental Botany*, 2007, **58**, pp. 147–159.
- FIELD, CHRISTOPHER B; BARROS, VICENTE R; MACH, K y MASTRANDREA, M: «Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability». *Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2014.
- FLETCHER, R. y POWELL, M.J.D.: «A rapidly convergent descent method for minimization.» *Computer Journal*, 1963, **6**, pp. 163–168.
- FLINT, LORRAINE E; FLINT, ALAN L; THORNE, JAMES H y BOYNTON, RYAN: «Fine-scale hydrologic modeling for regional landscape applications: the California Basin Characterization Model development and performance». *Ecological Processes*, 2013, **2(1)**, 25. doi: 10.1186/2192-1709-2-25.
<http://dx.doi.org/10.1186/2192-1709-2-25>
- GARCÍA-TEJERO, I.; DURÁN-ZUAZO, V.H.; JIMÉNEZ-BOCANEGRA, J.A. y MURIEL-FERNÁNDEZ, J.L.: «Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus orchards.» *Functional Plant Biology*, 2011a, **38**, pp. 106–117.

- GARCÍA-TEJERO, I.; DURÁN-ZUAZO, V.H.; MURIEL-FERNÁNDEZ, J.L. y RODRÍGUEZ-GARCÍA, G.: «Benefits of low-frequency irrigation in citrus orchards.» *Agronomy for Sustainable Development*, 2011b, **31**, pp. 779–791.
- GARCÍA-TEJERO, I.; JIMÉNEZ, J.A.; REYES, M.C.; CARMONA, A.; PÉREZ, R. y MURIEL, J.L.: «Aplicación de caudales limitados de agua en plantaciones de cítricos del valle del Guadalquivir.» *Fruticultura Profesional*, 2008, **173**, pp. 5–17.
- GEDNEY, NICOLA; COX, PM; BETTS, RA; BOUCHER, O; HUNTINGFORD, C y STOTT, PA: «Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records». *Nature*, 2006, **439(7078)**, pp. 835–838.
- GILL, P.E.; MURRAY, W. y WRIGHT, M.H.: *Practical optimization*. Academic Press, London - New York, 1981.
- GOLDHAMER, D.A. y FERERES, E.: «Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements». *Irrigation Science*, 2001, **20(3)**, pp. 115–125. ISSN 0342-7188. doi: 10.1007/s002710000034.
<http://dx.doi.org/10.1007/s002710000034>
- GOLDHAMMER, D.A. y SALINAS, M.: «Evaluation of regulated deficit irrigation on mature orange trees grown under high evaporative demand.» *Proceedings of the 9th Congress of the International Society of Citriculture, Global Citrus Germplasm network, Orlando, FL, EE.UU.*, 2000, pp. 227–231.
- GONZÁLEZ-ALTOZANO, P. y CASTEL, J.R.: «Regulated deficit irrigation on Clementina de Nules citrus trees. II. Vegetative growth.» *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2000, **75**, pp. 388–392.
- : «Riego deficitario controlado en Clementina de Nules I. Efectos sobre la producción y la calidad de la fruta.» *Spanish Journal of Agricultural Resources*, 2003, **1**, pp. 81–92.
- GREENE, D.H. y KNUTH, D.E.: *Mathematics for the Analysis of Algorithms*. Birkhäuser, Boston, MA, EE.UU., 2008.
- GUO, SHENGLIAN; WANG, JINXING; XIONG, LIHUA; YING, AIWEN y LI, DING-FANG: «A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China.» *Journal of Hydrology*, 2002, **268(1-4)**, pp. 1 – 15. ISSN 0022-1694. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00075-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00075-6).
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169402000756>

