

Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Modelado y control del riego en suelos agrícolas

Autor: Francisco Javier Blanco Soto

Tutor: Francisco Rodríguez Rubio

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Modelado y control del riego en suelos agrícolas

Autor:

Francisco Javier Blanco Soto

Tutor:

Francisco Rodríguez Rubio

Catedrático de Universidad

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo de Fin de Grado: Modelado y control del riego en suelos agrícolas

Autor: Francisco Javier Blanco Soto

Tutor: Francisco Rodríguez Rubio

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

*A mi abuelo Manuel, a quien le
habría gustado ver este trabajo.*

Agradecimientos

Tras estos años de estudio universitario, han sido numerosos los obstáculos y retos afrontados. Ahora, al final del camino, es imposible no acordarse de todos los apoyos recibidos por parte de las personas que me rodean y que con su contribución facilitaron estas labores.

En primer lugar, a mi familia, pues sin su apoyo todo este proyecto no habría sido posible. Los consejos, el mantenimiento y la atención prestada fueron siempre un seguro para tener el control de las situaciones más complicadas, y el ánimo y constancia necesarios para llevar adelante este proyecto de vida.

También quiero mencionar a los amigos y compañeros, tanto anteriores a la universidad, como a aquellas amistades forjadas durante esta etapa, que aportaron el bienestar, el entusiasmo y el compañerismo a lo largo de los cuatro cursos. Sin ellos, llegar hasta aquí habría sido notablemente más difícil, sin esas explicaciones, sin esos apuntes, sin esas clases con ellos, sin esas conversaciones, en general, sin su confianza.

Me gustaría hacer una mención especial a mi compañera de piso, y de vida, Sheila, pues pasé los cuatro años conviviendo con ella, compartiendo cada labor, cada tarea y cada problema. Ha estado todo el tiempo conmigo.

A los profesores y personal docente, a la Escuela, y a mi tutor, a todos ellos por brindarme esta oportunidad de titularme y de compartir su tiempo, dedicación y conocimiento para formarme profesionalmente y también como persona.

Agradecer a todos aquellos que aportaron algo, un viaje, un apunte, una ayuda, unas palabras de ánimo, una conversación interesante, una compañía hasta casa, un gesto amable. Gracias a todos. Se cierra un ciclo para dar paso a uno nuevo, repleto de incertidumbre y retos, el cual miro con entusiasmo y gran expectación. Siempre hay que arrepentirse de realizar algo, nunca de haberlo dejado sin realizar, por eso toca arriesgar. Lo mejor está siempre por venir.

Por último, quiero agradecerme a mí mismo la paciencia y constancia que me han permitido llegar hasta aquí, y terminar este trabajo como nos han enseñado en la carrera, siendo autodidacta y dedicando trabajo. Rendirse no era una opción.

Francisco Javier Blanco Soto

Alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla

Sevilla, 2019

Resumen

El riego es un proceso agrícola consistente en el aporte de agua a los cultivos a través del suelo. El principal uso es satisfacer las necesidades hídricas de las plantas a falta de precipitaciones, y convertir el suelo en zonas y épocas de secano en un terreno apto para cultivos de regadío. Hay que tener en cuenta que el agua es un recurso más y, por tanto, está limitado para este y demás usos. En un mundo cuya población crece de forma irrefrenable y con desafíos adicionales como la amenaza de escasez en sequías y, en general, el cambio climático, la correcta distribución y gestión del agua es imperativo.

Diversos estudios se centran en el desarrollo de técnicas y herramientas para poder ofrecer una gestión más eficiente y sostenible del uso del agua. El presente trabajo se centra precisamente en la elaboración de un modelo del suelo, que matemáticamente relacionará la humedad presente en el mismo con el aporte de agua que reciba, con objeto de permitir la simulación del comportamiento del agua en el terreno.

Una vez obtenido el modelo del sistema y entendiendo su funcionamiento, el trabajo aborda diferentes estrategias de control. La idea es calcular e implementar a nivel de simulación controladores que sean capaces de mantener una humedad en suelo dada como referencia. La señal de control será, por tanto, el propio riego, es decir, la cantidad de agua necesaria para mantener el nivel de humedad deseado.

Por último, se detallan las conclusiones generales.

Debe entenderse la doble utilidad de este estudio teórico: por un lado, permite el cálculo del volumen de agua que hay que aportar al terreno para que mantenga el valor de humedad sin necesidad de aportar en exceso, útil para el ahorro y gestión eficiente. Por otro lado, el siguiente paso tras este estudio teórico sería la implementación real de los controladores en sistemas de riego que, con los pertinentes actuadores, serían capaces de regar el suelo agrícola de forma automática, sin necesidad de acción humana más allá del mantenimiento y supervisión del sistema.

Abstract

The watering is an agricultural process consisting on water contribution to the crops through the ground. The main purpose is satisfying the hydrological plant needs when precipitations lack. Also, the watering can turn the rainfed land to capable ground for irrigable crops. However, water is a limited resource, so it's necessary a right distribution and correct usage.

Studies are focused on the development of technologies for improve the efficient sustainable water usage. This class work has as objective the making of a mathematical model that relates relative humidity with provided water in the ground. This model will be usefull for simulations in software.

Having done that, the project broachs different control strategies, which objective is the implementation in the simulations. The control signal is the self watering, meaning the water amount that keeps the appropriate humidity level.

Finally, general conclusions are added at project end.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxi
Introducción	1
<i>1.1 Agricultura y agua en la actualidad</i>	2
<i>1.2 Objetivos del trabajo</i>	5
<i>1.3 Ámbito, metodología y estructura</i>	5
<i>1.4 Alcance y límites</i>	6
1 Modelado de Humedad en el Suelo	7
<i>1.1 Introducción</i>	7
<i>1.2 Modelo “leaky bucket”</i>	9
<i>1.3 Pérdidas y ganancias de agua en el cubo</i>	11
<i>1.4 Otras consideraciones por el terreno</i>	15
2 Simulación del Modelo	19
<i>2.1 Aplicación</i>	19
<i>2.2 Simulación</i>	23
<i>2.3 Simulación en estación húmeda y seca</i>	26
3 Control de Humedad en el Suelo	31
<i>3.1 Linealización y control en torno a un punto</i>	32
4 Control Realista de la Humedad	45
<i>4.1 Control de humedad en la parcela en ausencia de sensores</i>	46
<i>4.2 Control de humedad en la parcela por ganancia por tabla.</i>	51
Conclusiones	59
Referencias	61
Códigos	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Parámetros usados para mostrar la relación entre humedad y pérdidas por evapotranspiración	13
Tabla 1.2. Parámetros usados para mostrar la relación entre humedad y pérdidas por percolación.	15
Tabla 1.3. Valores típicos de capacidad de infiltración según el suelo. Fuente: FAO.	15
Tabla 2.1. Valores de la altitud media de cada celda, en metros.	21
Tabla 2.2. Valores de los parámetros utilizados.	23
Tabla 2.3. Valores de la altitud media de cada celda del plano auxiliar, en metros.	25
Tabla 4.1. Parámetros del sistema según tramo de funcionamiento.	52
Tabla 4.2. Relaciones aproximadas entre diferencias de humedad y altura.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Evolución de la población mundial. Fuente: OurWorldinData.org [5]	2
Figura I.2. Evolución del ratio de crecimiento. Fuente: OurWorldinData.org [6]	3
Figura I.3. Predicción del crecimiento poblacional. Fuente: OurWorldinData.org [13]	4
Figura 1.1. Resumen esquemático del conjunto	7
Figura 1.2. Pérdidas por evapotranspiración en función de la humedad	13
Figura 1.3. La humedad disminuye debido a las pérdidas de percolación. Fuente: [24]	14
Figura 1.4. Pérdidas por percolación en función de la humedad	14
Figura 1.5. Ciclo hidrológico terrestre. Fuente: [27]	16
Figura 2.1. Plano del terreno teórico objeto de estudio. Fuente: [30]	20
Figura 2.2. Plano del terreno representado por <i>mesh</i>	22
Figura 2.3. Plano del terreno representado con altura única en cada celda.	22
Figura 2.4. Montaje realizado en Simulink para la evaluación de la humedad en una celda a lo largo del tiempo	24
Figura 2.5. Evolución de la humedad en las nueve celdas centrales del plano auxiliar.	25
Figura 2.6. Histograma de precipitaciones en el plano auxiliar.	26
Figura 2.7. Histograma de precipitaciones mensuales medias en La Coruña.	27
Figura 2.8. Evolución de humedad en celdas del plano auxiliar en estación húmeda.	27
Figura 2.9. Precipitaciones durante la simulación de estación húmeda en el plano auxiliar.	28
Figura 2.10. Histograma de precipitaciones mensuales medias en Sevilla. Fuente: [33].	29
Figura 2.11. Promedio de días de lluvia por mes en Sevilla. Fuente: [34].	29
Figura 2.12. Evolución de humedad en celdas del plano auxiliar en estación seca.	30
Figura 2.13. Precipitaciones durante la simulación de estación seca en plano auxiliar.	30
Figura 3.1. Esquema de control. Las precipitaciones forman parte de las perturbaciones, y el riego es la señal de control	31
Figura 3.2. Respuesta del modelo ante tren de escalones.	32
Figura 3.3. Tren de escalones de 2 mm cada uno.	32
Figura 3.4.1 Humedad tras escalón positivo y negativo de 4 mm.	33
Figura 3.4.2 Humedad tras escalón positivo y negativo de 4 mm. Real Vs modelo.	34
Figura 3.5. Esquema con control incluido para una celda.	35
Figura 3.6. Control de humedad en una celda en estación seca.	36
Figura 3.7. Control de humedad en las celdas del plano auxiliar en estación seca.	36
Figura 3.8. Precipitaciones en estación seca.	37
Figura 3.9. Humedad tras escalón positivo y negativo de 8 mm, en estación húmeda. Modelo vs real	38

Figura 3.10. Control de humedad en una celda en estación húmeda.	39
Figura 3.11. Control de humedad en las celdas del plano auxiliar en estación húmeda.	39
Figura 3.12. Precipitaciones en estación húmeda.	40
Figura 3.13. Control de humedad en una celda en estación húmeda, con condición predictiva.	41
Figura 3.14. Control de humedad en las celdas del plano auxiliar en estación húmeda, con condición Predictiva	41
Figura 3.15. Control de humedad en una celda en estación húmeda, control P.	42
Figura 3.16. Control de humedad en las celdas del plano auxiliar en estación húmeda, control P.	43
Figura 4.0. Celdas en la parcela de estudio, dividida en ocho vecindades.	45
Figura 4.1. Esquema de control empleando el modelo linealizado como realimentación.	46
Figura 4.2. Control con realimentación por el modelo linealizado, Smod vs Sreal	47
Figura 4.3. Control con realimentación por el modelo linealizado, detalle de una celda	47
Figura 4.4. Esquema con control para la celda central con sensor.	48
Figura 4.5. Esquema con control para el resto de celdas de la vecindad.	49
Figura 4.6. Control tras la compensación en la primera vecindad.	49
Figura 4.7. Precipitaciones en estación húmeda.	50
Figura 4.8. Control ante de la compensación en la octava vecindad.	50
Figura 4.9. Control tras la compensación en la octava vecindad.	51
Figura 4.10. Prueba del control discreto del sistema.	53
Figura 4.11. Prueba del control discreto por tabla para varios puntos de operación.	54
Figura 4.12. Esquema para la simulación de celdas de la vecindad. Se aprecia que no hay realimentación de la salida del sistema.	56
Figura 4.13. Control para toda la vecindad primera, por tabla.	56
Figura 4.14. Señal de control para toda la vecindad primera, por tabla.	57
Figura 4.15. Control de una celda, por tabla, con estimación de humedad.	57

Notación

A^*	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Como queríamos demostrar
e.o.c.	En cualquier otro caso
e	número e
exp	exponencial
cos	Función coseno
sen	Función seno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
Sa	Función sampling
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de y respecto
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
\	Backslash
\Leftrightarrow	Si y sólo si
P	Controlador Proporcional
PI	Controlador Proporcional con efecto Integral
PD	Controlador Proporcional con efecto Derivativo
PID	Controlador Proporcional con efecto Integral y Derivativo

INTRODUCCIÓN

*Donde aparece la labranza, la siguen las demás artes.
Los campesinos son, por tanto, los fundadores de la civilización.
- Daniel Webster-*

La agricultura se puede definir como el conjunto de técnicas y conocimientos para cultivar la tierra [1]. Como actividad económica y de supervivencia de la especie humana, tiene su origen en colectividades humanas en el Paleolítico. En Oriente Próximo ya se recogían cereales y plantas de forma cada vez más regular hace 23.000 años, lo que se conoce como *The Broad Spectrum Revolution* (traducido: la Prolongada Revolución Agraria) según el profesor Mark B. Tauger de la Universidad de Virginia Occidental [2].

Llegadas las primeras civilizaciones, Egipto, Babilonia, Sumeria y el sur de Asia, los núcleos de población se organizaron en torno a ríos, lagos y orillas de mares. Destaca aquí la importancia del agua dulce como recurso clave para la supervivencia de la civilización: el agua no es sólo necesaria para consumirla, también lo es para las actividades básicas como la ganadería y la agricultura. En Egipto, utilizaban las crecidas del Nilo para obtener tierra fértil donde cultivaban cereales, legumbres y verduras. En la época de siembra, en octubre, los campesinos arrojaban semillas en los surcos que un arado tirado por vacas o bueyes hacían, y además construían canales que eran destruidos por la siguiente crecida. Tenían, por tanto, uno de los primeros sistemas de riego: cavaban pequeños canales que se llenaban de agua del Nilo, aunque también utilizaban cántaros [3].

En Babilonia y Sumeria, regiones que se situaban entre los ríos Tigris y Eúfrates, también se desarrolló una agricultura basada en regadío por inundación. En general, en el llamado “Creciente Fértil” se usó la agricultura en zonas de crecidas debido al poco desarrollo de técnicas de riego. En China, una zona más afectada por desastres naturales como inundaciones por el monzón o sequías, la agricultura tuvo que adaptarse e igualmente comenzó en terrenos de crecidas.

Queda patente la importancia de los recursos hídricos en la Antigüedad, y sobre todo la necesidad del desarrollo de nuevas formas de riego más eficientes, que permitan una independencia de la actividad agrícola de zonas de lodo y valles de ríos. Hasta aquí, todas las civilizaciones se han enfrentado a los mismos problemas: la necesidad y dependencia del agua, los efectos climáticos adversos y los cambios sociales-políticos (que son irrelevantes en este trabajo), si bien hay una clara diferencia climática según la zona en la que se asentaban. Por ejemplo, el clima mediterráneo es más estable que el sudeste asiático, pero más seco. En consecuencia, aquellas civilizaciones que no han sabido aprovechar o han sobreexplotado sus recursos han terminado en crisis, hambrunas o hasta por sucumbir: la deforestación conlleva a la erosión y desertización del suelo, ya que el agua retenida es menor a falta de raíces de plantas, haciendo que la idea de aprovechamiento de tierras fértiles por crecidas y monzones sea ineficaz [4].

Podrían enumerarse los numerosos avances en gestión del agua a lo largo de la historia, tales como los acueductos romanos o las norias que utilizaban los musulmanes en la península Ibérica, los sistemas de riego actuales y las innovaciones en materia de cultivo, como el sistema agrario feudal y el barbecho, pero el presente trabajo no pretende ser un trabajo de historia de la agricultura; esto sólo es una introducción para tener claros los antecedentes en la historia relacionados con la agricultura, la necesidad del agua y para contextualizar al lector.

Quedando destacada la importancia de los recursos hídricos para la vida y su disponibilidad, el siguiente punto es analizar en qué situación se encuentra la población actualmente.

I.1 Agricultura y agua en la actualidad

La población mundial hacia el año 1000 A.C. era de unos cincuenta millones de personas. Hacia el año 0, la población había aumentado hasta cerca de doscientos millones de personas. Actualmente, la población mundial supera los siete mil millones.

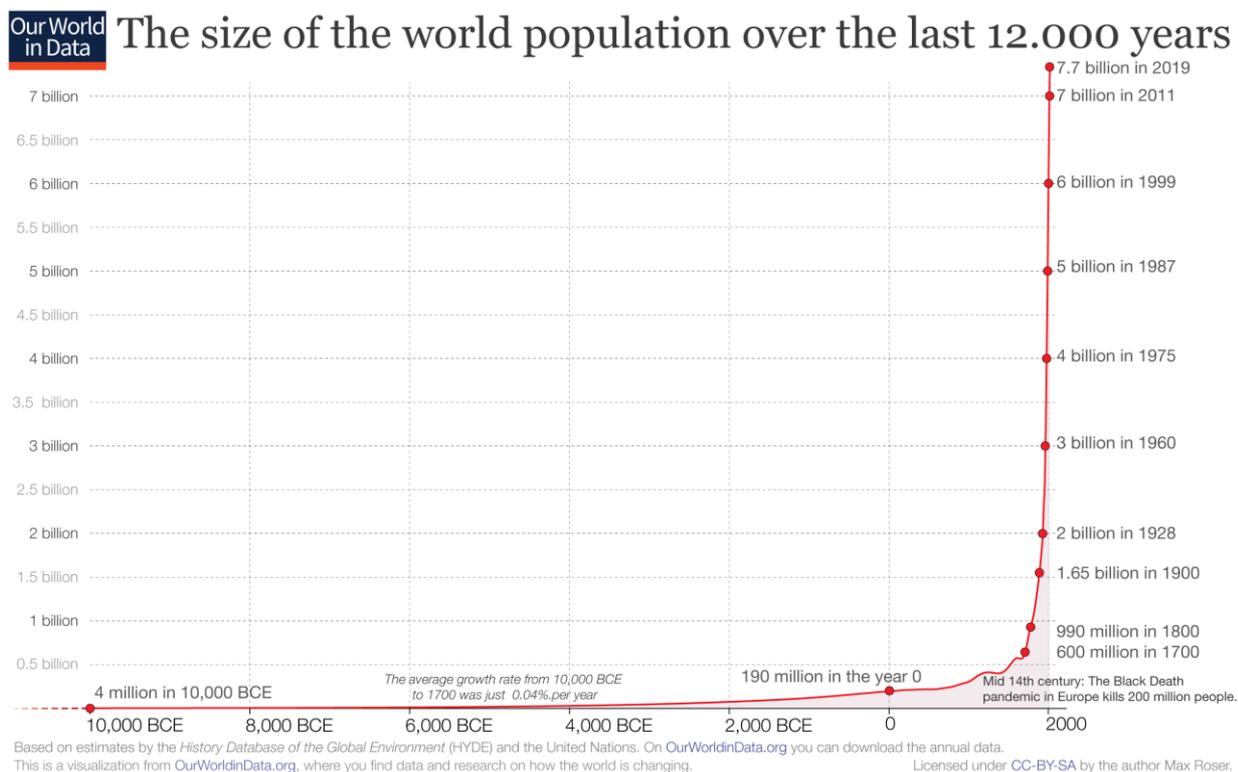


Figura I.1. Evolución de la población mundial. Fuente: OurWorldinData.org [5]

En la figura I.1 se muestra la evolución gráficamente. La curva de crecimiento es más acusada tanto más avanzan los años. Sin embargo, los estudios demográficos demuestran que el crecimiento no es exponencial como podría pensarse. Para que la evolución siguiera un comportamiento exponencial, el ratio de crecimiento debería ser el mismo cada año (por ejemplo, un 1.5%). Sin embargo, a partir de la década de los 60, el ratio de crecimiento ha estado cayendo, acercándose el crecimiento a una tendencia lineal en los últimos años sobre un crecimiento exponencial. La evolución del ratio de crecimiento puede consultarse en la figura I.2.

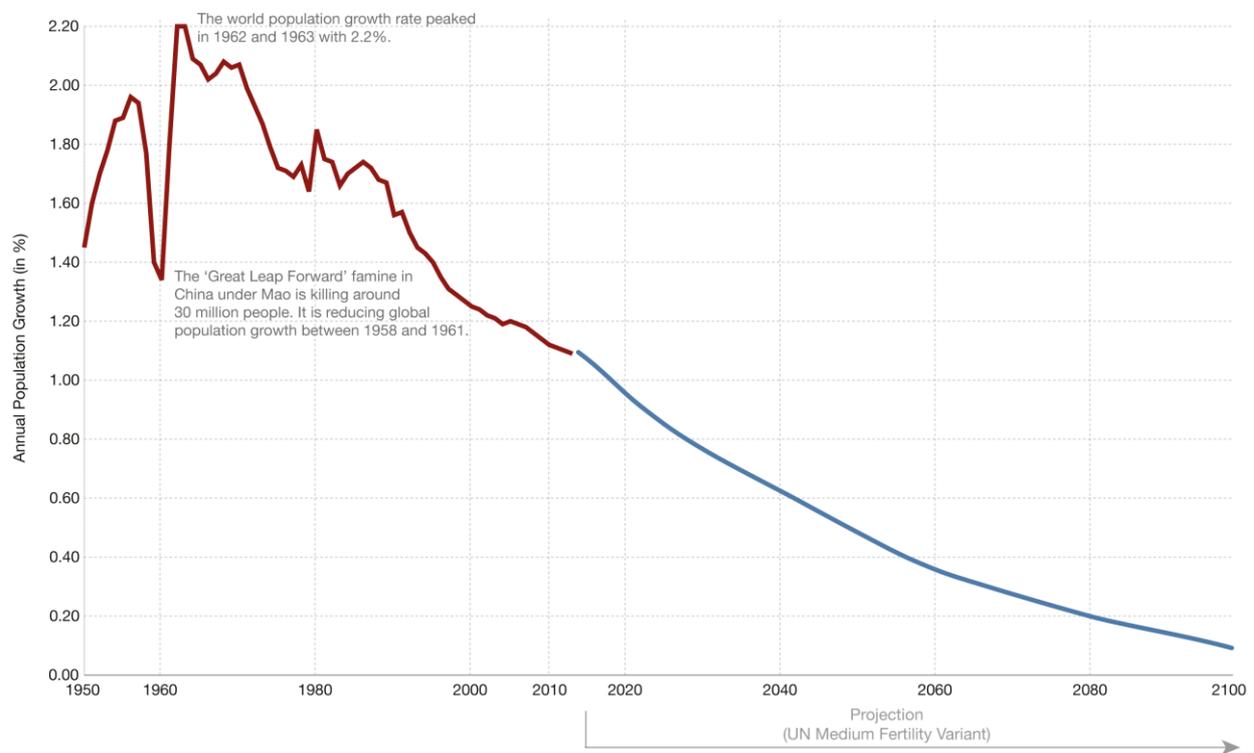
No obstante, aunque el ratio de crecimiento se ha ido reduciendo, la población mundial ha alcanzado valores que invitan a preguntarse cuántas personas habrá en los siguientes siglos y, sobre todo, hasta qué punto es sostenible nuestra gestión de los recursos de los que disponemos, incluyendo el agua y los alimentos.

Referido al agua, existen a día de hoy numerosos desafíos que deben ser solventados y que manifiestan que no existe un correcto aprovechamiento y reparto. Según la Organización de Naciones Unidas [7]:

- Más de dos mil millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable (OMS/UNICEF 2017).
- Cuatro mil millones y medio de personas carecen de servicios de saneamiento seguros (OMS/UNICEF 2017).
- La escasez de agua ya afecta a cuatro de cada diez personas, es decir, al 40% de la población mundial (OMS).



Annual world population growth rate (1950-2100)



Data sources: Observations: US Census Bureau & Projections: United Nations Population Division (Medium Variant) (2015 revision). The interactive data visualization is available at [OurWorldinData.org](https://ourworldindata.org). There you find the raw data and more visualizations on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.

Figura I.2. Evolución del ratio de crecimiento. Fuente: OurWorldinData.org [6]

Referido a la agricultura, en la actualidad proporciona el 90% del alimento que la totalidad de la población mundial consume, bien sea de forma directa o indirectamente alimentando al ganado. En concreto, las especies más consumidas son el trigo, el arroz, el maíz y la patata [8]. Según la Organización de Naciones Unidas, la actividad agraria supone el 70% de la extracción mundial de agua (FAO) [9]. Además, la agricultura no sólo consume recursos de agua de forma directa a través del riego, también provoca efectos secundarios que afectan medioambientalmente y, por ende, a los ciclos del agua. Algunos ejemplos serían [10]:

- Erosión del suelo: el mal uso de la tierra, cultivos en laderas pronunciadas, tala de bosques y otros motivos provocan un efecto de desertización a lo largo del tiempo.
- Contaminación debido al uso de fertilizantes y plaguicidas: un uso excesivo puede provocar la contaminación del agua cuando son arrastrados estos productos por la lluvia.
- Deforestación: para ganar terreno de cultivo y que, como se comentó, afecta a la cantidad de agua retenida por el suelo acelerando la erosión y desertización.

Además, en la actualidad la población mundial no tiene un reparto equitativo de los alimentos a pesar de las medidas para luchar contra el hambre. Según la ONU, una de cada nueve personas ha sufrido hambre crónica, es decir, más de ochocientos millones de personas en el mundo. Uno de cada cuatro niños del mundo padece retraso en el crecimiento y desarrollo debido a la malnutrición o desnutrición [11].

Naturalmente, la población seguirá creciendo en los siguientes años, y se estiman más de once mil millones de personas para el año 2100, de acuerdo a diversos estudios de la ONU [12]. La figura I.3 muestra una predicción del crecimiento poblacional.

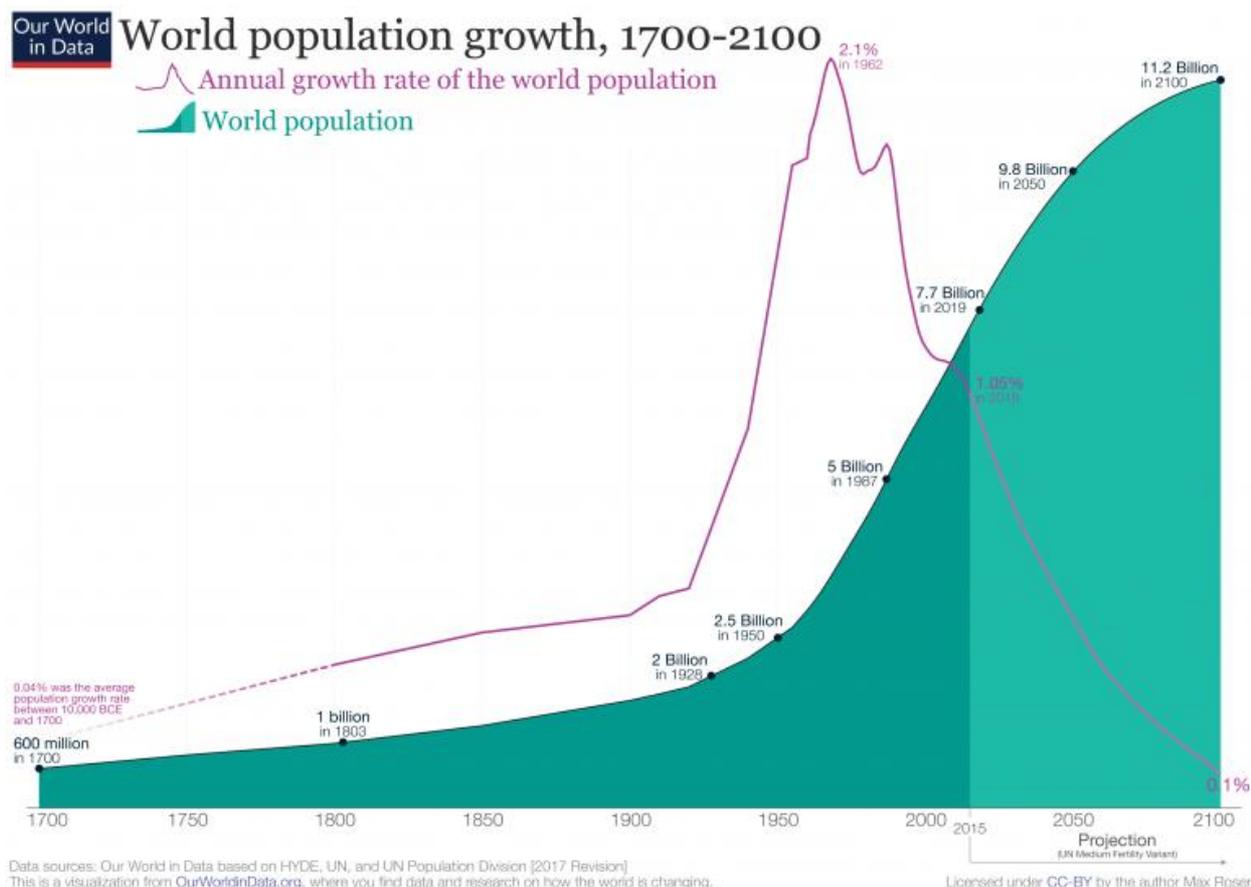


Figura I.3. Predicción del crecimiento poblacional. Fuente: OurWorldinData.org [13]

Se puede hacer una observación lineal: más población supone más actividades agrícolas para generar alimentos y, por lo tanto, más consumo de agua y efectos negativos en el medio ambiente. De ninguna manera la agricultura puede ser prescindible: es el principal motor de alimentación, y tampoco se puede prescindir del agua que necesita. Teniendo en cuenta esto y el auge poblacional continuo, se puede llegar a la conclusión de que la única manera de que la población no sufra un colapso del tipo catástrofe malthusiana debido al exceso de población frente a recursos limitados y malgastados, es el desarrollo de técnicas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, donde el agua sea empleada con una gestión eficiente. Una de las maneras es regular el riego a cantidades calculadas por un control para mantener la humedad del suelo a niveles deseados, permitiendo no desperdiciar agua en exceso como se haría sin un sistema de control. Es aquí donde este trabajo entra en juego: en el desarrollo de controladores para estos sistemas automáticos de riego.

Por supuesto, y aunque el estudio que aquí se desarrolla es de carácter meramente académico, la utilidad no se limita sólo al ahorro de agua, sino también a la comodidad del trabajo con un sistema automático de riego. En un mundo cada vez más desarrollado y automatizado, las labores propias de trabajos simples han sido sustituidos por el uso de máquinas y tecnología. Los métodos de riego no son una excepción, desde que a un sistema de riego por goteo se le puede controlar el tiempo de apertura y así controlar el volumen de agua por unidad de superficie que se aporta al suelo. En general, gracias a los avances tecnológicos se puede implementar en una computadora los controladores que sean capaces de calcular la señal de control que hay que aplicar, y traducir este volumen de agua a tiempo de riego para el aporte de tal cantidad sobre el suelo.

I.2 Objetivos del trabajo

Comprendiendo la necesidad de una gestión sostenible e inteligente de los recursos, se comienza a trabajar en los ya comentados sistemas de control automático. El primer paso, como se adelantó en el apartado “Resumen” del presente trabajo, es el modelado del suelo a nivel matemático. Para esto, se requiere un conocimiento sobre el comportamiento de la humedad dentro del suelo. Posteriormente, se tratan diferentes estrategias de control, en varias situaciones. Por tanto, los objetivos del trabajo se resumirían en:

- Desarrollo de un modelo matemático del suelo que relacione humedad y agua aportada.
- Simulación en un entorno del modelo dinámico observable a modo de sistema real, análisis de la respuesta en diferentes situaciones.
- Linealización del modelo en torno a puntos de funcionamiento lógicos y análisis de la bondad de esta aproximación.
- Aplicación del modelo a un terreno de estudio, con las alturas características del suelo como dato.
- Desarrollo de diferentes estrategias de control y aplicación de las mismas al entorno de simulación.
- Implementación del control al terreno de estudio, buscando una solución al caso general de escasez de sensores.
- Conclusiones referidas al control.

I.3 Ámbito, metodología y estructura

Como se adelantó, el trabajo se basa exclusivamente en un estudio teórico, por lo que se desarrollarán los cálculos pertinentes, ecuaciones y modelos matemáticos teóricamente, no usando en ningún caso resultados empíricos reales obtenidos en ensayos físicos de laboratorio, salvo aquellos conseguidos de otras fuentes. Por tanto, el apartado de implementación y práctico, no se aplicará a un terreno real físico, sino que se realizará en diferentes simulaciones.

El entorno de simulación será “Simulink”, que se basa en una programación visual por bloques, y que funciona dentro del entorno de programación “Matlab”, definido como un sistema de cómputo numérico. Este será el único software empleado en este trabajo.

La estructura del trabajo queda diferenciada en dos partes, una de modelado y otra de control. La primera parte será constituida por el primer par de capítulos:

Capítulo I: Modelado de Humedad en el Suelo. Se desarrollará a nivel teórico un modelo que emule el comportamiento de la humedad, comenzando en un primer modelo simple y siendo ampliado según se consideren diferentes aspectos que afecten en él.

Capítulo II: Simulación del Modelo. El modelo teórico se implementará en el entorno de simulación, a través de funciones que relacionen humedad y agua aportada a lo largo del tiempo. Se aplicará a un terreno de estudio.

Por su parte, habrá dos capítulos para la parte de control:

Capítulo III: Control en Tiempo Continuo de la Humedad. En primer lugar, se linealizará el modelo en torno a puntos de funcionamiento. Ya con una aproximación, se procederá al control de la humedad según un valor de referencia por técnicas clásicas de control.

Capítulo IV: Control Realista de la Humedad. Considerando el caso en que no haya tantos sensores como pudieran desearse sobre la superficie de estudio, se investigará alguna estrategia de control que supla esta deficiencia. Teniendo en cuenta que la humedad es medida por sensores, con un tiempo de muestreo, y que la propia computadora ejecutará los algoritmos de control en una determinada frecuencia, se simulará un escenario más realista donde la simulación sea en tiempo discreto. Además, se propondrán estrategias de control alternativas y que también puedan mitigar la deficiencia de sensores.

Por último, se añadirá:

Conclusiones: se analizarán los resultados obtenidos, se plantearán las mejores soluciones y se cerrará el trabajo

en este último capítulo.

I.4 Alcance y límites

El trabajo, como se ha comentado en apartados anteriores, se limita a un estudio teórico con simulaciones por computador. El límite claramente está marcado por la imposibilidad de poder aplicar estos conocimientos, conclusiones y controladores a un escenario físico y real. El trabajo se quedará en un punto tal que el siguiente paso a desarrollar sería la implementación en una computadora, microprocesador o microcontrolador de los algoritmos de control, dentro de un sistema suelo – sensor – actuador. Los actuadores serán físicos y aportarán agua sobre el terreno según el control.

En general, los sensores para medir la humedad son poco económicos y no son fáciles de encontrar en el mercado. Un sensor de humedad de mano básico cuesta sobre cien euros [14]. Hacer en sí una prueba básica con un ensayo de tierra (el sustrato para plantas cuesta en torno a diez céntimos por cada litro), una placa programable que disponga de entradas analógicas para el sensor como Arduino UNO (mínimo veinte euros [15]) y un sensor como el comentado anteriormente tendría un presupuesto elevado para un ensayo académico, más si se añade el coste del propio ordenador que permita la programación de la placa. Una prueba real sobre un terreno agrícola requiere, principalmente, el acceso a realizar experimentos sobre una parcela agrícola, y numerosas pruebas sobre la parcela en cuestión.

Por tanto, el trabajo alcanzará el límite que habría entre el plano teórico y el práctico, con la idea de que en un futuro se pudiera probar todo lo aquí contenido, rectificando los errores y pudiendo afirmar que, tras los experimentos y pruebas pertinentes, la base troncal de este trabajo es útil y aplicable.

1 MODELADO DE HUMEDAD EN EL SUELO

*Las ciencias no tratan de explicar, construyen modelos principalmente.
[...]*

*La justificación de tal construcción matemática es sólo y precisamente
que se espera que funcione.*

- John von Neumann-

1.1 Introducción

Como breve introducción a este capítulo, primero es conveniente explicar el objeto de estudio de este trabajo: el suelo y la humedad. También cabría mencionar la historia del estudio de la dinámica de la humedad en el suelo, que se incluirá al final de esta sección.

El sistema que analizamos en este trabajo es el suelo, cuya única entrada sería el volumen de agua que se aporta y única salida sería la humedad. El agua aportada puede venir dada por dos vías: las precipitaciones (que serían perturbaciones) y por el riego, a modo de señal de control del sistema. La humedad del mismo (de ahora en adelante representada, S) se entiende como una relación entre volumen de agua contenido en un volumen de espacio determinado, es decir:

$$S = \frac{V_{\text{agua}}[L]}{V_{\text{espacio}}[L]} \quad 1.1$$

La humedad, como puede deducirse, es adimensional: se trata de un valor relativo sobre la cantidad de agua contenida en un espacio. Por su parte, las precipitaciones y el riego se miden en volumen por unidad de superficie, clásicamente utilizada la unidad litro por metro cuadrado (L/m^2) que puede reducirse a milímetros (mm). 3 mm equivaldría a decir $3 L/m^2$.

Puede verse un resumen esquemático en la figura 2.1.

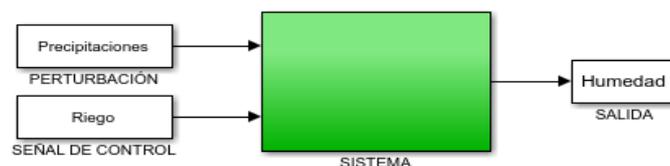


Figura 1.1. Resumen esquemático del conjunto

El conjunto se trata de un sistema monovariado: la única salida que es de interés para el estudio es la humedad y la única señal de control para afectar a esta salida es el agua aportada al sistema.

El modelo de balance de agua no es un estudio novedoso: el origen, la modelación hidrológica, comenzó en el siglo XIX como modo de evaluación de la respuesta en un sistema tipo cuenca o vertiente. Sin embargo, se limitaba a expresiones simples, un modo de relacionar matemáticamente entrada (agua clásicamente aportada por precipitaciones) y respuestas ante esos estímulos [16].

En general, los estudios posteriores de análisis hidrológico se basan en modelos que pueden ser considerados deterministas o estocásticos, siendo ambos casos matemáticos. Un modelo determinista tendrá como particularidad el conocimiento del estado en el instante justo anterior, lo que dará una salida única; dicho de otro modo, una serie de parámetros concretos con unas entradas concretas darán inequívocamente una(s) salida(s), y siempre será el mismo resultado para las mismas condiciones de entrada y de estado. Por tanto, estos modelos no utilizan en ningún momento una variable aleatoria, no dependen de cuestiones azarosas. Por su parte, aquellos modelos estocásticos son, por definición, los que introducen una o más variables aleatorias en sus procesos, teniendo por tanto diferentes respuestas a mismas entradas [17].

En este trabajo, se utilizará un modelo determinista, entendiendo que el suelo es un sistema que no dependerá del azar para generar una respuesta. Sin embargo, cabe destacar que, incluso con esta hipótesis, la lluvia como proceso siempre es estocástico: de ninguna manera puede predecirse sin margen de error cuándo y cuánto lloverá. Por ende, generalmente se modela la lluvia con una distribución aleatoria de Poisson para la frecuencia, y una distribución aleatoria exponencial para la intensidad [18]. Sin embargo, esto tiene una solución de cara a nuestras simulaciones bastante sencilla: el uso de histogramas de precipitaciones. Pueden consultarse de acuerdo con zona y fecha y utilizarse como las precipitaciones que se requieren para simular. También, pueden utilizarse como referencia de la cantidad de agua que cae por unidad de tiempo (por ejemplo, al mes) históricamente en un clima y zona determinados, por lo que ayudan a aproximar qué cantidad y frecuencia de lluvia debe emplearse en la simulación.

El primer modelo como tal de balance de agua sería el desarrollado por Thornthwaite a mitad del siglo pasado, modificado y mejorado sucesivamente por estudios posteriores, como el del profesor de la Universidad de Colorado Ignacio Rodríguez-Iturbe a principios de este siglo [19]. Estos modelos están basados en dos parámetros. El primero sería la cantidad de agua que es capaz de almacenar el suelo, es decir, la capacidad de humedad. El segundo, sería la cantidad de agua que se recibe por unidad de tiempo [20]. Esto quiere decir que son modelos que tratan de ajustarse al comportamiento de la humedad del suelo mediante una función de continuidad: el agua que entra al espacio tridimensional en cuestión más el agua que ya había contenida anteriormente debe ser igual a la cantidad de agua que sale del espacio tridimensional más la cantidad que se retiene tras la unidad de tiempo. El hecho de que tenga que ser una serie de ecuaciones de continuidad no debe sorprender, ya que, al fin y al cabo, el agua es una variable que no puede venir de la nada ni puede irse a ninguna parte. Por tanto, y en vista de que se basa en la diferencia entre la cantidad de agua contenida en el instante en cuestión y la cantidad de agua contenida en el instante posterior tras la unidad de tiempo, se prevé un modelo como función diferencial que habrá que integrar. Dicho de otro modo, se construirá una función que determine la variación de humedad (agua contenida en el espacio) según la cantidad de agua que se aporte y la cantidad que se pierda en la unidad de tiempo. Se habla, por tanto, de un balance entre pérdidas y ganancias.

El último párrafo marca el objetivo de este primer capítulo y es clave para entender el enfoque del estudio que viene a continuación.