- GUTIERREZ, JOSE A; NAEVE, MARCO; CALLAWAY, ED; BOURGEOIS, MONIQUE; MITTER, VINAY y HEILE, BOB: «IEEE 802.15. 4: a developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks». *network, IEEE*, 2001, **15(5)**, pp. 12–19.
- HAMDY, A. y KATERKI, N.: *Water Crisis in the Arab World. Analysis and Solutions*. IAM - Bari Editor, 2006.
- HANKS, R.J.: «Model for predicting plant yield as influenced by water use.» *Agronomy Journal*, 1974, **66**, pp. 660–665.
- : «Yield and water use relationships: an overview.» En: H.M. Taylor (Ed.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production.*, pp. 393–412. American Society of Agronomy, Madison, WI, EE.UU., 1983.
- HEXEM, R.W. y HEADY, E.O.: *Water Production Functions for Irrigated Agriculture*. Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University Press, Ames, Iowa, EE.UU., 1978.
- HOPMANS, J. W. y SIMUNEK, J.: *Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. capítulo Review of inverse estimation of soil hydraulic properties., pp. 643–659. University of California, Riverside, CA, EE.UU., 1999.
- Horizonte 2015: *Estrategia nacional para la modernización sostenible de los regadíos H2015: informe de sostenibilidad ambiental*. Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, Madrid, 2010.
- HOUNDARI, M. y AZAIEZ, M.N.: «Optimal cropping patterns under water deficit.» *European Journal of Operational Research*, 2001, **130**, pp. 133–146.
- IPCC2001b: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2001.
- JENSEN, M.E.: «Water consumption by agricultural plants.» En: T.T. Kozlowski (Ed.), *Water Deficit and plant growth*, volumen 2, pp. 1–22. Academic Press, New York, NY, EE.UU., 1968.
- JIMÉNEZ-BOCANEGRA, J.A.; GARCÍA-TEJERO, I.F.; VANDERLINDEN, K.; PEREA, F. y MURIEL, J.L.: «Balance de agua en suelos arcillosos bajo laboreo convencional y siembra directa.» En: *Actas del Congreso Internacional sobre Agricultura de Conservación. El reto de la Agricultura, el Medio Ambiente, la Energía y la nueva Política Agraria Común.*, pp. 397 – 402. Córdoba. ISBN ISBN 84-930144-4-3, 2005.

- JONES, P.G. y THORNTON, P.K.: «The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055.» *Global Environmental Change*, 2003, **13**, pp. 51–59.
- JONES, SCOTT B; BLONQUIST, JM; ROBINSON, DA; RASMUSSEN, V PHILIP y OR, D: «Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors. Part I: Methodology.» *Vadose Zone Journal*, 2005, **4(4)**, pp. 1048–1058.
- J.R., RAGAZZINI y L.A., ZADEH: «Transactions of the American Institute of Electrical Engineers». *The analysis of sampled-data systems.*, 1952, **71**, pp. 225–234.
- KALMAN, R.E.: «A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems.» *Journal of Basic Engineering*, 1960, **82**, pp. 35–45.
- KIPKORIR, E.C.; RAES, D. y MASSAWE, B.: «Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya.» *Agricultural Water Management*, 2002, **56**, pp. 229–240.
- KIZITO, F.; CAMPBELL, C.S.; CAMPBELL, G.S.; COBOS, D.R.; TEARE, B.L.; CARTER, B. y HOPMANS, J.W.: «Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor». *Journal of Hydrology*, 2008, **352(3)**, pp. 367–378.
- KOSTER, RANDAL D; DIRMEYER, PAUL A; GUO, ZHICHANG; BONAN, GORDON; CHAN, EDMOND; COX, PETER; GORDON, CT; KANAE, SHINJIRO; KOWALCZYK, EVA; LAWRENCE, DAVID y otros: «Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation». *Science*, 2004, **305(5687)**, pp. 1138–1140.
- KOSTER, RANDAL D; SUAREZ, MAX J y HEISER, MARK: «Variance and predictability of precipitation at seasonal-to-interannual timescales». *Journal of hydrometeorology*, 2000, **1(1)**, pp. 26–46.
- KOZLOWSKI, T.T. y PALLARDY, S.G.: «Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses». *The Botanical Review*, 2002, **68(2)**, pp. 270–334. ISSN 0006-8101.
- KUMAR, S.V.; REICHLE, R.H.; PETERS-LIDARD, C.D.; KOSTER, R.D.; ZHAN, X.; CROW, W.T.; EYLANDER, J.B. y HOUSER, P.R.: «A land surface data assimilation framework using the land information system: Description and applications». *Advances in Water Resources*, 2008, **31(11)**, pp. 1419–1432.
- KUČERA: «The discrete Ricatti equation of optimal control». *Kybernetika*, 1972, **8(5)**, pp. 430–447.