Aunque existen otros modelos basados en más parámetros (modelos agregados), carece de interés analizarlos todos, especialmente en un caso teórico como el que nos ocupa, ya que la complejidad computacional y de estimación de parámetros sería elevada, y requerirían de un proceso de ajuste y calibración sólo posible en ensayos reales. Sin embargo, estos modelos una vez construidos pueden ser más exactos [21]. Algunos ejemplos serían el modelo ABCD o el AWBM.

1.2 Modelo “leaky bucket”

El modelo de tipo “leaky bucket” (traducido como “cubo agujereado”) es el comentado en la sección anterior: un espacio tridimensional (de forma genérica, un cubo) que sufre aportes y pérdidas de agua a lo largo del tiempo. A partir de este punto, se denominará “cubo” a este volumen de estudio concreto. En él se aplica la ecuación de continuidad que proporciona el balance de agua: la diferencia de contenido de agua en este cubo entre dos instantes separados por la unidad de tiempo viene determinada según pérdidas y aportes de agua sobre el cubo producidos en dicha unidad de tiempo.

Ahora bien, ¿cuáles son esos procesos que suponen pérdidas o adiciones de agua al terreno?

El primero de ellos, como se adelantó numerosas veces en apartados anteriores, sería el aporte directo de agua al terreno, es decir, precipitaciones y riego. Esto se medirá a partir de aquí en milímetros (mm).

El segundo proceso que influye sería la evapotranspiración. Aquí se distinguen dos fuentes de pérdidas: por un lado, la evaporación natural del agua como un proceso espontáneo; por otro, la transpiración de las plantas.

En tercer lugar, la percolación profunda. Se entiende por percolación el paso lento de un fluido a través de un material poroso, como puede ser el suelo. Estas pérdidas con especialmente acusadas cuando la humedad supera el límite de saturación del cubo.

Hasta ahora podemos definir la igualdad como:

$$\Delta C = C_{actual} - C_{anterior} = I - ET - L \quad 1.2$$

Donde (todo en mm):

- ΔC es la variación de contenido de agua en el suelo.
- C_{actual} es el contenido de agua actual.
- $C_{anterior}$ es el contenido de agua en el instante anterior.
- I es la infiltración de agua en el terreno, que es la suma de precipitaciones y riego.
- ET es la evapotranspiración.
- L son las pérdidas debidas a la percolación.

Sabiendo exactamente en un instante la cantidad de agua que entra al cubo (infiltración) y la que sale a través de pérdidas de evaporación, transpiración y percolación, se podría obtener la variación de contenido de agua con respecto al instante anterior. Conociendo este último valor, además, se podría conocer la cantidad de agua que hay en el terreno, y no sólo la variación.

Sin embargo, como se adelantó, se trata de una ecuación diferencial donde el interés recae en conocer la variación de humedad. Nótese que la cantidad contenida de agua (siempre que se trate de cantidades de agua se mide en mm) no es equivalente a humedad (recuérdese que era una magnitud adimensional, que relaciona volumen de agua en un volumen de espacio tridimensional). Para poder relacionar cantidad de agua con humedad, hay que hacer uso de un par de parámetros que vienen dados por el terreno y el clima.

El primero de ellos es la profundidad de la zona de raíces, esto es, la profundidad del terreno donde se considera que llegan las raíces de la vegetación. Teniendo en cuenta que este estudio está orientado a un terreno de cultivo agrícola, esta profundidad, además, corresponde a la superficie del terreno que no se considera “suelo profundo” y que resulta de interés. Dicho de otro modo, no interesa considerar la humedad que hay por debajo de esta profundidad, ya que no hay raíces (la planta no podrá beneficiarse de ninguna manera) y comienza el denominado “suelo profundo”, a donde pararán las aguas que se pierdan por percolación.

El segundo parámetro sería la porosidad del suelo, magnitud adimensional, que expresa el porcentaje de huecos que hay en un volumen dado frente a ese mismo volumen. En el estudio de campos, edafología, se calcula a partir de densidades aparente y real de ese terreno. Matemáticamente se muestra en 1.3.

$$n = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m} * 100\% \quad 1.3$$

Donde:

- n es la porosidad.
- ρ_m es la densidad real.
- ρ_a es la densidad aparente.

La densidad aparente es una magnitud para materiales porosos como puede ser el suelo. Sirve para indicar la relación entre la densidad que habría si se compactase todo el material y la que tiene en el estado en que se encuentra, ya que, por norma general, un material poroso tendrá una densidad menor que la densidad compactada debido a huecos [21]. En cualquiera de los casos, porosidad y densidad aparente son propiedades que no sólo dependen exclusivamente del material, sino del estado en el que se encuentre. Por tanto, como se indicó anteriormente, un mismo terreno puede tener diferentes valores de porosidad para diferentes estaciones.

A lo largo de este estudio se manejarán dos situaciones: una estación seca y una estación húmeda. La primera equivaldrá a los meses de escasez de lluvia, como los de verano en un clima mediterráneo, y la segunda para los meses de precipitaciones frecuentes.

Definidas porosidad y profundidad de zona de raíces, relacionamos variación del contenido de agua con variación de humedad según se expresa en 1.4:

$$\Delta C = \Delta S * Zr * n \quad 1.4$$

Donde:

- ΔC es la variación del contenido de agua.
- ΔS es la variación de la humedad.
- Zr es la profundidad de zona de raíces.
- n es la porosidad.

Esta relación es trivial considerando que la humedad se define como contenido de agua entre volumen que la contiene, y en el caso del cubo, este volumen será la unidad de superficie multiplicado por la profundidad (Zr). Así, el cubo donde se aplica la ecuación de continuidad sería $1000 \times 1000 \times Zr$, expresado en milímetros. El motivo de que la superficie sea un metro cuadrado ($1000 \text{mm} \times 1000 \text{mm}$) es el empleo de mm como unidad de medida de volumen de agua por unidad de superficie (recuérdese que litros por metro cuadrado (L/m^2) equivale a mm). La porosidad afecta proporcionalmente a la relación.

Conocida esta relación entre humedad y contenido de agua, y definido el volumen del cubo, queda analizar el segundo lado de la ecuación.

1.3 Pérdidas y ganancias de agua en el cubo

Como se adelantó, el primer motivo para la adición de agua al terreno es el aporte directo, bien sea por precipitaciones, bien sea por riego. Definimos esta suma como infiltración. Sin embargo, si un día lloviera tal cantidad de agua que superara el límite de saturación del cubo, no podría hablarse de una infiltración de tal magnitud. Es razonable entender que la cantidad de agua que puede infiltrarse en el volumen tiene un límite, marcado por el volumen no saturado en el cubo.

Dentro del cubo, la cantidad de agua vendrá dada por la expresión:

$$C_{actual} = n * Zr * S \quad 1.5$$

Medida como siempre en milímetros (mm), simplemente el producto de la humedad por la profundidad de zona de raíces. Por tanto, la cantidad para el volumen no saturado vendrá dada por:

$$C_{no\ saturado} = n * Zr * (1 - S) \quad 1.6$$

Como de ninguna manera la infiltración, es decir, agua que se añade al cubo en cuestión, puede ser mayor que este valor (en el caso extremo será exactamente de este valor), la infiltración realmente será:

$$I = \min(Pe, C_{no\ saturado}) \quad 1.7$$

Donde:

- Pe es el agua aportada total, incluyendo precipitaciones más riego, en mm.
- $C_{no\ saturado}$ es la cantidad de agua máxima para el volumen no saturado, en mm.

Esto quiere decir que, en el caso genérico de un terreno sin riego alguno, la infiltración sería la cantidad de agua de la lluvia, con un límite marcado por el volumen no saturado, es decir, el valor mínimo de esas dos cantidades.

Por último, como esa ecuación relaciona infiltración en función de la humedad S , y se calcula para cada instante, la expresión de 2.7 quedaría:

$$I(t, S^-) = \min(Pe(t), n * Zr * (1 - S^-)) \quad 1.8$$

S^- indica el valor de humedad del instante anterior. Hay que tener en cuenta que para calcular el valor de la infiltración en el instante t , en el mejor de los casos sólo se requiere conocer la cantidad de precipitaciones y riego (de haberlo) actuales, pero en casos donde haya que analizar la cantidad de agua que podría haber en el volumen no saturado, se quiere conocer propiamente el valor en t de la humedad. Para resolver esta recurrencia (la humedad depende de la infiltración, y ésta depende de la humedad), se utiliza simplemente el valor anterior de la humedad.

Por otro lado, la evapotranspiración incluye dos fuentes de pérdidas, la transpiración de la vegetación y la evaporación del agua. Sin embargo, ambas pérdidas se modelan de una forma muy similar: serán 0 hasta un cierto umbral de S , desde el cuál comenzarán a ser mayores directamente proporcional a la humedad S , hasta un punto máximo de saturación.

En definitiva, tendrán la forma:

$$T(S^-) = \begin{cases} 0 & \text{si } S^- < S_w; \\ \frac{S^- - S_w}{S^* - S_w} * T_{max} & \text{si } S_w \leq S^- < S^* \\ T_{max} & \text{si } S^* \leq S^- \end{cases} \quad 1.9$$

Donde:

- T es el valor de las pérdidas debidas a la transpiración, en mm.
- S^- es el valor anterior de humedad.
- S_w es el valor de humedad mínimo para poder ejecutar el proceso de transpiración.
- S^* es el valor de humedad umbral desde el cuál las pérdidas por transpiración son máximas.
- T_{max} es el valor de la máxima pérdida debido a transpiración, en mm.

De nuevo, se tiene que hacer uso del valor anterior de humedad para el cálculo de pérdidas. Éstas serán nulas para todos los valores de humedad menores que S_w , umbral mínimo para que las plantas puedan iniciar la transpiración. Desde este punto, las pérdidas empiezan a aumentar proporcionalmente a la S según la expresión de 1.9, hasta el umbral de saturación superior, S^* . A partir de aquí, las pérdidas debidas a transpiración son máximas, valiendo T_{max} para cualquier valor de humedad superior a ese umbral.

Por su parte, la evaporación supondrá unas pérdidas de acuerdo a 1.10.

$$E(S^-) = \begin{cases} 0 & \text{si } S^- < S_h; \\ \frac{S^- - S_h}{S^* - S_h} * E_{max} & \text{si } S_h \leq S^- < S^* \\ E_{max} & \text{si } S^* \leq S^- \end{cases} \quad 1.10$$

Donde:

- E es el valor de las pérdidas debidas a evaporación del agua, en mm.
- S^- es el valor anterior de humedad.
- S_h es el valor de humedad mínimo para poder ejecutar el proceso de evaporación.
- E_{max} es el valor de la máxima pérdida debido a transpiración, en mm.

El comportamiento es análogo a la transpiración, con un valor mínimo para comenzar la evaporación, S_h , menor que el valor de S_w . El valor umbral de saturación superior es el mismo en ambos procesos, S^* . Por tanto, se distinguen varios tramos según el valor de humedad que tenga el terreno:

Un primer tramo donde el valor de humedad es tan pequeño que no es suficiente para que se produzcan estos dos fenómenos, es decir, un valor residual de humedad.

Un segundo tramo donde tengan lugar las evaporaciones de agua, pero no la transpiración.

Un tercer tramo donde se produzcan tanto evaporación como transpiración, siendo estas pérdidas tanto mayores como mayor sea la humedad del terreno en ese momento.

Un cuarto tramo donde la humedad es superior al umbral de saturación, por lo que las pérdidas de evapotranspiración son máximas. A partir de este punto, las pérdidas por esta causa son siempre máximas para cualquier valor de S .

La figura 1.2 muestra las pérdidas en función del valor de humedad.

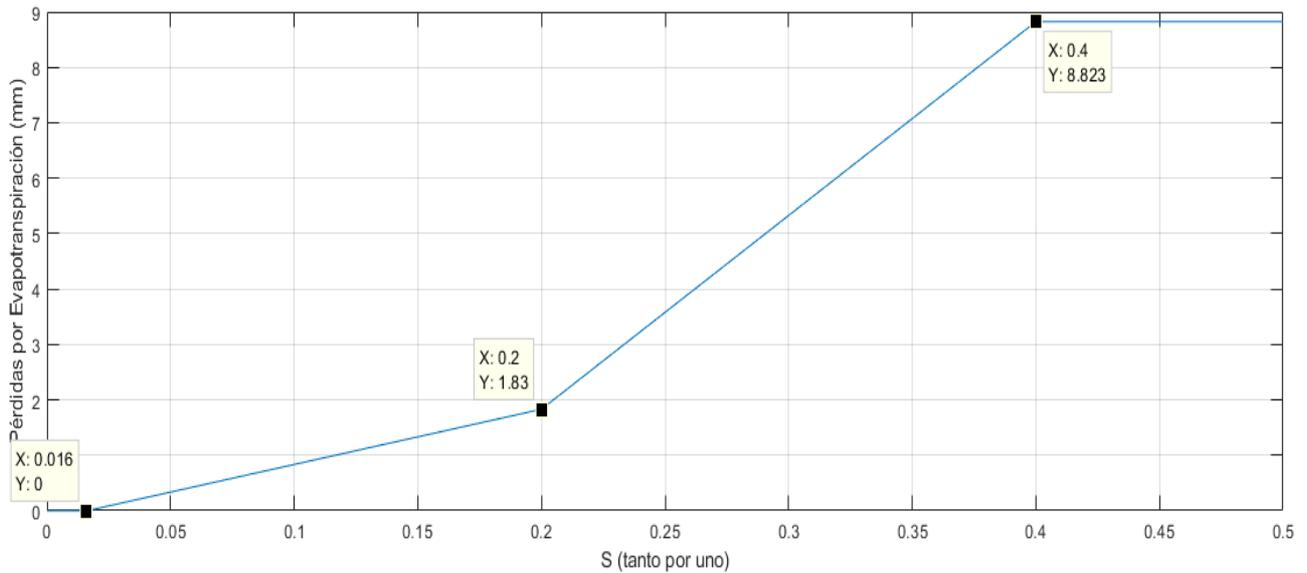


Figura 1.2. Pérdidas por evapotranspiración en función de la humedad

Se puede observar una fuerte linealidad entre humedad y pérdidas por evapotranspiración. Se utilizaron los siguientes valores para cada parámetro [22]:

Parámetro	Valor
S_h	0.0163
S_w	0.2
S^*	0.4
E_{max}	3.823 mm/día
T_{max}	5 mm/día

Tabla 1.1. Parámetros utilizados para mostrar la relación entre humedad y pérdidas por evapotranspiración [25]

Estos parámetros no se toman de forma arbitraria. Deben ser estimados tras un proceso de calibración con ensayos en un sistema real. En este estudio, al ser completamente teórico, se tomaron los parámetros de otras fuentes para conocer el orden de magnitud de cada uno, y poder llevar a cabo el modelo y las simulaciones.

Por último, la tercera fuente de pérdidas que afecta al cubo sería la percolación. En un sentido estricto, siempre se producirá percolación por el simple hecho de que el agua tenderá a penetrar la tierra hacia el interior. Sin embargo, estas pérdidas son muy pequeñas comparadas con las anteriores si el suelo no ha alcanzado un nivel determinado de humedad, denominado capacidad de campo, S_{fc} . A partir de este punto, no sólo no son despreciables las pérdidas por percolación, sino que además son dominantes.

Modelar las pérdidas por percolación requiere del uso de algunos parámetros característicos del suelo. Además de la capacidad de campo, se necesita la conductividad hidráulica saturada, también conocida como capacidad de infiltración del suelo. Para entender este término, podría decirse que es la capacidad que tiene el terreno de drenar agua [23]. Tiene dimensiones de volumen de agua por unidad de tiempo, por lo que en este estudio se utilizará milímetros por día (mm/día). Para estimarlo, se requiere hacer un ensayo de infiltración: al comienzo, la infiltración en el terreno será rápida, e irá disminuyendo según aumente la humedad. Llegado un cierto punto de humedad, S_{fc} , necesariamente el fluido que se vaya introduciendo tendrá que experimentar un movimiento hacia terreno profundo: se ha alcanzado en este punto la conductividad hidráulica saturada. Este punto como se mencionó anteriormente se denomina capacidad de campo, y junto con la conductividad hidráulica saturada, viene dado por el tipo de terreno, condiciones en las que se encuentra y condiciones de la superficie.

De nuevo, estimar estos parámetros requiere ensayos y un conocimiento avanzado en edafología, lo que está fuera del límite de este trabajo, por lo que se utilizarán valores de un orden de magnitud lógicos para el modelo. En la tabla 1.2 pueden consultarse los elegidos.

El comportamiento que sigue la percolación es fuertemente no lineal, ya que una mayor cantidad de agua en el terreno implicará pérdidas mayores. Estas pérdidas frente a la humedad pueden verse en la figura 1.4. Como se adelantó, por debajo de la capacidad de campo son mucho menores, incluso despreciables frente a las pérdidas por transpiración y evaporación. La forma en la que la humedad disminuye debido a las pérdidas de percolación a lo largo del tiempo puede apreciarse en la figura 1.3.

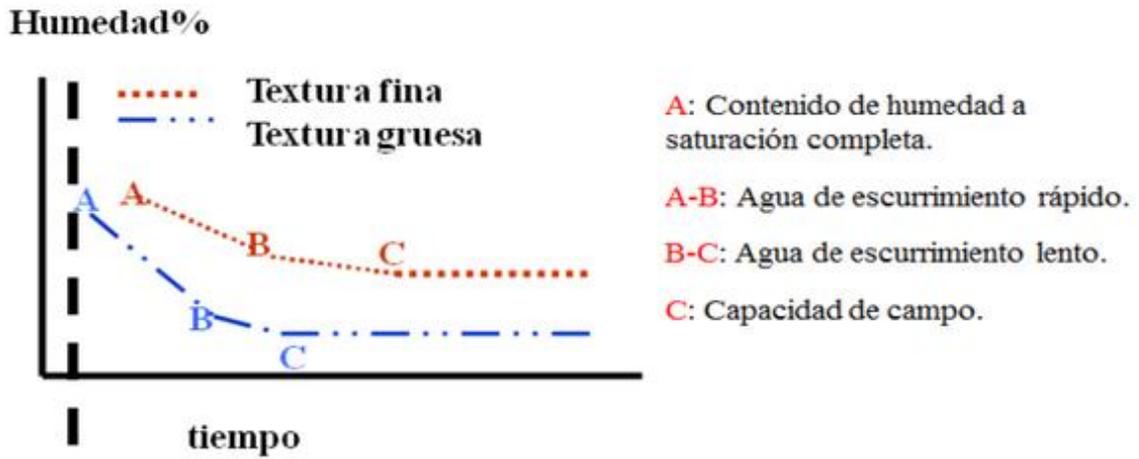


Figura 1.3. La humedad disminuye debido a las pérdidas de percolación. Fuente: [24]

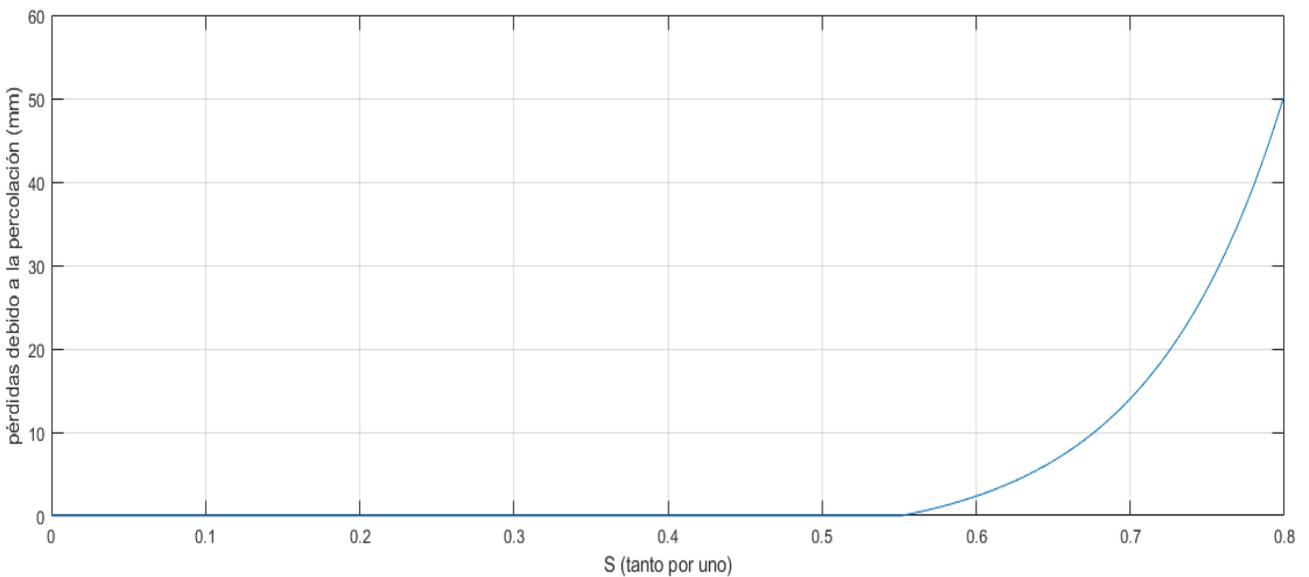


Figura 1.4. Pérdidas por percolación en función de la humedad.

Parámetro	Valor
K_{sat}	518 mm/día
β	11.37
S_{fc}	0.55

Tabla 1.2. Parámetros utilizados para mostrar la relación entre humedad y pérdidas por percolación [26]

Donde K_{sat} es la conductividad hidráulica en saturación y β , un parámetro característico del suelo. El modelo que se ha usado para la percolación se expresa matemáticamente como:

$$L(S^-) = K_{sat} * \frac{e^{\beta*(S^- - S_{fc})} - 1}{e^{\beta*(1 - S_{fc})} - 1} \quad 1.11$$

Como la conductividad hidráulica saturada o capacidad de infiltración, K_{sat} , tiene un valor aproximado de 520 mm/día, se puede deducir que el suelo es franco ligeramente arenoso, según la tabla 1.3.

Suelo	Capacidad de infiltración (mm/hora)
Arenoso	> 30
Franco arenoso	20 – 30
Franco	10 – 20
Franco arcilloso	5 – 10
Arcilloso	1 – 5

Tabla 1.3. Valores típicos de capacidad de infiltración según el suelo. Fuente: FAO.

1.4 Otras consideraciones por el terreno

Hasta ahora, se tiene un modelo tipo “leaky bucket”, donde un volumen definido (cubo) varía su humedad en función de una serie de aportes y pérdidas. Sin embargo, este modelo tendrá sentido únicamente si el cubo constituye un sistema completamente aislado. Para que fuera el caso, debería ocurrir que se extrapolara este modelo a una cuenca o terreno mayor, donde el volumen al que se aplica la ecuación de continuidad no fuera el cubo de dimensiones anteriormente mencionadas, sino que sería todo el terreno. Esto puede hacerse con la condición de suponer la humedad constante en el espacio, esto es, suponer que la humedad en todos los puntos del sistema es la misma (o el valor medio de la humedad de todo el suelo), ya que todo el terreno es un único sistema y hay un único volumen. Otra opción sería seguir contemplando el cubo de este trabajo como volumen al que se aplica la ecuación de continuidad. No obstante, el terreno no está separado en casillas aisladas unas de otras con exactamente las dimensiones del cubo, de tal manera que este volumen determinado se ve afectado por el terreno de alrededor. Concretamente, hay un par de fenómenos relacionados con el flujo y paso de agua que afectan en la humedad.

El primero de ellos es el flujo lateral. Se entiende como el flujo que pasa de un cubo a su adyacente debido a la diferencia de altitud entre ambos. Es comprensible que, si el terreno está en pendiente, el volumen de mayor altitud ceda parte del contenido de agua a las zonas con menor altitud.

El segundo fenómeno es la escorrentía, definida como la cantidad de agua que circula libremente por la superficie. Igualmente depende de la orografía, esto es, del relieve terrestre. La gran diferencia entre un

fenómeno y otro es el lugar en que se producen las cesiones de agua: los flujos son internos y forman parte de las pérdidas de percolación (en lugar de ir a terreno profundo, irán a la celda adyacente a menor altura), la escorrentía, por su parte, afecta a la infiltración por movimientos de agua en la superficie.

La figura 1.5 muestra un dibujo esquemático de todos los fenómenos hasta aquí mencionados que suponen cambios en la humedad de un terreno.

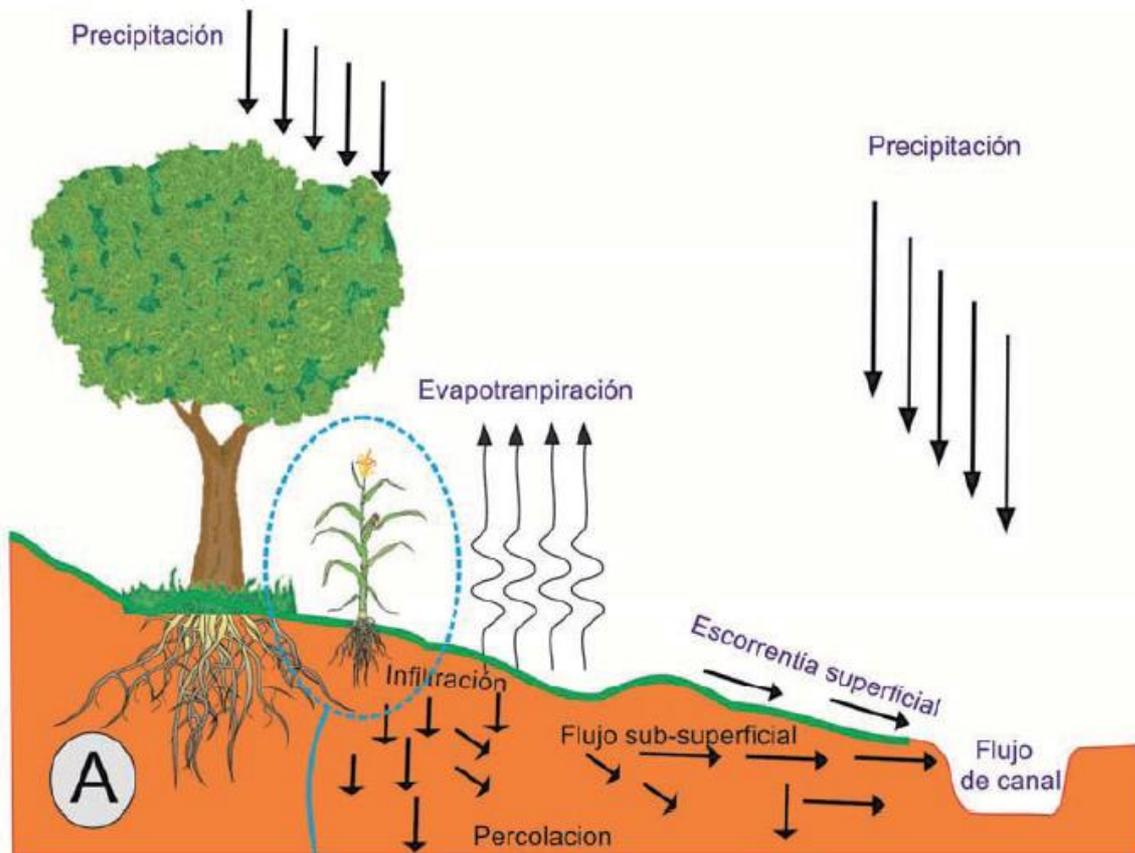


Figura 1.5. Ciclo hidrológico terrestre. Fuente: [27]

Tanto para la escorrentía como para el flujo lateral, hace falta la introducción de un factor que marque la proporción en la que se dan estas pérdidas o ganancias. Este factor dependerá únicamente de la altura y orografía del terreno.

Sea SC1 un volumen de dimensiones del cubo característico de este estudio ($1000 \times 1000 \times Z_r \text{ mm}^3$). Sea h_1 la altura media de este cubo. Análogamente, sean SC2 un segundo volumen de idénticas dimensiones adyacente al primero y h_2 su altura media. Si h_1 es mayor que h_2 , se entiende que el primer sector de terreno SC1 está a mayor altitud, al menos, en valor promedio que el segundo sector CS2. El factor que marca cuánto afecta esta diferencia de alturas a la escorrentía y a los flujos laterales será una relación geométrica, concretamente, el ángulo de inclinación o pendiente. Trigonómicamente, es evidente que:

$$\theta = \arctg\left(\frac{h_1 - h_2}{l}\right) \quad 1.12$$

Donde:

- θ es el ángulo de inclinación o pendiente entre los sectores.
- l es la distancia entre los centros de los sectores.

Lógicamente, si la diferencia de alturas es nula (h_1 es igual a h_2), el ángulo será 0. Además, teniendo en cuenta que los sectores de este ejemplo tienen las dimensiones del cubo característico de este trabajo, la distancia entre los sectores debe ser necesariamente de 1000mm.

Siendo un terreno cualquiera el objeto de estudio, cada sector dispondrá, por lo general, de cuatro sectores adyacentes: arriba, abajo, izquierda y derecha. Se entiende por tanto que hay cuatro ángulos asociados a un sector concreto.

Se deduce que el flujo lateral tendrá por tanto cuatro componentes, una por cada dirección mencionada, para un sector en cuestión. Cada uno de estos flujos responde a la ecuación 1.13, modificando 1.12 de acuerdo a 1.14. para cada ángulo.

$$L_i(S^-) = \frac{L(S^-)}{4} * \frac{Zr}{l} * \text{sen}(\theta_i) \quad 1.13$$

$$\theta_i = \text{arctg} \left(\frac{h_i - h_a}{l} \right) \quad 1.14$$

Donde:

- L_i es el volumen de agua aportado por el flujo lateral, $i = 1, 2, 3, 4$, en mm.
- L es la pérdida percolación, en mm.
- l es la distancia entre sectores, que en el caso de este ejemplo sería 1000 mm.
- h_a es la altura del sector que se está analizando, en mm.

Se observa que el valor de cada componente de flujo lateral depende de la distancia entre sectores, de la profundidad de zona de raíces, del ángulo de inclinación y también de la percolación. Esto último se debe a que efectivamente los flujos laterales forman parte de las pérdidas de percolación. Simplemente, en lugar de ir todo el contenido de agua correspondiente a las pérdidas de percolación a la zona de profundidad del terreno, se transfiere una parte a los sectores cercanos, debido a la diferencia de altitud. Por esto, los flujos laterales nunca supondrán una pérdida extra para cada cubo, sino que la pérdida por flujos laterales y percolación profunda se contemplan juntos en el valor de percolación, L , que ya forma parte del modelo. Un flujo lateral sí puede aportar contenido de agua adicional a un sector desde cubos adyacentes.

De acuerdo a esto, L_i será cero en los casos donde las alturas de los sectores sean iguales o cuando la altura del sector en cuestión sea mayor, esto es, cuando h_a sea mayor que h_i . La suma de las cuatro componentes será el aporte por los flujos laterales.

Por último, cabe destacar que de acuerdo a las conclusiones que se aportaron referidas a la percolación, ésta no supone pérdidas significativas hasta que la humedad supera un cierto valor (recuérdese, la capacidad de campo S_{fc}). Por tanto, el flujo lateral será despreciable igualmente salvo cuando el terreno supere este valor de humedad. En suelos de clima árido y seco, directamente pueden obviarse los flujos laterales [28].

Por su parte, la escorrentía sí que supone una importante variación en el volumen de agua que se aporta a un sector. Además, supone un movimiento previo a la infiltración. Esto quiere decir que puede provocar que un sector obtenga menor infiltración que la que obtendría si no existiese este efecto. Por tanto, la escorrentía sí puede significar una pérdida del agua total aportada a un sector. De acuerdo con 1.7, el volumen de agua aportado será la suma de riego y precipitaciones. Sin embargo, si debido a las inclinaciones y pendientes del terreno hay movimientos de agua en la superficie, este valor se verá afectado:

$$Pe = P + SC - \text{escurr} \quad 1.15$$

Donde:

- P son las precipitaciones, en mm.
- SC es la señal de control (cuando es aplique), es decir, el riego, en mm.
- $escurr$ son las pérdidas debidas a la escorrentía, en mm.

Tal cual se muestra en 1.15, la escorrentía supone una pérdida del volumen de agua. Sin embargo, no tiene por qué ser siempre así: en caso de que un sector adyacente esté a mayor altura, el sector de menor altura se verá beneficiado con un aporte de agua. En este caso, el valor de $escurr$ sería negativo (lo cual sumaría a Pe).

De nuevo, se tendrán cuatro componentes, una por cada dirección. Igualmente, la suma de las cuatro será el valor total de $escurr$.

Para calcular el valor de cada componente, hay que tener en cuenta que ahora no sólo dependerá de la pendiente entre dos sectores contiguos, sino también de la suma de todas las pendientes. Supóngase un sector de altura superior a toda su vecindad. Es evidente que, cuando llueva, el agua correrá en todas las direcciones desde este sector hasta los sectores vecinos. Sin embargo, no irá la misma cantidad de agua en cada dirección: las pendientes más acusadas tendrán un mayor caudal. Por tanto, hay una división entre las diferentes direcciones.

Además de la inclinación de dos sectores, y la consideración de todas las pendientes del sector, hay otros parámetros que afectan al valor de la escorrentía. En general, modelar este fenómeno es complicado, tanto matemáticamente como por la estimación de parámetros. De acuerdo a Javier Arriaga, se puede aproximar el comportamiento de la escorrentía como [29]:

$$escurr_i(I^-, S^-, t) = I^- * \left(1 - e^{-\frac{S^-}{\tau}}\right) * \frac{\theta_i}{\sum_{j=1, \theta_j > 0}^4 \theta_j} \quad 1.16$$

En 1.16 se muestra una aproximación de primer orden, donde se hace uso de un coeficiente de escorrentía, τ . Se muestra además una proporcionalidad, como es lógico, de la infiltración. Una vez más, hay que superar el problema recurrente (la infiltración depende de la escorrentía, y ésta depende de la infiltración) utilizando valores anteriores de I . También se muestra en el último factor la dependencia, no sólo del ángulo entre sectores afectados, sino también de la proporción de este ángulo con respecto a la suma de todas las pendientes positivas. Análogamente, si el ángulo es negativo ($\theta_i < 0$), el último factor representará la proporción de este ángulo con respecto a la suma de todos los ángulos negativos. Esto quiere decir que cada componente de escorrentía se calcula con una proporcionalidad entre pendiente y suma de pendientes, y distinguiendo los casos de aporte y pérdida de agua.

Todo este capítulo puede resumirse en la búsqueda de un modelo matemático determinista simple para aproximar el comportamiento de la humedad en el suelo. Habiendo considerado todo lo anterior, se llega a la expresión 1.17, donde se tienen en cuenta las pérdidas y aportes de agua al volumen al que se aplica la ecuación de continuidad, al que se definió como “cubo”, y donde además se añadieron dos fenómenos de interacción entre cubos adyacentes relacionados con el relieve del terreno, la escorrentía y el flujo lateral. Finalmente se obtiene la expresión 1.17.

$$n * Zr * \Delta S = \min(Pe(t), n * Zr * (1 - S^-)) + \sum_{i=1}^4 L_i(S^-) - L(S^-) - E(S^-) - T(S^-) \quad 1.17$$

2 SIMULACIÓN DEL MODELO

Si Dios creó el mundo, su mayor preocupación no era desde luego facilitarnos su comprensión. Lo siento claramente desde hace 50 años

- Albert Einstein -

Entendido el modelo y determinado para un volumen de estudio particular, el siguiente paso sería aplicarlo a un caso concreto. Por ello, en el presente capítulo se detalla la utilización del modelo en un terreno objeto de estudio y para diferentes situaciones (estación, cultivo, precipitaciones...). Naturalmente, el terreno tiene que ser previamente analizado, tanto en parámetros como en orografía. Posteriormente, se podrá ejecutar una simulación del modelo desarrollado en el capítulo anterior aplicado a este terreno.

2.1 Aplicación

El plano del terreno que se utilizará en el estudio se muestra en la figura 2.1.

Se trata de un plano teórico, de un proyecto de Etérea Estudios que forma parte de un tutorial para el modelado de una carretera y el relieve cercano a ésta. Naturalmente, en este trabajo sólo nos centraremos en el relieve, siendo la creación de la carretera completamente despreciable. Usando como base este terreno simulado, tomamos una porción de tierra a modo de parcela agrícola cercana a una carretera. Concretamente, se tomó como parcela la sección del terreno incluida en el rectángulo rojo que se muestra en la figura 2.1.

Gracias a que el plano tiene las cotas de altura señaladas, es trivial poder ofrecer una altura media del terreno. Nótese que la parcela ocupa una superficie de 100x200 metros, es decir, veinte mil metros cuadrados de superficie. Suponiendo que la profundidad del terreno aplicado al cultivo, es decir, la profundidad de la zona de las raíces es de medio metro, tendríamos un volumen realmente dispar: un prisma rectangular de dimensiones 100x200x0.5 metros. Es lógico pensar que la humedad no será igual en todo el volumen, por lo que carecería de sentido utilizar como sistema único la totalidad del volumen. Surge por tanto la idea de poder tener divisiones dentro de la parcela, en lo que se denominará de aquí en adelante “celdas”. Cada celda tendrá un valor de humedad diferente al de sus vecinas, ya que cada una tendrá una altura media diferente y, por tanto, diferente valor de humedad como se vio en el último apartado del pasado capítulo debido a escorrentías y flujos laterales. Así, constituirán un sistema que relacione precipitaciones y humedad diferentes.

Las dimensiones de cada celda podrían ser pensadas como las dimensiones del cubo del capítulo anterior: un volumen de un metro cuadrado de superficie y medio metro de profundidad. Sin embargo, esto resultaría en veinte mil celdas dentro de la parcela, algo poco práctico, especialmente cuando se tiene en cuenta que la idea posterior al modelado es el control. Esto supondría exactamente veinte mil sensores de humedad (uno por celda) en caso de querer hacer un sistema de realimentación a cada una. En caso contrario (caso realista) de no tener veinte mil sensores, las celdas tendrán que ser de mayor tamaño. En este estudio se tomó como celda el volumen de terreno de dimensiones 10x10x0.5, considerando que la zona de profundidad de raíces es medio metro y la

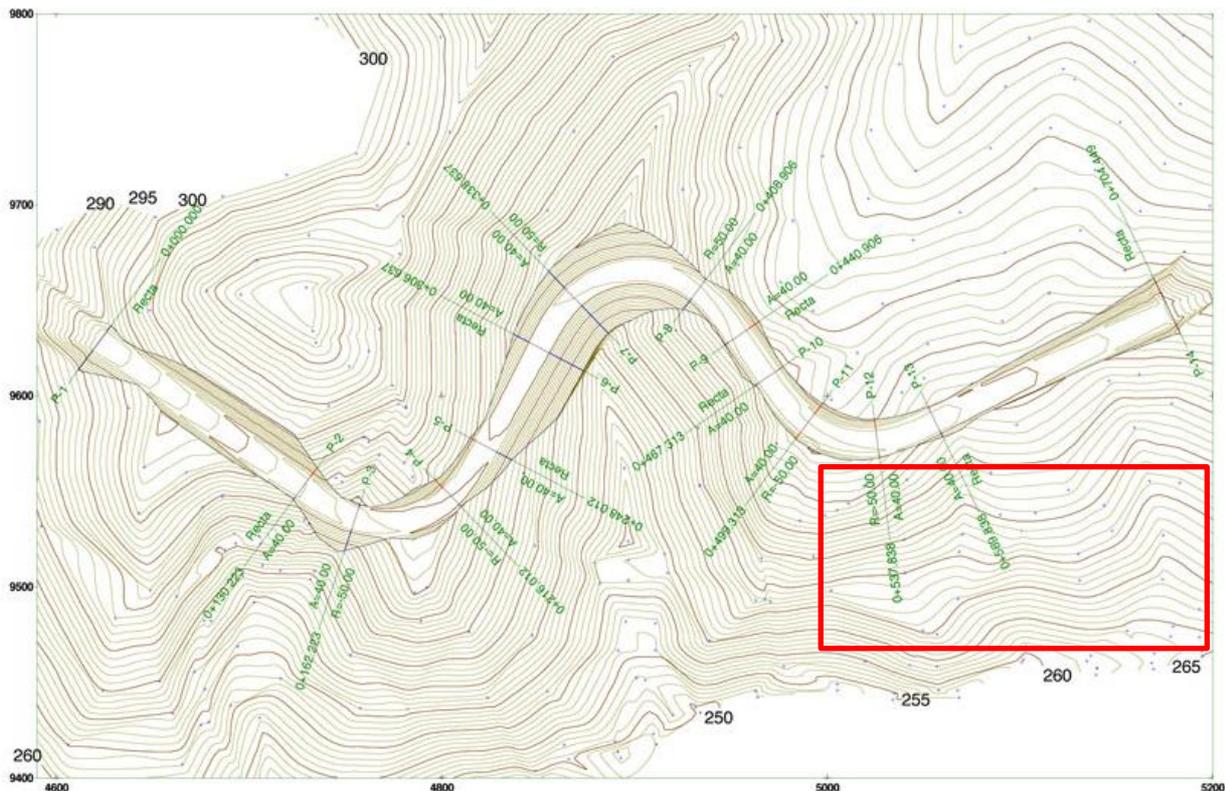


Figura 2.1. Plano del terreno teórico objeto de estudio. Fuente: [30]

superficie de cada una de cien metros cuadrados. Cada una de estas celdas, en total doscientas celdas dentro de la parcela, es un sistema diferente, recordando que las celdas afectan a sus vecinas proporcionando aportes de agua o recibéndolos. La extrapolación del modelo del cubo del capítulo pasado a este nuevo volumen es trivial: los volúmenes de agua se seguirán midiendo por unidad de superficie, esto es, en litros por metro cuadrado (mm). Como cada celda tiene cien metros cuadrados de superficie, cuando se mencione un cierto aporte de agua en mm, simplemente se referirá a la cantidad por metro cuadrado; y para calcular el aporte total a la celda completa, basta con multiplicar esa cierta cantidad por cien. Por lo demás, el modelo es válido, siempre y cuando se cumplan las siguientes hipótesis:

- El volumen al que se aplica la ecuación de continuidad es de dimensiones 10x10x0.5 metros, una denominada “celda”.
- Como se mencionó, cada celda constituye un sistema propio, por lo que sus entradas y salidas serán diferentes a las de otras celdas. Esto quiere decir que cada celda tendrá valores de infiltración diferentes y valores de humedad diferentes al resto.
- No se puede hacer distinción dentro de la propia celda: la humedad de cada una es su valor medio y es único para todo el volumen de la celda.
- No se puede hacer distinción tampoco de la altitud dentro de la celda. La altitud que tenga la celda corresponde a su valor medio.
- Dentro de la celda se considera un terreno perfectamente homogéneo: los parámetros del suelo son idénticos para cada punto del suelo dentro de la celda. Esto implica, por ejemplo, que toda la celda tenga una única porosidad.