- LAIO, F.; PORPORATO, A.; RIDOLFI, L. y RODRÍGUEZ-ITURBE, I.: «Plants in water-controlled ecosystems: Active role in hydrologic processes and response to water stress. II: Probabilistic soil moisture dynamics». *Advanced Water Resources*, 2001, **24**(7), pp. 707–724.
- LANDERAS, GORKA; ORTIZ-BARREDO, AMAIA y LÓPEZ, JOSE JAVIER: «Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain)». *Agricultural water management*, 2008, **95**(5), pp. 553–565.
- LINTON, L.R. y HARDER, L.D.: *Biology 315 - Quantitative Biology Lecture Notes*. University of Calgary, Calgary, AB, Canadá, 2007.
- MANFREDA, SALVATORE; MCCABE, MATTHEW F; FIORENTINO, MAURO; RODRÍGUEZ-ITURBE, IGNACIO y WOOD, ERIC F: «Scaling characteristics of spatial patterns of soil moisture from distributed modelling». *Advances in water resources*, 2007, **30**(10), pp. 2145–2150.
- MARGAT, J. y VALLÉE, D.: «Démographie en Méditerranée.» *Options Méditerranéennes Série A*, 1997, **31**, pp. 3–16.
- MARIOLAKOS, I.: «Water resources management in the framework of sustainable development.» *Desalination*, 2007, **217**, pp. 147–151.
- MARM: *La nueva política del agua en los regadíos Españoles. Informe Conjunto*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, Madrid, 2008.
- MARQUARDT, DONALD W: «An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters». *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 1963, **11**(2), pp. 431–441.
- MARTIN, D.L.; WATTS, D.G. y GILLEY, J.R.: «Model and production function for irrigation management.» *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1984, **110**, pp. 149–164.
- Mathworks: *Documentación de MATLAB*. The Mathworks, Inc., Natick, MA, EE.UU., 2012. www.mathworks.com/help.
- MCCORMACK, ANTHONY S y GODFREY, KEITH R: «Rule-based autotuning based on frequency domain identification». *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 1998, **6**(1), pp. 43–61.

- MCCULLOCH, WARREN S y PITTS, WALTER: «A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity». *The bulletin of mathematical biophysics*, 1943, **5(4)**, pp. 115–133.
- MEHROTRA, S.: «On the Implementation of a Primal-Dual Interior Point Method». *SIAM Journal on Optimization*, 1992, **2(4)**, pp. 575–601.
- MERLIN, O.; WALKER, J.P.; KALMA, J.D.; KIM, E.J.; HACKER, J.; PANCIERA, R.; YOUNG, R.; SUMMERELL, G.; HORNBUCKLE, J.; HAFEEZ, M. y otros: «The NAFE'06 data set: Towards soil moisture retrieval at intermediate resolution». *Advances in Water Resources*, 2008, **31(11)**, pp. 1444–1455.
- MILLY, PAUL CD; DUNNE, KATHRYN A y VECCHIA, ALDO V: «Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate». *Nature*, 2005, **438(7066)**, pp. 347–350.
- MINSKY, MARVIN L y PAPERT, SEYMOUR A: *Perceptrons - Expanded Edition: An Introduction to Computational Geometry*. MIT press, Cambridge, MA, EE.UU., 1969.
- MITTELBACH, HEIDI; CASINI, FRANCESCA; LEHNER, IRENE; TEULING, ADRIAAN J y SENEVIRATNE, SONIA I: «Soil moisture monitoring for climate research: Evaluation of a low-cost sensor in the framework of the Swiss Soil Moisture Experiment (SwissSMEX) campaign». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, 2011, **116(D5)**.
- MORIANA, A. y FERERES, E.: «Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees.» *Irrigation Science*, 2002, **21**, pp. 83–90.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D. y VEITH, T.L.: «Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.» *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), St. Joseph, MI, EE.UU.*, 2007, **50**, pp. 885–900.
- MORSHED, JAHANGIR y KALUARACHCHI, JAGATH J: «Application of artificial neural network and genetic algorithm in flow and transport simulations». *Advances in Water Resources*, 1998, **22(2)**, pp. 145–158.
- MURTY, K.G.: *Linear programming*. John Wiley & Sons Inc., New York, EE.UU., 1983.
- NASH, J.E. y SUTCLIFFE, J.V.: «River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles». *Journal of Hydrology*, 1970, **10**, pp. 282–290.