Por simplicidad, además de las anteriores hipótesis, se proponen unas adicionales:

- Todo el terreno tendrá la misma cantidad de precipitaciones recibidas por unidad de superficie, es decir, se supone una lluvia homogénea en toda la parcela. No se cumple esta hipótesis con el riego, que será probablemente diferente para cada celda.
- Todo el terreno tiene los mismos parámetros del suelo, es decir, se supone un terreno perfectamente homogéneo en toda la parcela, sin distinciones dentro de la misma.

Para concretar la orografía del terreno, se construyó una matriz, de 10x20, en la que se recogía el valor de altitud medio de cada celda. Además, se hizo una modificación en el valor de algunas celdas, con el fin de poder apreciar mejor el efecto de escorrentías en casos de mínimos locales (puntos del mapa con altitud media menor a la altitud media de cada una de las celdas vecinas).

288	288	288	288	287	285	284	284	284	283	283	283	282	282	281	279	279	280	278	278
288	288	288	286	285	284	283	283	282	282	282	282	282	281	279	277	276	276	276	277
288	288	285	284	284	284	284	281	281	281	280	280	279	278	277	276	274	274	274	275
285	285	285	282	280	281	279	279	280	280	280	280	278	277	276	275	274	273	273	274
282	281	279	279	278	278	277	277	277	276	276	276	275	275	273	272	271	271	272	272
278	277	276	276	275	274	274	274	273	274	274	274	274	274	273	273	272	271	270	270
275	274	274	274	273	273	272	271	271	270	270	271	271	271	271	270	269	269	270	270
270	271	272	272	272	271	270	269	268	267	267	268	269	269	269	266	265	266	268	269
270	269	270	268	269	269	267	268	267	267	266	267	268	268	268	265	263	265	268	270
268	267	266	265	266	267	266	267	267	266	266	266	266	267	267	268	269	269	270	270

Tabla 2.1. Valores de la altitud media de cada celda, en metros.

Así, la primera celda será aquella que ocupe el lugar de primera fila y primera columna. Más adelante, se utilizará el término de “vecindad” para referirse al conjunto de celdas vecinas 5x5 que formen un grupo característico por su posición. Por ejemplo, se denominará vecindad 1 a la vecindad 5x5 formada por las celdas entre las filas primera y quinta y las columnas primera y quinta, siempre leído de arriba hacia abajo y de izquierda hacia derecha.

Gráficamente, el plano puede representarse en Matlab a través de la función *mesh* y la función *gradient*. Se adjuntan en las figuras 2.2 y 2.3 las representaciones de la parcela por diferentes medios, con el valor de la altura según la coordenada del plano. El primer caso no está a escala, y en el segundo se aplica la suposición de que cada celda tiene un valor medio único de altitud.

Por último, el modelo no sólo exige un volumen al que aplicarse y unos valores de alturas para poder determinar escorrentías y flujos laterales, sino que hay una serie de parámetros del suelo que deben ser previamente estimados. La estimación de estos parámetros se escapa al alcance de este trabajo, así que se hará uso de los resultados de un estudio desarrollado en 2004 por Jiménez-Bocanegra [31]. Se adjuntan en la tabla 2.2, aunque la mayoría ya han sido utilizados y cuantificados en el capítulo anterior.

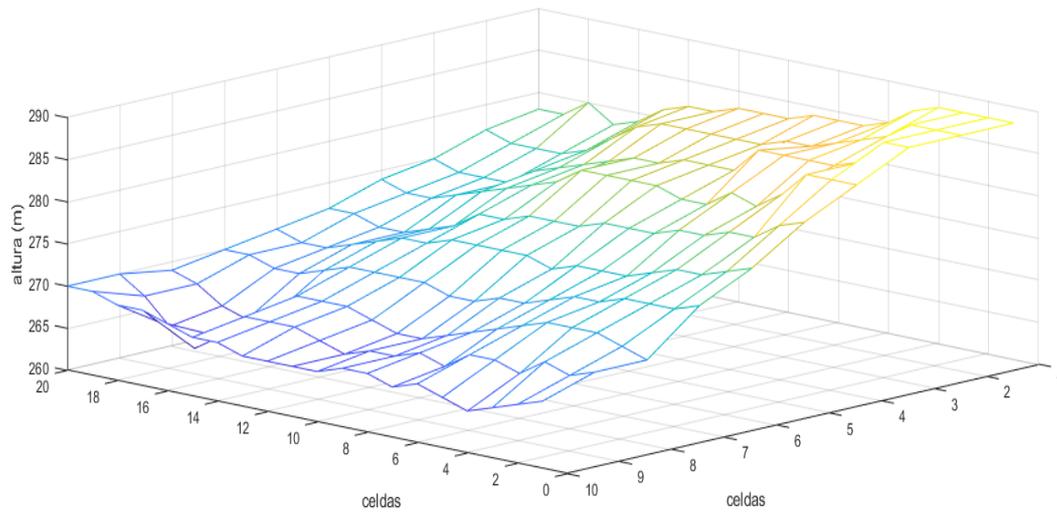


Figura 2.2. Plano del terreno representado por *mesh*.

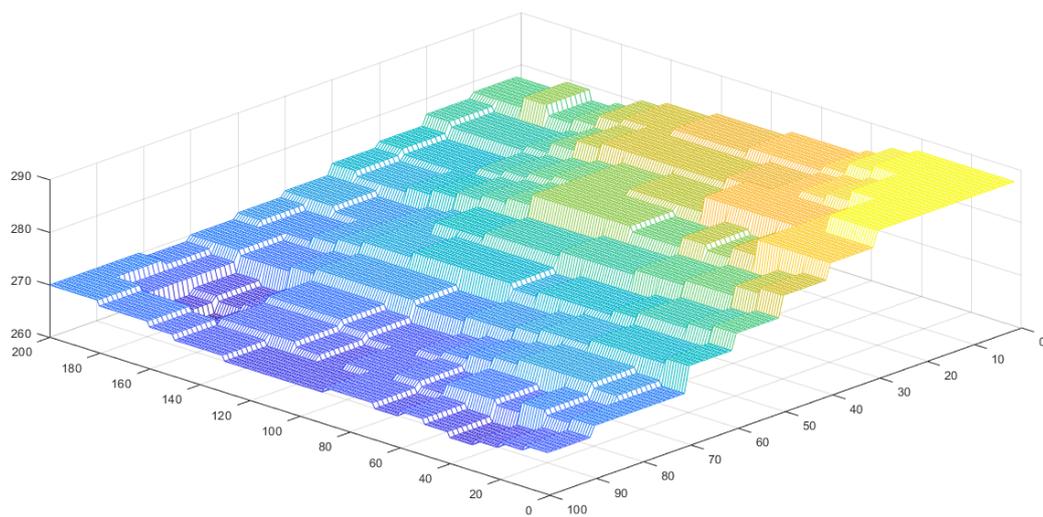


Figura 2.3. Plano del terreno representado con altura única en cada celda.

Parámetro	Valor
n (estación seca)	0.3
n (estación húmeda)	0.9
β	11.37
K_{sat}	518 mm/día
S_h (estación seca)	0.0163
S_h (estación húmeda)	0.1
S_w	0.2
S^*	0.4
τ_{escurr}	10

S_{fc}	0.55
E_{max} (estación seca)	3.823 mm/día
E_{max} (estación húmeda)	1 mm/día
T_{max} (estación seca)	5 mm/día
T_{max} (estación húmeda)	2 mm/día

Tabla 2.2. Valores de los parámetros utilizados.

Con todo esto, tenemos un terreno conocido en relieve y en parámetros del suelo, así como el volumen al que se aplica la ecuación de balance de agua desarrollada en el anterior capítulo. Simplemente se extrapola el modelo del cubo a un volumen de mayores dimensiones, en este caso la celda. Se dispone del modelo listo para implementar en simulación.

2.2 Simulación

Para llevar a cabo la simulación, se hace uso de Matlab, y de su extensión Simulink. Este será el software necesario y único del presente trabajo.

Lo primero que se requiere es una función dentro de Matlab que reciba los valores de las entradas (aportes de agua) y obtenga un valor de humedad. Dicho de otro modo, se requiere de un archivo *Interpreted MATLAB function* para relacionar matemáticamente agua recibida y humedad del suelo. Naturalmente, la relación matemática es la que se concluyó en la ecuación 1.17.

Sin embargo, hay que destacar que esa ecuación realmente relaciona agua recibida por diversas fuentes con la variación de humedad del suelo, es decir, no da como resultado el valor de la humedad. Se trata por tanto de una ecuación diferencial:

$$\Delta S = \frac{dS}{dt} \quad 2.1$$

La ecuación devuelve la variación de humedad en el volumen de estudio al cabo de la unidad de tiempo, es decir, la derivada de la humedad respecto al tiempo. Bastará con integrar la salida de la función para lograr tener el valor de la humedad.

Esta función de Matlab tiene como entradas:

- Valor de la altura de la celda que se está evaluando.
- Valor de las alturas de las cuatro celdas vecinas.
- Valor anterior de la humedad, S^-
- Conjunto de parámetros de la tabla 2.2.
- Valor de la cantidad de agua aportada en el instante de evaluación, tanto en riego como en precipitaciones.
- Tiempo, es decir, el día que se está evaluando.

Como única salida, devuelve el valor ΔS , que posteriormente se integrará.

Puede consultarse el código en el anexo Códigos, *modelo.m*, que es básicamente la implementación de la ecuación 1.17.

Sin embargo, para que esta función dé el valor de variación de humedad es necesario el valor de humedad anterior. Por tanto, sólo tiene sentido si se emplea para una serie de instantes de evaluación seguidos. Los instantes de tiempo donde se evalúa la humedad son los días. Para ello, se hace uso de Simulink. Se desarrolló un montaje de bloques que permitiera la ejecución del modelo para la celda en cuestión a lo largo de varios días.

El montaje puede consultarse en la figura 2.4. Nótese que las entradas a la *Interpreted MATLAB function* (*modelo.m*) son las anteriores mencionadas, la salida de la humedad se integra a través del bloque de integración y se realimenta el modelo con ello.

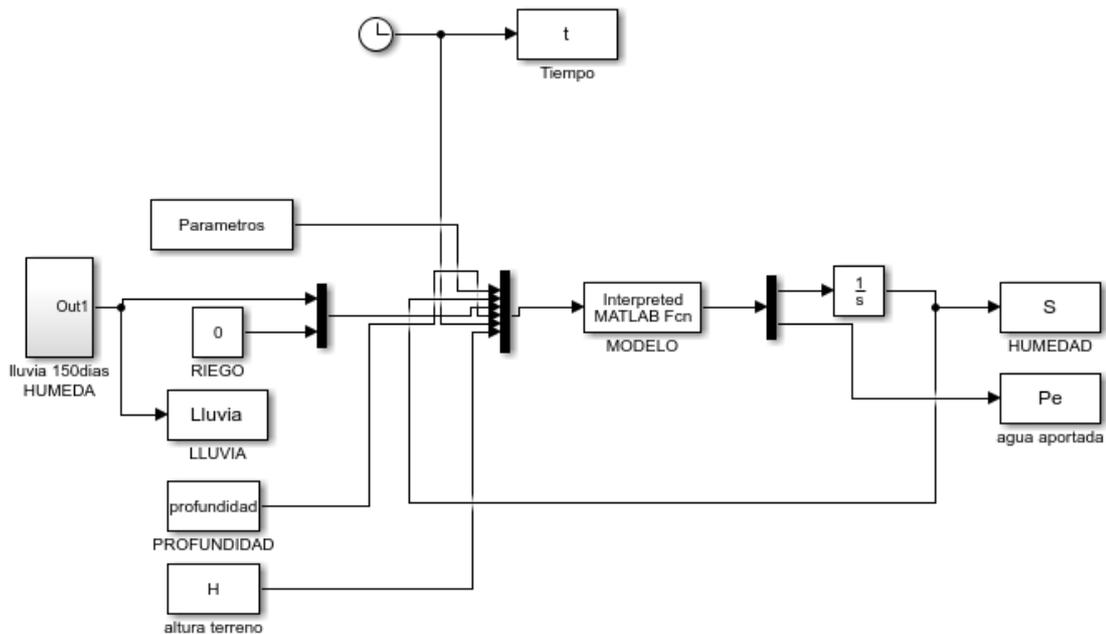


Figura 2.4. Montaje realizado en Simulink para la evaluación de la humedad en una celda a lo largo del tiempo.

Además, se añadió una segunda salida Pe como información adicional que equivale al agua aportada en la celda cada día, siendo este valor la suma de las precipitaciones, el riego y el efecto de las escorrentías.

Se eligió un tiempo de simulación de sesenta días inicialmente, aunque posteriormente se utilizará un intervalo de ciento cincuenta días para las simulaciones (cinco meses, que serán los equivalentes a la estación seca o estación húmeda según el caso). Las precipitaciones se aplican lógicamente a diario (cantidad de agua por día) al igual que las lecturas de humedad, S , son diarias.

Con esto, para una determinada celda y conocida su vecindad $V4$ (las celdas de arriba, abajo, derecha e izquierda), se obtendrá la evolución de la humedad a lo largo de los días. Para poner en práctica este montaje, se elaboró un plano auxiliar de pruebas, de 5×5 celdas. Puede consultarse las alturas de éste en la tabla 2.3.

Como son veinticinco celdas en total, y teniendo que conocer la vecindad próxima para cada una de ellas, se plantean dos opciones. La primera, es tomar como vecindad para las celdas de los límites aquellas celdas que formen parte del plano, es decir, que para las celdas límite del plano no haya cuatro celdas vecinas, sino tres o dos (para el caso de las esquinas). La segunda opción sería simplemente evaluar las celdas interiores del plano, dejando las límite como información necesaria para la evaluación de las interiores. En este estudio se optó por la segunda manera, haciendo que se evalúen nueve celdas (3×3 del interior del plano).

Para cada una de las nueve celdas evaluadas se requiere ejecutar el montaje que se muestra en la figura 2.4, es decir, simular cada una de las celdas a lo largo de los sesenta días. Para ello, se requiere aportar las alturas de la celda en cuestión y su vecindad para cada celda evaluada. Esto lleva a la idea de formar un programa que ejecute en bucle las simulaciones con cada celda, siendo cada iteración la evaluación de una celda. Por

cada una de ellas, se cambian los valores del terreno correspondiente y se hace una llamada al archivo *modelosim.slx*, que es el archivo de Simulink correspondiente a la figura 2.3. Este código, ejecutado, guardará en sendos vectores los valores de humedad para cada celda a lo largo de los días y las precipitaciones. Puede consultarse en el anexo de códigos: *simulación_celdas.m*. Nótese que requiere de la ejecución de un par de programas adicionales, *parámetros.m* y *altura_terreno.m*, que aportan la información necesaria sobre los parámetros del suelo y la altitud de las celdas respectivamente.

Se obtiene el primer resultado de simulación del modelo aplicado a este plano auxiliar de pruebas. Puede verse en la figura 2.5 (evolución de la humedad en cada una de las nueve celdas centrales del plano) y figura 2.6 (precipitaciones aplicadas al modelo). Se recuerda que las precipitaciones son idénticas para cada celda (hipótesis inicial) y se tomaron los parámetros equivalentes a la estación húmeda. La diferencia de humedad en cada celda es debido a la orografía, que afecta en torno a un 1-2% de humedad en la celda más afectada, la novena, ya que constituye un mínimo local de altura en el plano.

293	293	292	289	287
290	290	289	286	285
287	286	285	284	283
285	284	283	281	285
282	281	282	286	290

Tabla 2.3. Valores de la altitud media de cada celda del plano auxiliar, en metros.

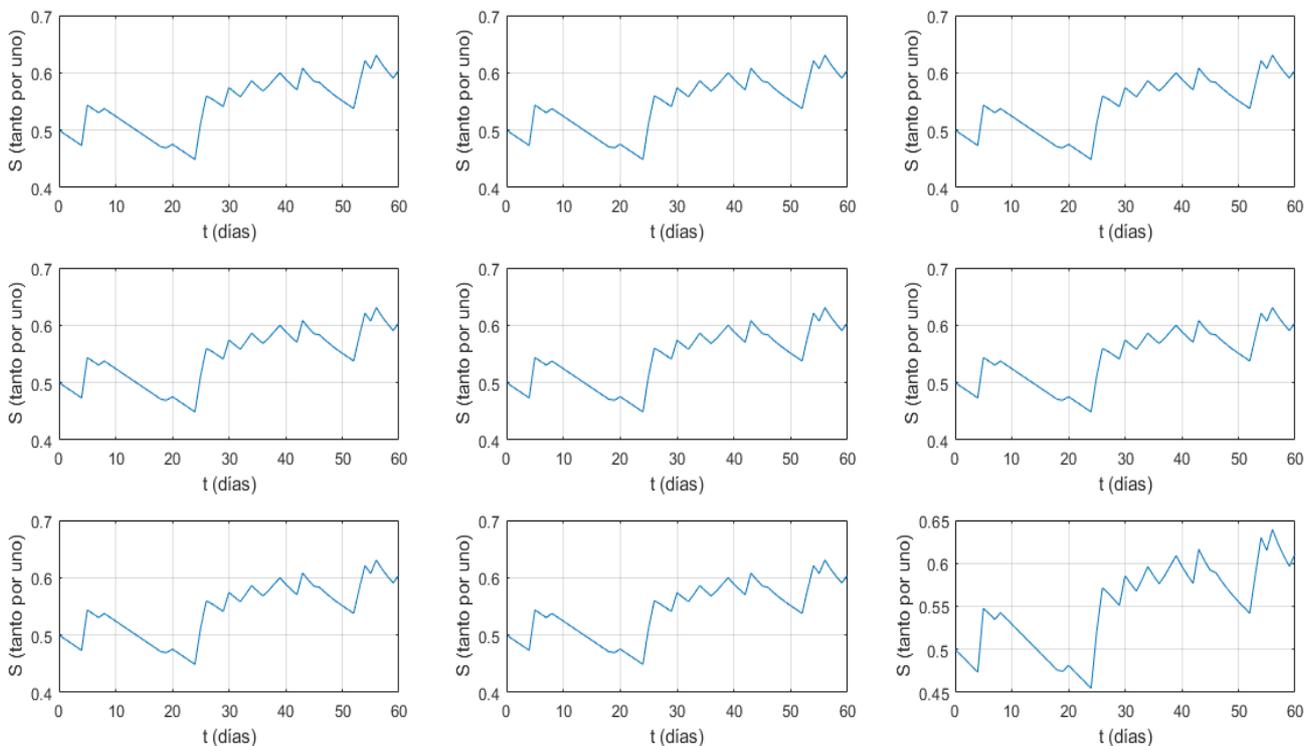


Figura 2.5. Evolución de la humedad en las nueve celdas centrales el plano auxiliar.