- OGATA, K.: *Sistemas de control en tiempo discreto*. Prentice Hall Hispanoamericana, Naucalpán de Juárez, México, 1996.
- : *Modern Control Engineering*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, EE.UU., 4thª edición, 2001.
- OLESEN, J.E. y BINDI, M.: «Consequences of climate change for European Agricultural productivity, land use and policy.» *European Journal of Agronomy*, 2002, **16**, pp. 239–262.
- OLIVEIRA, RAFAEL S; DAWSON, TODD E; BURGESS, STEPHEN SO y NEPSTAD, DANIEL C: «Hydraulic redistribution in three Amazonian trees». *Oecologia*, 2005, **145(3)**, pp. 354–363.
- OPPENHEIM, A.V. y SCHAFER, R.W.: *Discrete-time signal processing*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, EE.UU., 1999.
- OWE, MANFRED; DE JEU, RICHARD y HOLMES, THOMAS: «Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture». *Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003-2012)*, 2008, **113(F1)**.
- PAUL, S.; PANDA, S.N. y KUMAR, D.N.: «Optimal irrigation allocation: a multilevel approach.» *Journal of Irrigation Engineering*, 2000, **126**, pp. 149–156.
- PORPORATO, A.; D'ODORICO, P.; LAIO, F.; RIDOLFI, L. y RODRIGUEZ-ITURBE, I: «Ecohydrology of water-controlled ecosystems». *Advances in Water Resources*, 2002, **25(8)**, pp. 1335–1348.
- POZAR, D.M.: *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.
- PUMA, MICHAEL J; CELIA, MICHAEL A; RODRIGUEZ-ITURBE, IGNACIO y GUSWA, ANDREW J: «Functional relationship to describe temporal statistics of soil moisture averaged over different depths». *Advances in Water Resources*, 2005, **28(6)**, pp. 553–566.
- RAO, N.H.; SARMA, P.B.S. y CHANDER, S.: «A simple dated water production function for use in irrigated agriculture». *Agricultural Water Management*, 1988, **13**, pp. 25–32.
- REANEY, S.M.; BRACKEN, L.J. y KIRKBY, M.J.: «Use of the connectivity of runoff model (CRUM) to investigate the influence of storm characteristics on runoff generation and connectivity in semi-arid areas.» *Hydrological Processes*, 2007, **21(7)**, pp. 894–906.

- REN, DIANDONG y XUE, MING: «A revised force-restore model for land surface modeling». *Journal of Applied Meteorology*, 2004, **43(11)**, pp. 1768–1782.
- RÄISÄNEN, J: «CO₂-induced climate change in CMIP2 experiments. Quantification of agreement and role of internal variability.» *Journal of Climate*, 2001, **14**, pp. 2088–2104.
- ROBINSON, DA; CAMPBELL, CS; HOPMANS, JW; HORNBUCKLE, BK; JONES, SCOTT B; KNIGHT, R; OGDEN, F; SELKER, J y WENDROTH, O: «Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review». *Vadose Zone Journal*, 2008, **7(1)**, pp. 358–389.
- ROBINSON, DA; JONES, SCOTT B; WRAITH, JM; OR, D y FRIEDMAN, SP: «A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry». *Vadose Zone Journal*, 2003, **2(4)**, pp. 444–475.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; PORPORATO, A.; RIDOLFI, L.; ISHAM, V. y COX, D.R.: «Probabilistic modelling of water balance at a point: The role of climate, soil and vegetation». *Proceedings of the Royal Society of London, Serie A*, 1999, **455**, pp. 3789–3805..
- RODRIGUEZ-ITURBE, I; PORPORATO, A; LAIO, F y RIDOLFI, LUCA: «Plants in water-controlled ecosystems: Active role in hydrologic processes and response to water stress: I. Scope and general outline». *Advances in Water Resources*, 2001, **24(7)**, pp. 695–705.
- RODRIGUEZ-ITURBE, IGNACIO: «Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics». *Water Resources Research*, 2000, **36(1)**, pp. 3–9.
- ROMERO, O.; BOTIA, P. y GARCIA, F: «Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees.» *Plant Soil*, 2004, **260**, pp. 169–181.
- ROSENBLATT, FRANK: «The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain.» *Psychological review*, 1958, **65(6)**, p. 386.
- RUBIO, F.R. y LÓPEZ, M.J.: *Control Adaptativo y Robusto*. Universidad de Sevilla, Sevilla, 1996.
- RUMELHART, DAVID E; HINTON, GEOFFREY E y WILLIAMS, RONALD J: «Learning representations by back-propagating errors». *Nature*, 1986, **323**, pp. 533–536.

- RYEL, R; CALDWELL, M; YODER, C; OR, D y LEFFLER, A: «Hydraulic redistribution in a stand of *Artemisia tridentata*: evaluation of benefits to transpiration assessed with a simulation model». *Oecologia*, 2002, **130**(2), pp. 173–184.
- SADLER, EJ; EVANS, RG; STONE, KC y CAMP, CR: «Opportunities for conservation with precision irrigation». *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, **60**(6), pp. 371–378.
- SAKAKI, TOSHIHIRO; LIMSUWAT, ANUCHIT; SMITS, KATHLEEN M y ILLANGASEKARE, TISSA H: «Empirical two-point α -mixing model for calibrating the ECH2O EC-5 soil moisture sensor in sands». *Water resources research*, 2008, **44**(4).
- SAMMIS, T.W.: «Yield of alfalfa and cotton as influenced by irrigation.» *Agronomy Journal*, 1981, **73**, pp. 323–329.
- SCHAAP, MARCEL G y LEIJ, FEIKE J: «Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity». *Soil and Tillage Research*, 1998, **47**(1), pp. 37–42.
- SCHLOSSNAGLE, G.: *Advanced PHP Programming*. Sams Publishing, 2004.
- SCHULTZ, ALFRED y WIELAND, RALF: «The use of neural networks in agroecological modelling». *Computers and Electronics in Agriculture*, 1997, **18**(2), pp. 73–90.
- SEVERINI, S. y CORTIGNANI, R.: «Introducing deficit irrigation crop techniques derived by crop growth models into a positive mathematical programming model.» *12th Congress of the European Association of Agricultural Economists (EAAE), The Hague*, 2008.
- SHIDEED, K.; T., OWEIS; M., GABR y OSMAN, M.: *Assessing on-farm water-use efficiency: a new approach*. ICARDA/ESCWA Editions, Aleppo, Siria., 2005.
- SOLOMON, S.; QIN, M., D. MANNING; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M. y MILLER, H.L. (Eds.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EE.UU., 2007.
- SORENSEN, D.: «Newton's Method with a Model Trust Region Modification». *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1982, **19**(2), pp. 409–426. doi: 10.1137/0719026.
<http://dx.doi.org/10.1137/0719026>

- SOUTHWORTH, J.; RANDOLPH, J.C.; HABECK, M.; DOERING, O.C.; PFEIFER, R.A.; RAO, D.G. y JOHNSTON, J.J.: «Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the Midwestern United States.» *Agriculture, Ecosystems & Environment Journal*, 2000, **82**, pp. 139–158.
- SRIVASTAVA, NEELAM: «Challenges of next-generation wireless sensor networks and its impact on society». *arXiv preprint arXiv:1002.4680*, 2010.
- STEWART, J.I.; CUENCA, R.H.; PRUITT, W.O.; HAGAN, R.M. y TOSSE, J.: «Determination and utilization of water production functions for principal California crops. W-67 CA.» *Informe técnico*, University of California Davis, 1977. Contributing Project Report.
- STEWART, J.I. y HAGAN, R.H.: «Functions to predict effects of crop water deficits.» *Journal of Irrigation (Drainage Division)*, ASCE, 1973, **99**, pp. 421–439.
- SUMATHI, SAI y SIVANANDAM, S.N.: *Introduction to data mining and its applications*. Springer, Berlin/Heidelberg, Alemania, 2006.
- TEULING, AJ; UIJLENHOET, R; HUPET, FRANÇOIS; VAN LOON, EE; TROCH, PA y otros: «Estimating spatial mean root-zone soil moisture from point-scale observations». *Hydrology and Earth System Sciences Discussions Discussions*, 2006, **3(4)**, pp. 1447–1485.
- THOMPSON, RB; GALLARDO, M; VALDEZ, LC y FERNÁNDEZ, MD: «Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors». *Agricultural water management*, 2007, **92(1)**, pp. 13–28.
- THORNTON, C. W. y MATHER, J. R.: «The Water Balance». *Publications in Climatology*, 1955, **VIII(1)**, p. 104.
- THORNTON, CHARLES WARREN: «An approach toward a rational classification of climate». *Geographical review*, 1948, pp. 55–94.
- TOPP, GC; DAVIS, JL y ANNAN, AA P: «Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines». *Water resources research*, 1980, **16(3)**, pp. 574–582.
- TOPP, GC; ZEGELIN, S y WHITE, I: «Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils». *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64(4)**, pp. 1244–1252.
- TOTH, G. FEJES: «Covering the plane by convex discs». En: *Acta Mathematica Academiae Scientiarum Hungaricae*, volumen 23, pp. 263–270, 1972.