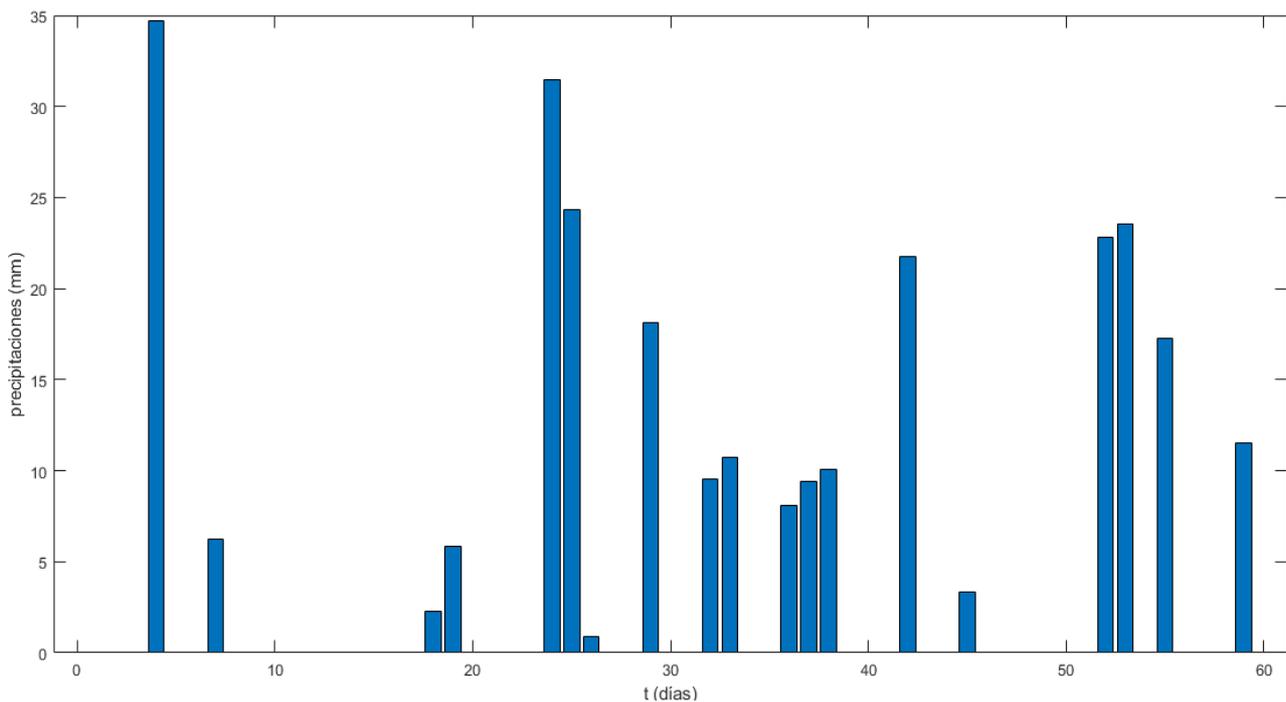


Figura 2.6. Histograma de precipitaciones en el plano auxiliar.

Lo más evidente observando ambas figuras es la subida de humedad cuando se producen precipitaciones, y la posterior caída de humedad a falta de lluvia.

El siguiente paso será la utilización de estos programas para un caso realista.

2.3 Simulación en estación húmeda y seca

Caso de estación húmeda. *La Coruña, meses de octubre a febrero (150 días).*

La estación húmeda coincide con los meses con mayor número de precipitaciones. Para hacer un caso notable, se ha estudiado la estación húmeda de La Coruña, donde las precipitaciones son abundantes y frecuentes.

Los parámetros del suelo en este caso se han especificado con anterioridad en este capítulo. Las precipitaciones de La Coruña son las que se aprecian en la figura 2.7. Estos son los datos que se utilizarán en las simulaciones: como el primer mes de simulación, los primeros treinta días, corresponden a 130 milímetros de precipitaciones, basta con hacer un reparto, de carácter aleatorio pero lógico, de esos 130 milímetros entre los primeros treinta días. Se sigue este procedimiento igual para cada uno de los cinco meses. También sería una opción utilizar histogramas diarios de precipitaciones, y utilizar esos datos como las precipitaciones diarias en la simulación.

Así, se tienen unas cantidades de agua aproximadas a la realidad para la simulación. Se aplican en el mismo terreno auxiliar de pruebas del apartado anterior. Igualmente, la aplicación de lluvias es de carácter diario (cantidad de agua por día) y las lecturas de humedad, S , son también diarias. Lógicamente, la cantidad de agua aportada por riego sigue siendo cero. Se modifica la duración de la simulación a 150 días que equivalen a los cinco meses de estación húmeda. Se hace uso de los mismos programas que en el apartado anterior, y se obtienen los resultados que pueden verse en la figura 2.8. La humedad toma valores en cada celda de hasta el 70%, y con valores tan altos predominan las pérdidas por percolación sobre las demás. Esto se aprecia en un decrecimiento de humedad por día mayor que cuando la humedad tiene valores inferiores, por lo que la variación de humedad por día es mucho más acusada.

Precipitación media La Coruña, España

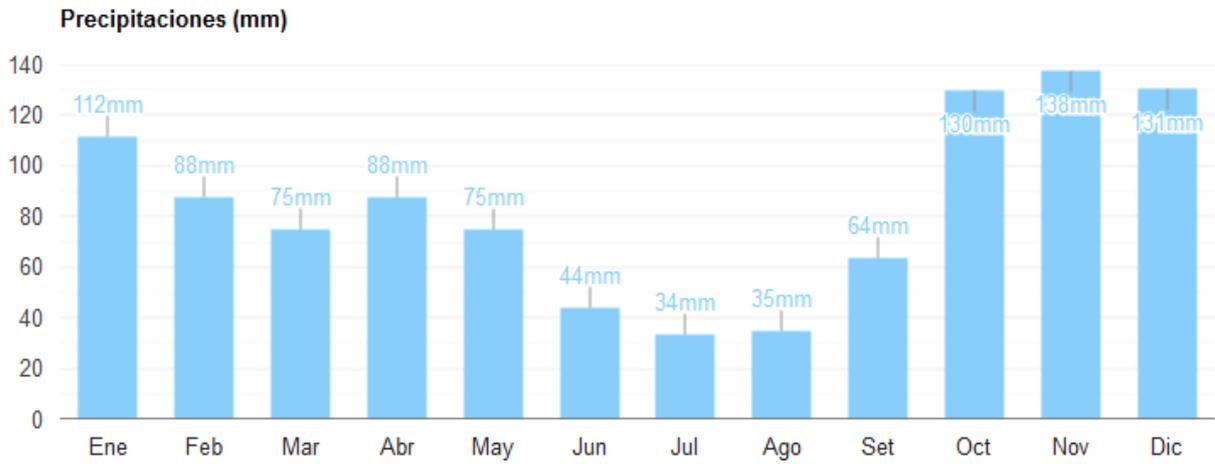


Figura 2.7. Histograma de precipitaciones mensuales medias en La Coruña. Fuente: [32].

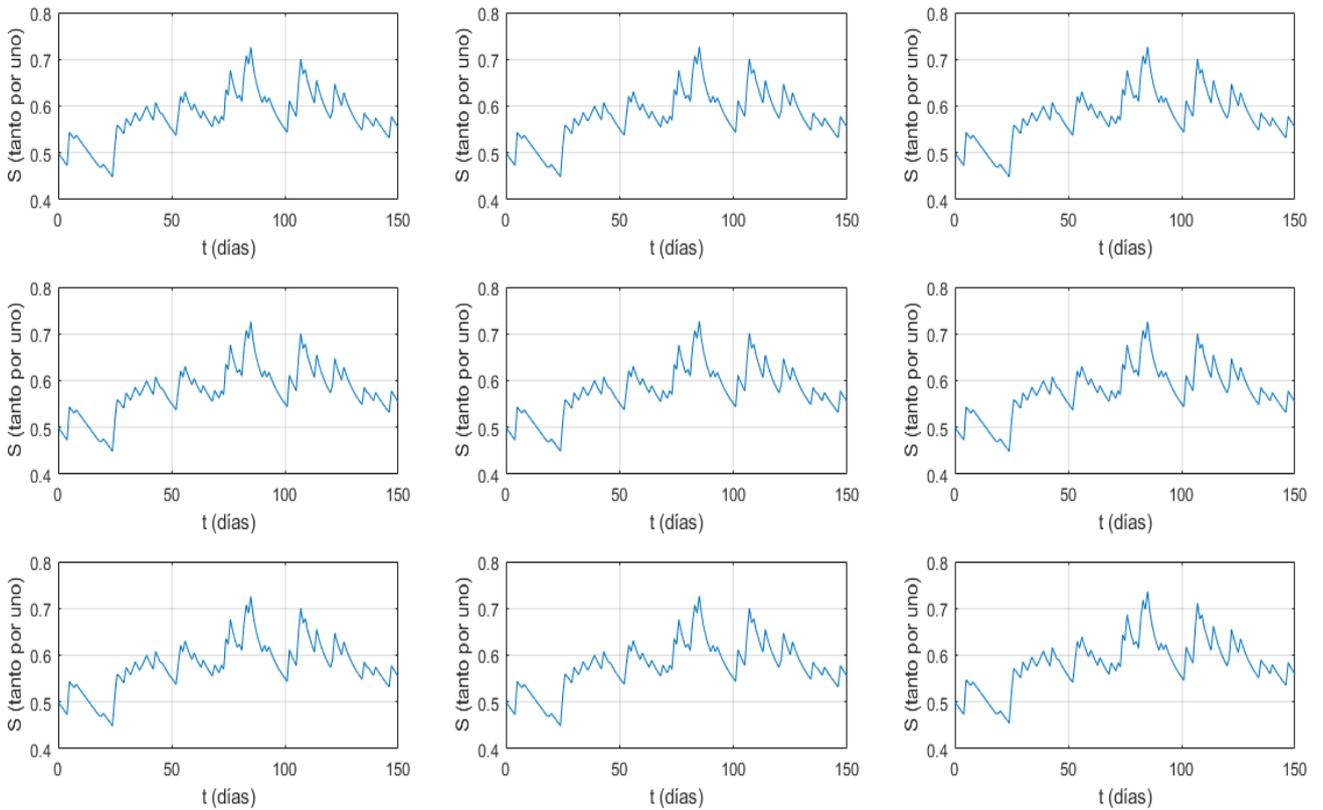


Figura 2.8. Evolución de humedad en celdas del plano auxiliar en estación húmeda.

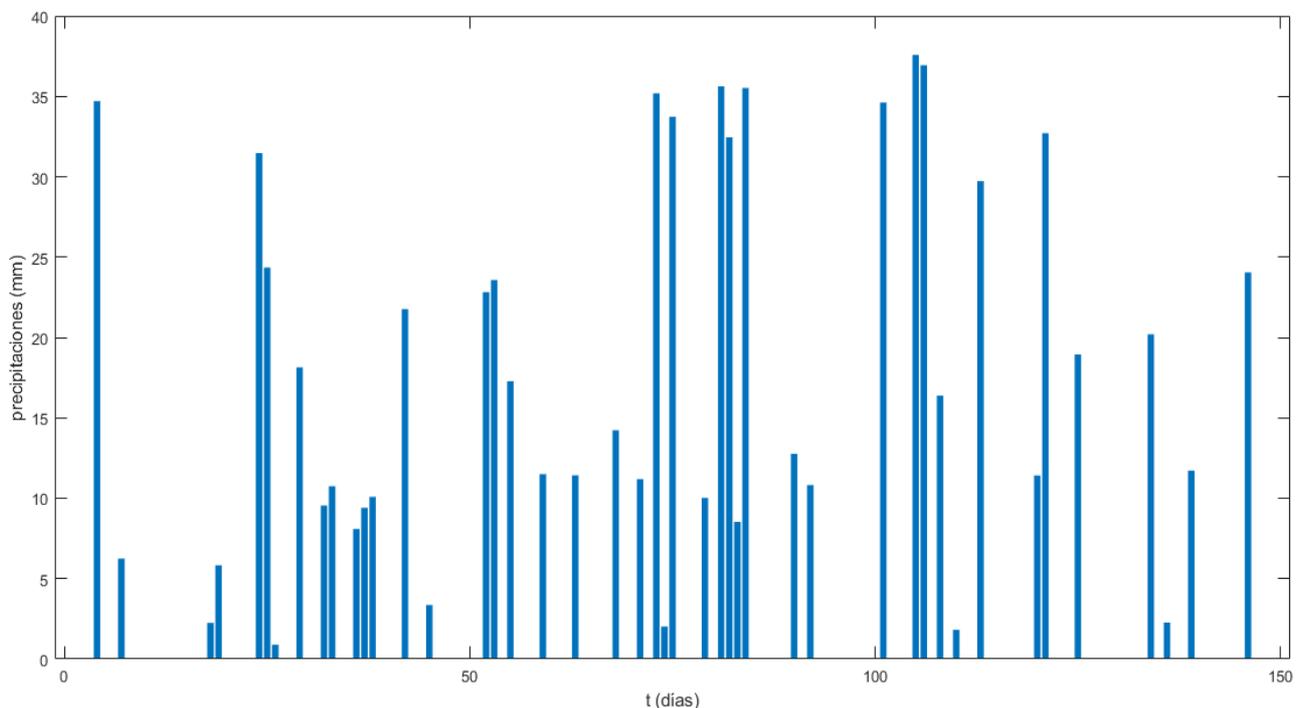


Figura 2.9. Precipitaciones durante la simulación de estación húmeda en plano auxiliar.

Caso de estación seca. Sevilla, meses de mayo a septiembre (150 días).

Análogamente al caso anterior, se aplica el modelo al mismo terreno de pruebas, pero en una situación de clima seco. Se eligió Sevilla en los meses de entre mayo y septiembre (150 días) como representación de este caso.

Igualmente, las lluvias, ahora muy poco frecuentes, se simulan diariamente. El riego sigue siendo cero y la simulación se prolonga 150 días para cada celda. Los parámetros utilizados para el suelo son los que corresponden a la estación seca.

Las precipitaciones de Sevilla en estos meses pueden consultarse en la figura 2.10. Se procedió de forma similar al ejemplo anterior de estación húmeda, repartiendo de forma lógica la cantidad de precipitaciones entre los días de la simulación, y teniendo en cuenta el promedio de días de lluvia en Sevilla por mes, que puede consultarse en la figura 2.11.

Finalmente, se adjuntan los resultados de la simulación de este caso en la figura 2.12. Se observa niveles de humedad mínimos (llegando a la humedad residual del suelo) en los meses de mayor calor y precipitaciones mínimas de Sevilla. En estos niveles de humedad, la variación de humedad diaria es mucho menor que en el caso anterior.

Precipitación media Sevilla, España

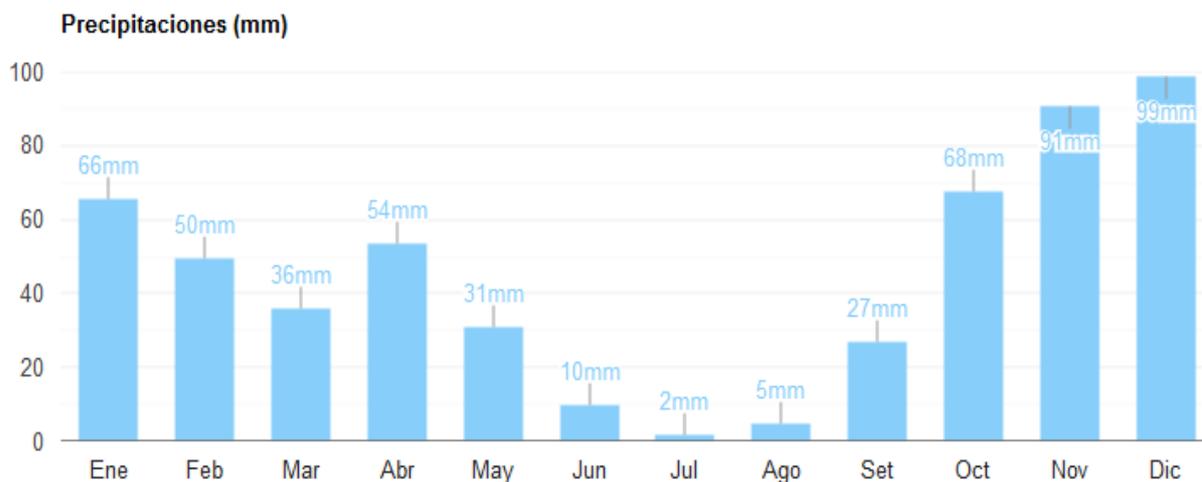


Figura 2.10. Histograma de precipitaciones mensuales medias en Sevilla. Fuente: [33].

Promedio de días de lluvia Sevilla, España

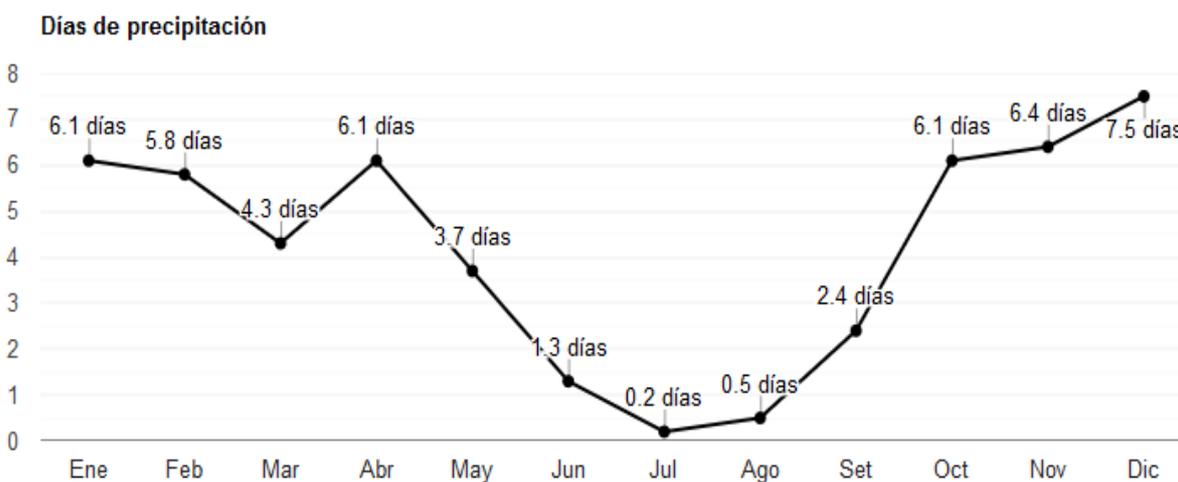


Figura 2.11. Promedio de días de lluvia por mes en Sevilla. Fuente: [34].

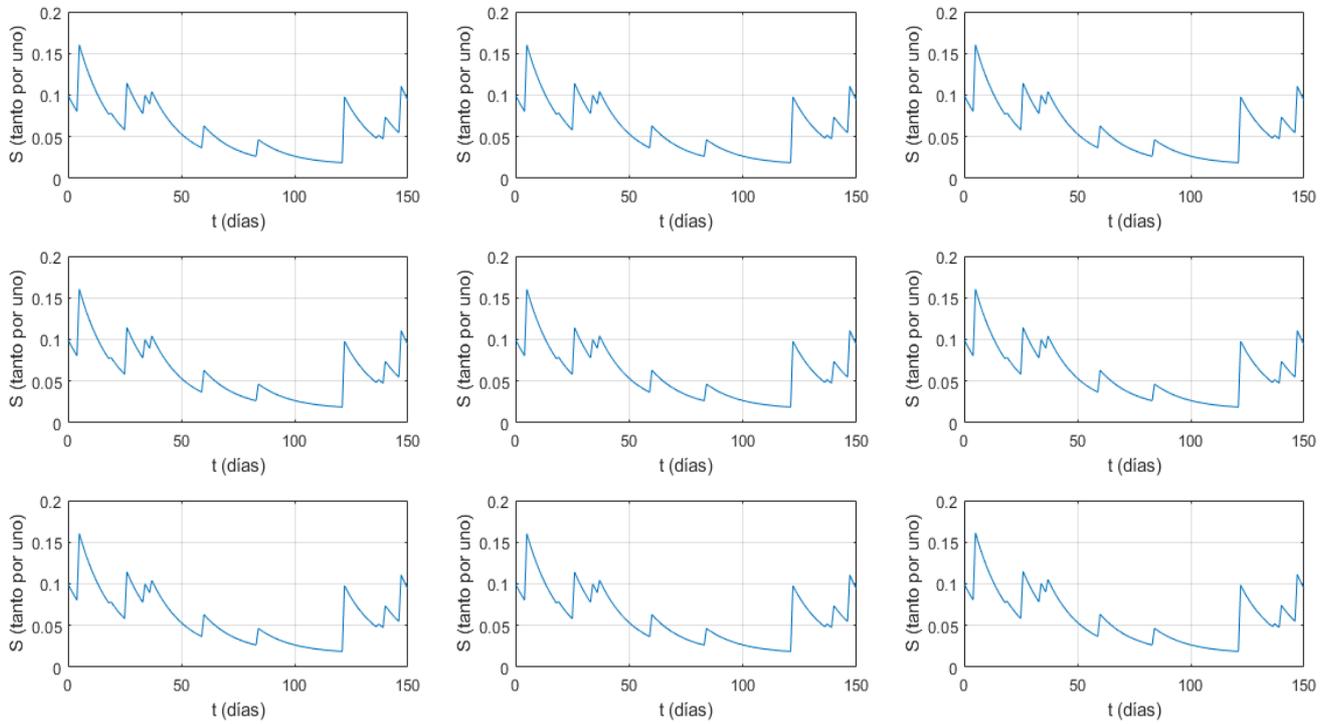


Figura 2.12. Evolución de humedad en celdas del plano auxiliar en estación seca.