- TURRAL, H.; BURKE, J. y FAURÉS, J.M.: *Climate change, water and food security*. volumen 36 de *FAO Water Reports*. United Nations Food and Agriculture Organization, Roma, Italia, 2011.
- UNESCO: *Carte bioclimatique de la zone méditerranéenne*. UNESCO - FAO, Paris, Francia, 1963.
- URUEÑA, A.; VALDECASA, E.; BALLESTERO, M.P.; UREÑA, O.; ANTÓN, P.; CASTRO, R. y CÁRDENAS, S.: «La Sociedad en Red». *Informe técnico*, Secretaría de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información. Ministerio de Industria, Energía y Turismo., 2013.
- U.S. DoA, Soil Survey Staff: *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. United States Department of agriculture, Soil Survey Staff., Washington D.C., EE.UU., 1999.
- VANDERLINDEN, K.; JIMÉNEZ, J.A.; MURIEL, J.L.; PEREA, F.; GARCÍA, I. y MARTÍNEZ, G.: «Interpolation of soil moisture content aided by FDR sensor observations». En: *geoENV VI - Geostatistics for Environmental Applications*, pp. 397–407. Springer, 2008.
- VERECKEN, H; HUISMAN, JA; BOGENA, H; VANDERBORGHT, JAN; VRUGT, JA y HOPMANS, JW: «On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review». *Water resources research*, 2008, **44**(4).
- WALKER, JEFFREY P; WILLGOOSE, GARRY R y KALMA, JETSE D: «In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques». *Journal of Hydrology*, 2004, **293**(1), pp. 85–99.
- WANG, NING; ZHANG, NAIQIAN y WANG, MAOHUA: «Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective». *Computers and electronics in agriculture*, 2006, **50**(1), pp. 1–14.
- WILSON, DAVID J; WESTERN, ANDREW W; GRAYSON, RODGER B; BERG, AARON A; LEAR, MARY S; RODELL, MATTHEW; FAMIGLIETTI, JAMES S; WOODS, ROSS A y MCMAHON, THOMAS A: «Spatial distribution of soil moisture over 6 and 30cm depth, Mahurangi river catchment, New Zealand». *Journal of Hydrology*, 2003, **276**(1), pp. 254–274.
- WWAP2009: *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. World Water Assessment Programme, París, Francia y Londres, Reino Unido, unesco y earthscan\$ edición, 2009.

- XU, CHONG-YU: «From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches». *Progress in Physical Geography*, 1999, **23(2)**, pp. 229–249. doi: 10.1177/030913339902300204.
<http://ppg.sagepub.com/content/23/2/229.abstract>
- ZACHARIAS, I. y KOUSSOURIS, T.: «Sustainable water management in the European Islands». *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000, **25**, pp. 233–236.
- ZHANG, H. y OWEIS, T.: «Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region.» *Agricultural Water Management*, 1999, **38**, pp. 195–211.
- ZHANG, NAIQIAN; FAN, G; LEE, KH; KLUITENBERG, GJ y LOUGHIN, TM: «Simultaneous measurement of soil water content and salinity using a frequency-response method». *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68(5)**, pp. 1515–1525.
- ZIEGLER, JG y NICHOLS, NB: «Optimum settings for automatic controllers». *trans. ASME*, 1942, **64(11)**.
- ZOU, PING; YANG, JINGSONG; FU, JIANRONG; LIU, GUANGMING y LI, DONGSHUN: «Artificial neural network and time series models for predicting soil salt and water content». *Agricultural water management*, 2010, **97(12)**, pp. 2009–2019.