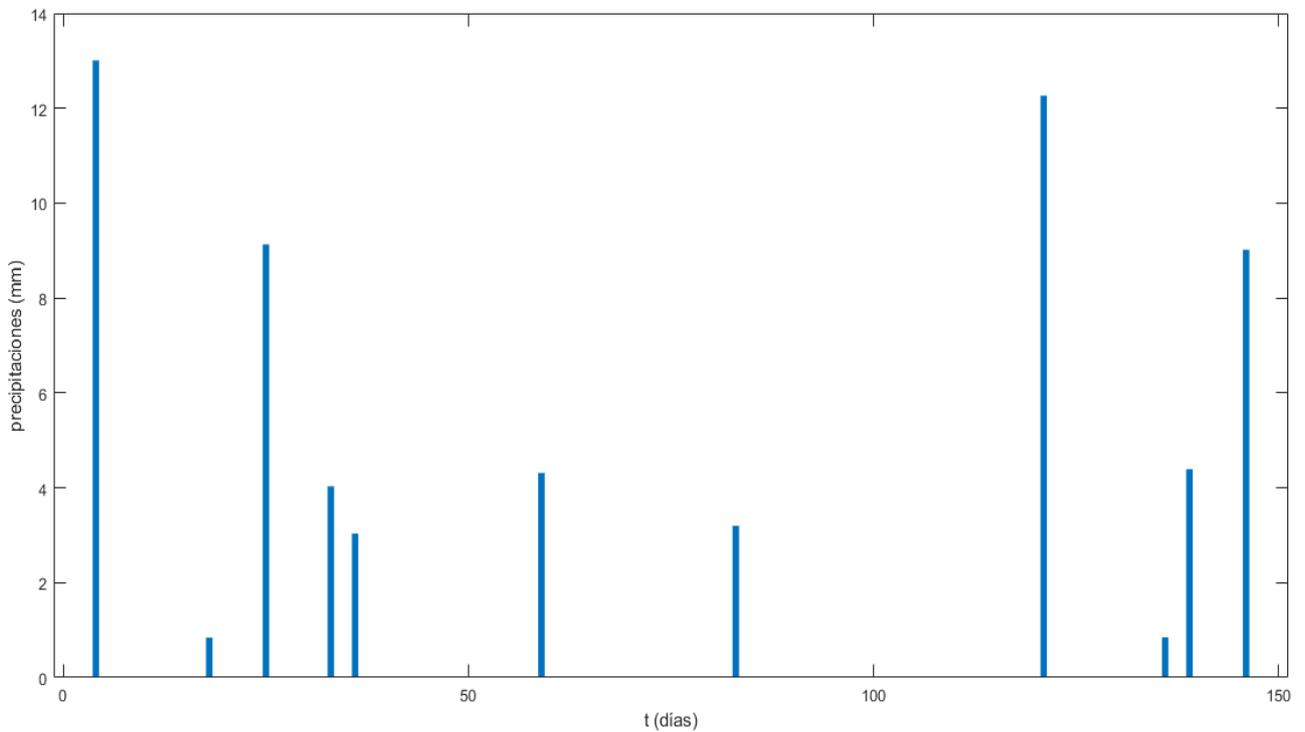


Figura 2.13. Precipitaciones durante la simulación de estación seca en plano auxiliar.

3 CONTROL DE HUMEDAD EN EL SUELO

Solo puedo controlar lo de hoy o el presente, ahora. [...]

No me gusta mucho pensar en el futuro, porque el presente es más importante.

- Ayumi Hamasaki -

La simulación anterior emula el comportamiento del contenido del agua por volumen en el suelo. Como se explicó en la introducción del presente trabajo, la idea de conocer este modelo era la posibilidad posterior de diseñar controladores que sean capaces de mantener la humedad a un nivel deseado. En este capítulo se plantearán estrategias de control clásicas para poder llevarlo a cabo.

Como es habitual en sistemas fuertemente no lineales, como el que nos ocupa, el primer paso suele ser la linealización del modelo en torno a un punto de trabajo. Con esto, suponemos un comportamiento del sistema cercano a la linealidad para el entorno del punto en cuestión. Tras obtener un modelo linealizado, se procede a diseñar el controlador.

Conseguido el controlador, la implementación supondrá mantener la humedad en un valor de referencia a través de la señal de control que, como se adelantó, es el riego del suelo. Para el control se requiere una realimentación de la salida del sistema, por lo que se requerirán de sensores. Es lógico pensar que cada celda dispondrá de su propio control, pues la humedad no es igual en cada una de ellas. Sin embargo, no es habitual el uso masivo de sensores de humedad en tierra, pues las sondas que se requieren tienen un elevado precio. Surge por tanto la necesidad de una estrategia de control que contemple la escasez de sensores, que supondrá no poder realimentar el bucle con la salida real del sistema.

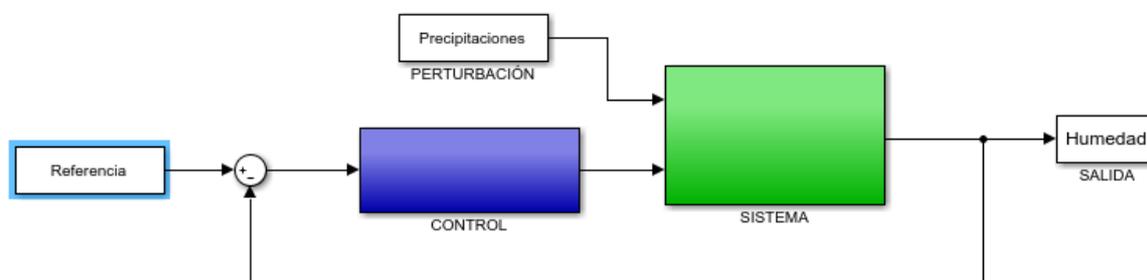


Figura 3.1. Esquema de control. Las precipitaciones forman parte de las perturbaciones, y el riego es la señal de control

3.1 Linealización y control en torno a un punto

La linealización se realiza en torno a un punto de funcionamiento, que será el valor de humedad deseado en el suelo, es decir, la referencia. La primera cuestión que solventar sería qué grado de humedad requieren los diversos cultivos. Este campo de conocimiento se escapa al alcance de este trabajo, por lo que se buscaron los datos objetivos para algunos cultivos. De cara al control, que un cultivo requiera por su naturaleza un valor de humedad u otro simplemente significa utilizar una u otra referencia.

El conocimiento del modelo es de gran utilidad. Se realizaron varios experimentos, para analizar la respuesta del modelo ante un tren de escalones como entradas. La imagen 3.2 muestra la respuesta del modelo y la imagen 3.3 el tren de escalones.

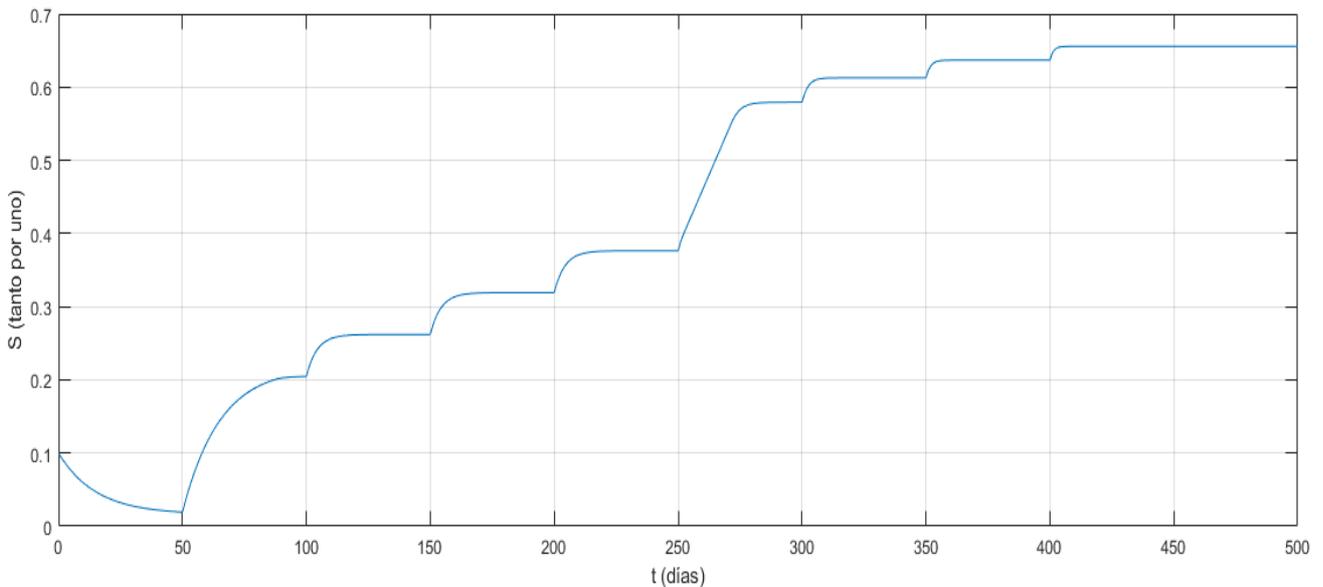


Figura 3.2. Respuesta del modelo ante tren de escalones.

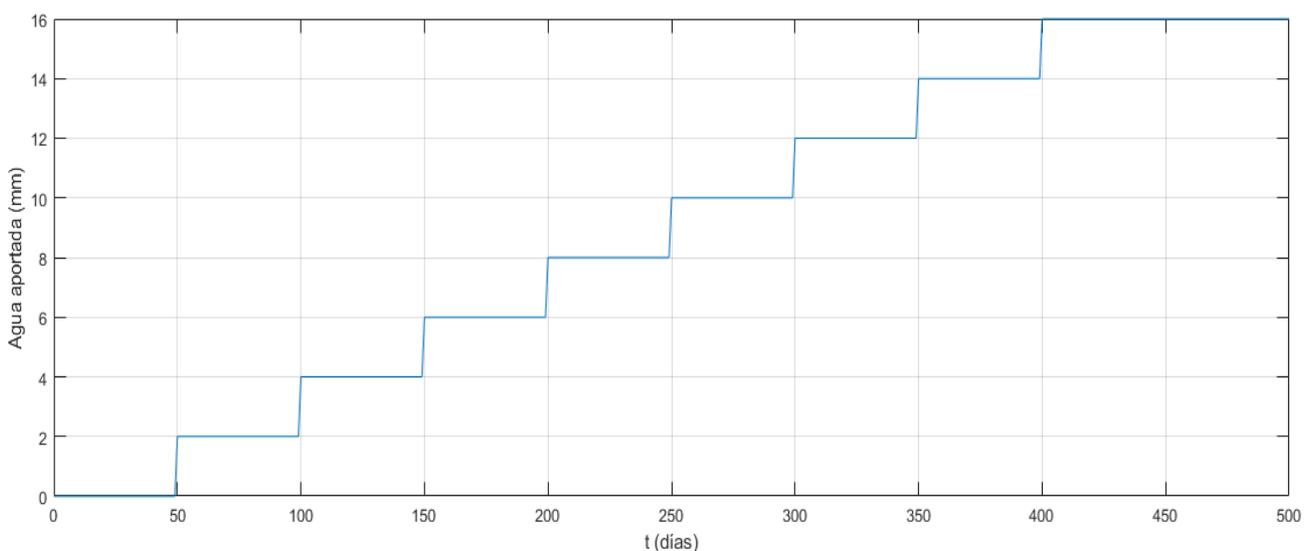


Figura 3.3. Tren de escalones de 2 mm cada uno.

Naturalmente, esta prueba se realizó en ausencia de precipitaciones, en estación seca durante 500 días de simulación del modelo en la celda central del plano auxiliar. Se aprecia un comportamiento fuertemente no lineal, debido a las pérdidas, que tienen efectos diferentes según el tramo. En casos donde la percolación profunda predomina, es decir, en valores de humedad del suelo mayores a S_{fc} , las pérdidas aumentan según se muestra en la figura 1.4, haciendo que para aumentar la humedad se requiera más agua tanto mayor sea el nivel previo de humedad.

También se aprecia un tramo en la figura 3.2 lineal con respecto al tiempo. Esto quiere decir que, ante una entrada constante de agua, por ejemplo, 10 mm como es el caso del experimento, la humedad aumenta a lo largo de los días linealmente. Un mayor aporte significará una pendiente más acusada, aunque seguirá un crecimiento lineal en el tiempo. Parar el aporte de agua en este tramo, esto es, poner como entrada constante al modelo 0 mm, significará una reducción de humedad también lineal respecto al tiempo. Este tramo corresponde a los casos donde la evapotranspiración es máxima, sin llegar a ser apreciable el efecto de la percolación profunda.

Sin embargo, para el tramo donde las pérdidas de transpiración y evaporación son considerables y proporcionalmente dependientes del grado de humedad del suelo (hasta el valor de humedad S^* , como puede verse en la figura 1.4), sí hay un comportamiento lineal entre entrada y salida del modelo.

Toda esta información ayudará a la planificación del control para diversos puntos de trabajo.

Caso de estación seca. Sevilla, meses de mayo a septiembre (150 días). Cultivo de Tomate.

El tomate es un cultivo de regadío y solana que requiere de un riego exhaustivo. La humedad que necesita no debe superar 0.7, pues favorecería la aparición de hongos [35]. En general, la planta requiere entre litro y medio y dos litros de agua al día. Suponiendo que hay cuatro plantas por metro cuadrado, serían ocho litros por metro cuadrado.

Estos ocho litros por metro cuadrado de consumo, es decir, una pérdida de 8 mm, son representados en el modelo por la transpiración de la planta. Así, las pérdidas de transpiración contemplan por convenio todo el consumo de la planta, para crecimiento vegetativo y transpiración propiamente.

Volviendo la vista a las figuras 3.2 y 3.3, se estiman unos 22 mm para poder mantener un nivel de humedad en el suelo de aproximadamente 0.7. Este será el punto de funcionamiento para este caso concreto.

Tomado el punto, se realiza un experimento (con precipitaciones) para poder obtener un modelo linealizado en torno a él. Consistirá en un escalón de +4mm desde este punto y un escalón de -4mm desde el mismo punto. El resultado se aprecia en la figura 3.4.1.

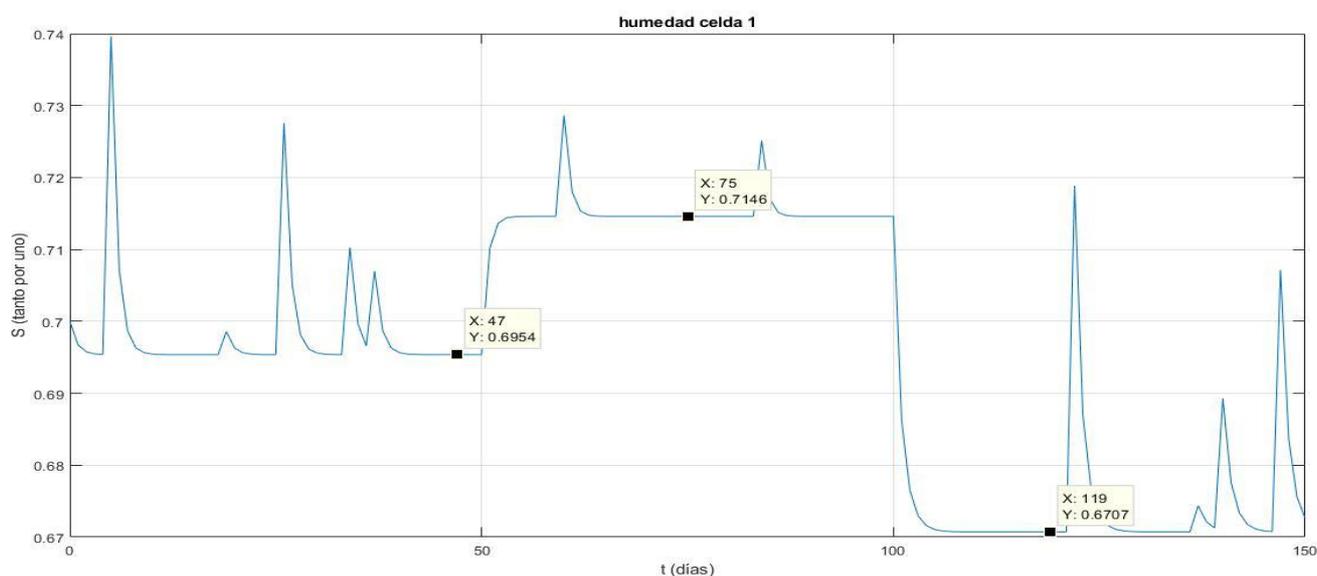


Figura 3.4.1 Humedad tras escalón positivo y negativo de 4 mm.

Se observa que el escalón de 4 mm positivo supone un aumento menor de humedad que la disminución de ésta al colocar a la entrada el escalón negativo de 4 mm. Este resultado es lógico, pues como se comentó, el aumento de humedad para un mismo aporte de agua se va reduciendo progresivamente según aumente el valor de la propia humedad. La conclusión de esto es que se obtendrán dos constantes de proporcionalidad K diferentes, una para cada escalón dado:

$$K_{subida} = \frac{0.7146 - 0.6954}{4 \text{ mm}} = 0.0048 \text{ mm}^{-1} \quad 3.1$$

$$K_{bajada} = \frac{0.6707 - 0.7146}{-8 \text{ mm}} = 0.0055 \text{ mm}^{-1} \quad 3.2$$

Para tener un valor medio entre ambas constantes de proporcionalidad, se tomará K con valor 0.005 mm^{-1} .

En cuanto al tiempo de subida, teniendo como definición el tiempo en alcanzar al menos el 90% del valor de régimen permanente, se puede aproximar en 2 días. La constante de tiempo, τ , se toma como el valor en que tarda el sistema en alcanzar el 67% del valor de régimen permanente. En este caso, sobre 0.67 días.

Por tanto, si se desea aproximar a un modelo de primer orden, quedaría:

$$G(s) = \frac{K}{\tau*s+1} = \frac{0.005}{0.67s+1} \quad 3.3$$

A partir de este punto, aunque el modelo desarrollado en el primer capítulo sigue siendo un modelo teórico del suelo, se considerará como el sistema real. La razón es la falta de un sistema real auténtico físico para poder compararlo con el modelo, reduciendo toda la práctica a simulación en Matlab y hacienda que el único sistema posible a controlar sea el propio modelo.

En la figura 3.4.2 se compara el modelo linealizado frente a la salida del sistema. Se aprecian discrepancias, tanto en el salto positivo como negativo en el régimen permanente, es decir, hay error. Es natural debido al ajuste aproximado de K , que era diferente para cada escalón. Este problema se mitigará en el control con el uso de efecto integral, que será capaz de eliminar el error en régimen permanente. También hay que tener en cuenta que las discrepancias entre modelo linealizado y sistema serán mayores tanto más se aleje del punto de funcionamiento (se recuerda, el punto $S = 0.7$). Sin embargo, tampoco debe ser una molestia, pues es supuesto que, en el cultivo de una planta, la humedad debe permanecer siempre constante, no necesitando

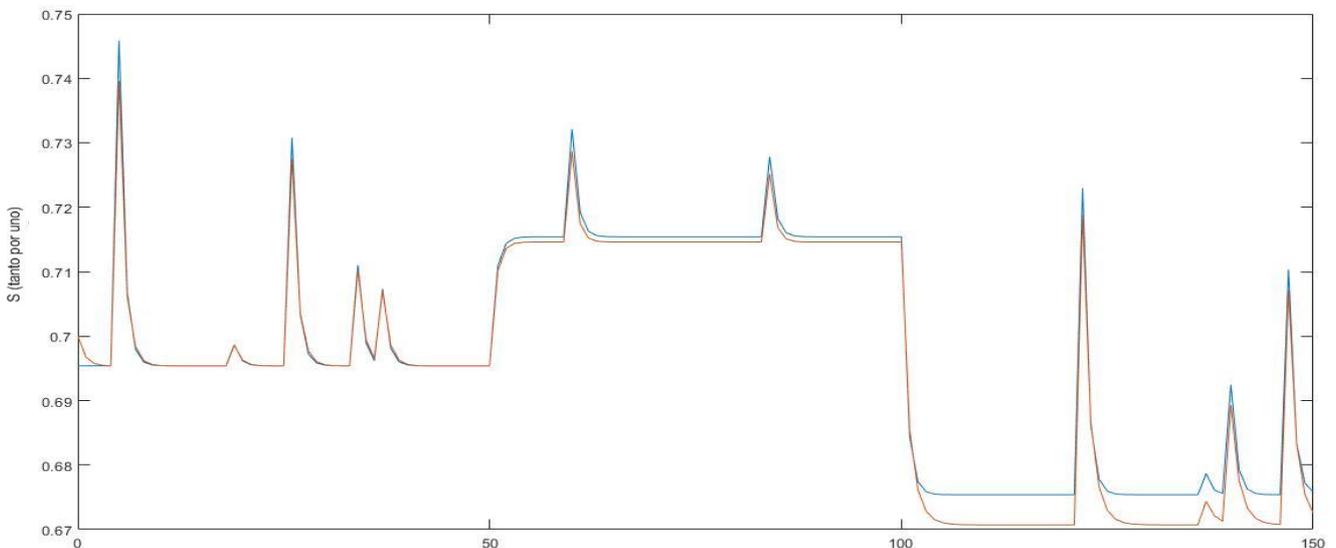


Figura 3.4.2 Humedad tras escalón positivo y negativo de 4 mm. Modelo vs real.

del cambio de referencia a lo largo de los 150 días y manteniéndose en torno al punto de funcionamiento elegido.

Este modelo linealizado para el punto $S = 0.7$ será el utilizado para calcular el control del sistema.

Utilizando técnicas clásicas de control, en concreto, la cancelación de dinámica, puede obtenerse un controlador proporcional con efecto integral (de ahora en adelante, PI). Como especificaciones, se pedirá un tiempo de subida en bucle cerrado de 2 días, sin errores en el régimen permanente.

$$K_c = \frac{3}{t_{SBC}} = 1.5 \tag{3.4}$$

$$C(s) = \frac{K_c}{s} * \frac{1}{G(s)} = \frac{1.5}{s} * \frac{0.67 s + 1}{0.005} = \frac{s + 1.5}{0.005 s} \tag{3.5}$$

Esta función de transferencia, en tiempo continuo, se debe implementar en el montaje de bloques de Simulink de acuerdo al esquema de la figura 3.1. El riego se producirá igualmente en la misma frecuencia que las precipitaciones y, en general, la evaluación de la humedad del suelo, es decir, diariamente. No tendría sentido regar los cultivos más de unas pocas veces al día, y por comodidad, se empleará un riego al día.

El riego, como señal de control, estará además saturado por debajo a un valor mínimo de 0 mm. Nunca podrá aplicarse una cantidad de agua negativa al suelo, es decir, se puede regar pero no “secar” el suelo. También habrá una saturación positiva, en un valor lógico, pues tampoco puede aportarse cantidades absurdas de agua en un día.

Añadiendo en el archivo de Simulink de la figura 2.4 el controlador, se obtiene:

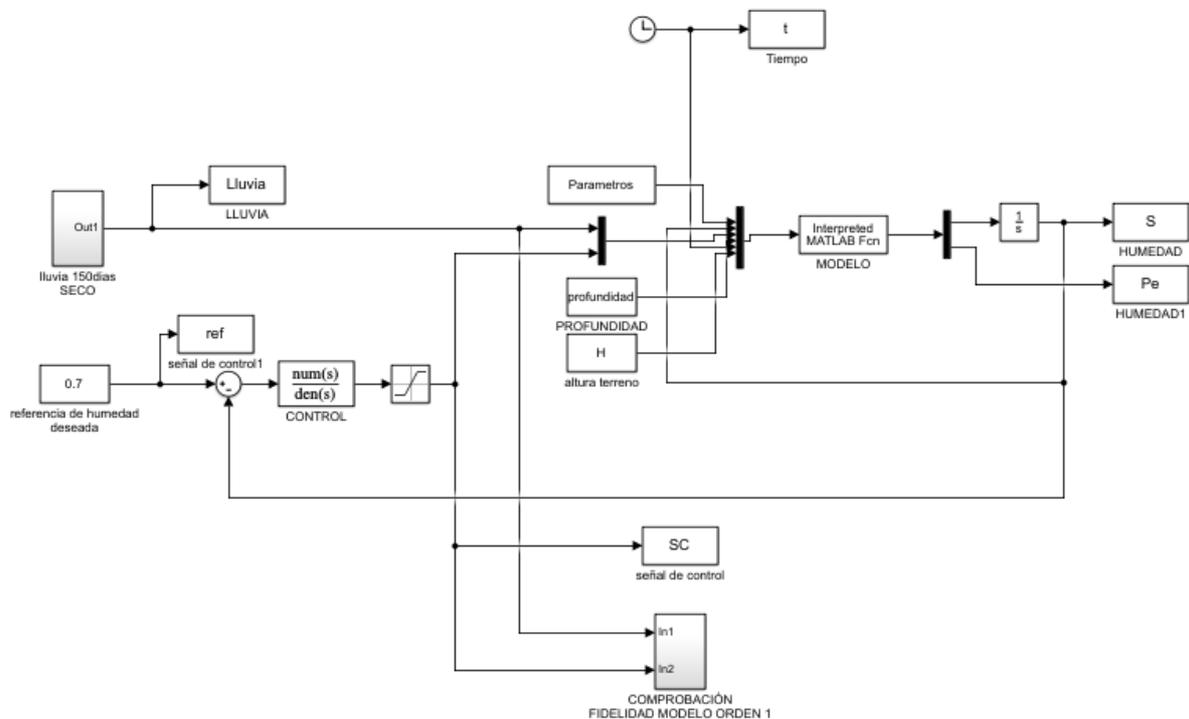


Figura 3.5. Esquema con control incluido para una celda.

En el montaje se aprecia la realimentación de la humedad para obtener el error como diferencia entre referencia y salida. Se recuerda que esta simulación es individual para cada celda con una duración de 150 días. Así, cada celda debe ser simulada por separada y cada una tendrá su propia señal de control.

El resultado de simulación para una celda es el siguiente:

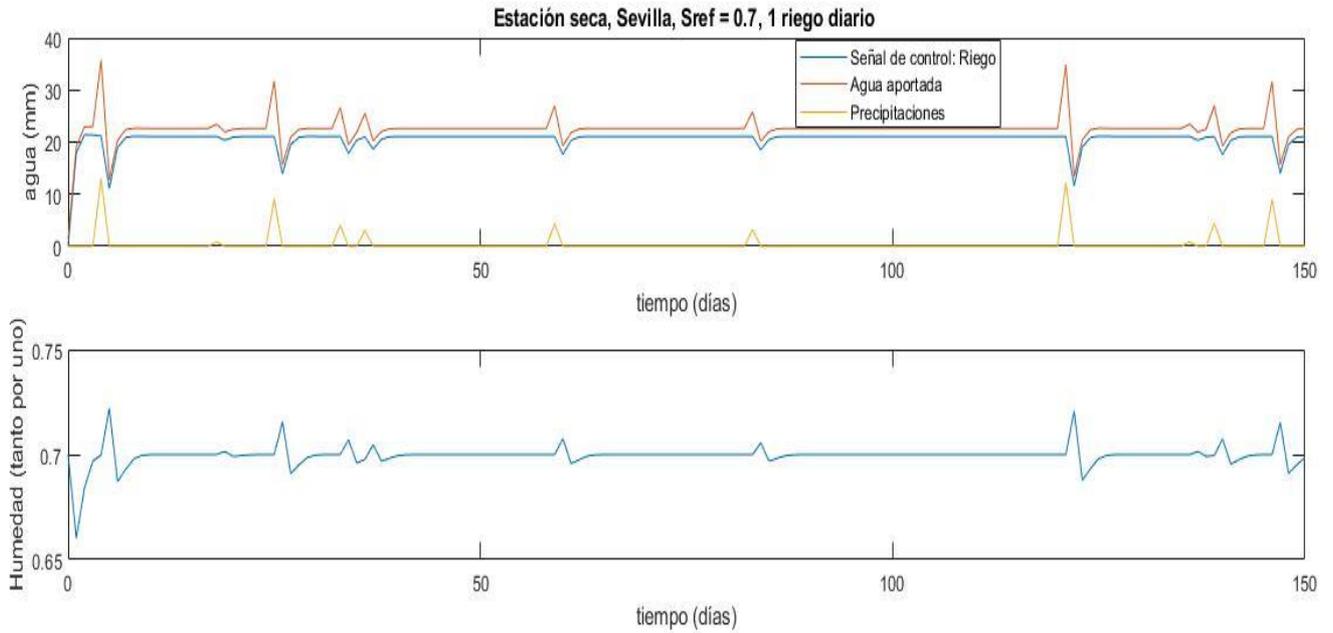


Figura 3.6. Control de humedad en una celda en estación seca.

Naturalmente, en los días de lluvia la humedad crecerá, y de forma inevitable se tendrán valores superiores a la referencia debido a la saturación de la señal de control. En ausencia de estas perturbaciones, la humedad obtiene el valor deseado de referencia en régimen permanente.

Para todo el conjunto de celdas del plano auxiliar de prueba se obtiene:

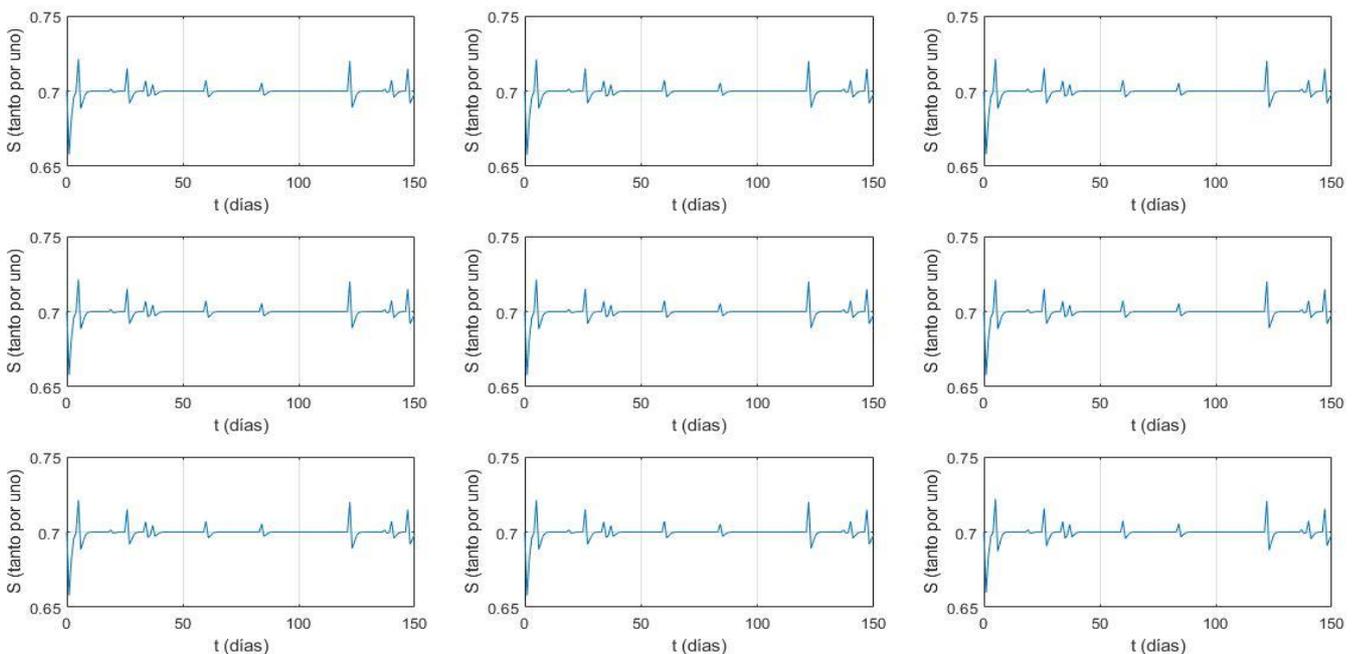


Figura 3.7. Control de humedad en las celdas del plano auxiliar en estación seca.

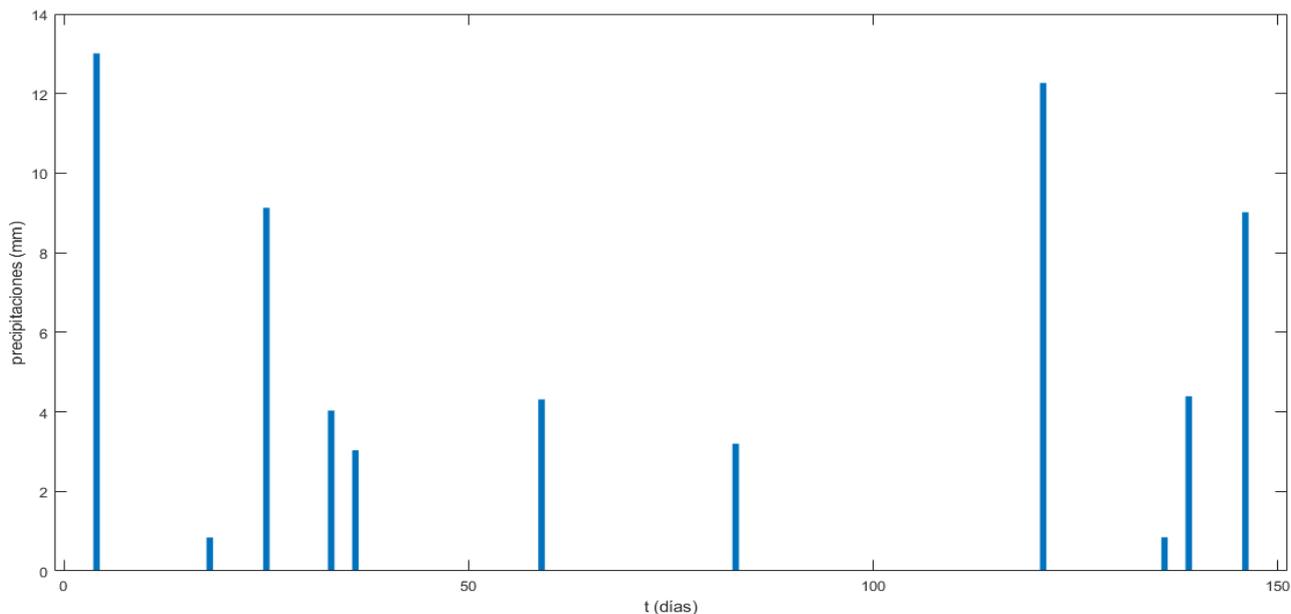


Figura 3.8. Precipitaciones en estación seca.

A pesar de tener las celdas valores de humedad diferentes para mismas precipitaciones (debido a escorrentías y flujos internos), el control es capaz de satisfacer la referencia dada, aportando más o menos agua según la celda y obteniendo como salida en régimen permanente el 0.7 deseado. En cada celda, el error entre referencia y salida nunca supera el 4% de humedad (0.04 en tanto por uno) como puede verse en la figura 3.7.

Caso de estación húmeda. *La Coruña, meses de octubre a febrero (150 días). Cultivo de Lechuga.*

Al igual que el tomate, la lechuga requiere un alto aporte de agua para su crecimiento. Existen variedades diferentes, y aunque generalmente son de clima mediterráneo, algunas pueden cultivarse en climas lluviosos. En cualquiera de los casos, en el presente trabajo se reducirá a otro control con referencia de humedad a 0.7 (punto de funcionamiento) en estación húmeda en La Coruña.

El procedimiento es el mismo que en el caso anterior. La primera labor será obtener el modelo linealizado en torno al punto de funcionamiento.

Empíricamente, se dedujo que aportando al sistema 16 mm se obtiene un valor de humedad a la salida de aproximadamente 0.7. Se llevó a cabo un experimento análogo al del caso anterior, un par de escalones (subida y bajada) desde este punto de 8 mm.

Se calcularon los valores de K para cada escalón:

$$K_{subida} = \frac{0.7377 - 0.7019}{8 \text{ mm}} = 0.0045 \text{ mm}^{-1} \quad 3.6$$

$$K_{bajada} = \frac{0.6411 - 0.7019}{-8 \text{ mm}} = 0.0076 \text{ mm}^{-1} \quad 3.7$$

De nuevo, el valor para K_{subida} es menor por el mismo motivo del caso anterior. La discrepancia entre los valores es todavía mayor porque los escalones son de mayor tamaño. Teniendo en cuenta que valores por encima de 0.7 no son adecuados para el cultivo, se tomará únicamente K_{bajada} .

Además, en la simulación, la referencia pasará de 0.7 a 0.65 en el tramo final, debido a que a veces es recomendable reducir la humedad del suelo para este tipo de cultivos [36].

El tiempo de subida en este ejemplo es de 8 días, con una constante de tiempo, τ , de 3.5 días.

Se obtiene:

$$G(s) = \frac{K}{\tau*s+1} = \frac{0.0076}{3.5s+1} \quad 3.8$$

La bondad de este modelo linealizado se consigue comparándolo con la salida del sistema en el experimento en la figura 3.9. Es un modelo suficientemente aceptable.

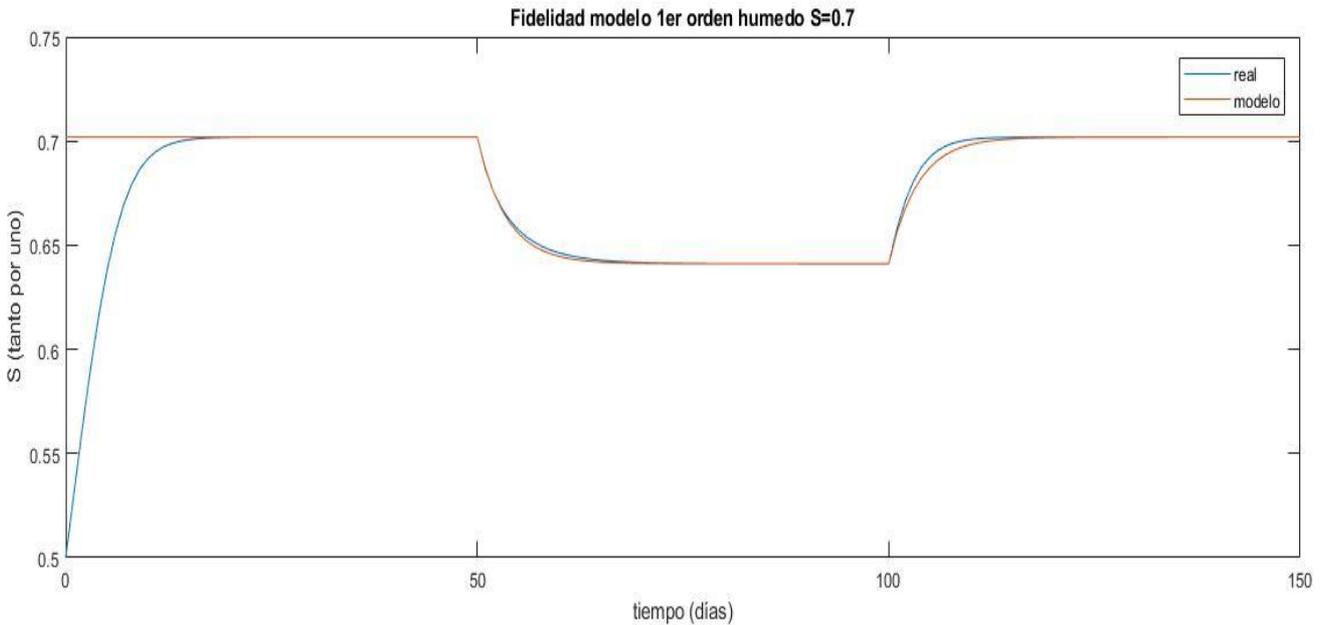


Figura 3.9. Humedad tras escalón positivo y negativo de 8 mm, en estación húmeda. Modelo vs real

Análogamente, con este nuevo modelo se calcula otro control PI como en el caso anterior:

$$K_c = \frac{3}{ts_{BC}} = 1.5 \quad 3.9$$

$$C(s) = \frac{K_c}{s} * \frac{1}{G(s)} = \frac{1.5}{s} * \frac{3.5s+1}{0.0076} = \frac{s+1.5}{0.005s} \quad 3.10$$

El tiempo de subida se colocó de nuevo en 2 días, a pesar de que el sistema tiene una dinámica más lenta. Esto significa que habrá sobreoscilaciones en la respuesta del sistema, pero es preferible una sobreoscilación de un par de días, en los que habrá ligeramente más humedad, que un sistema de control lento que alcance la referencia en varios días (dejando al cultivo con otra humedad que la deseada durante ese tiempo).

El funcionamiento del control se muestra en la figura 3.10. Las numerosas precipitaciones hacen un control lleno de pequeños picos, ya que no pueden mitigarse con una señal de control negativa. En cualquier caso, se aprecia la subida de humedad desde 0.6 en pocos días, y el error entre salida y referencia nunca supera el 5% de humedad.

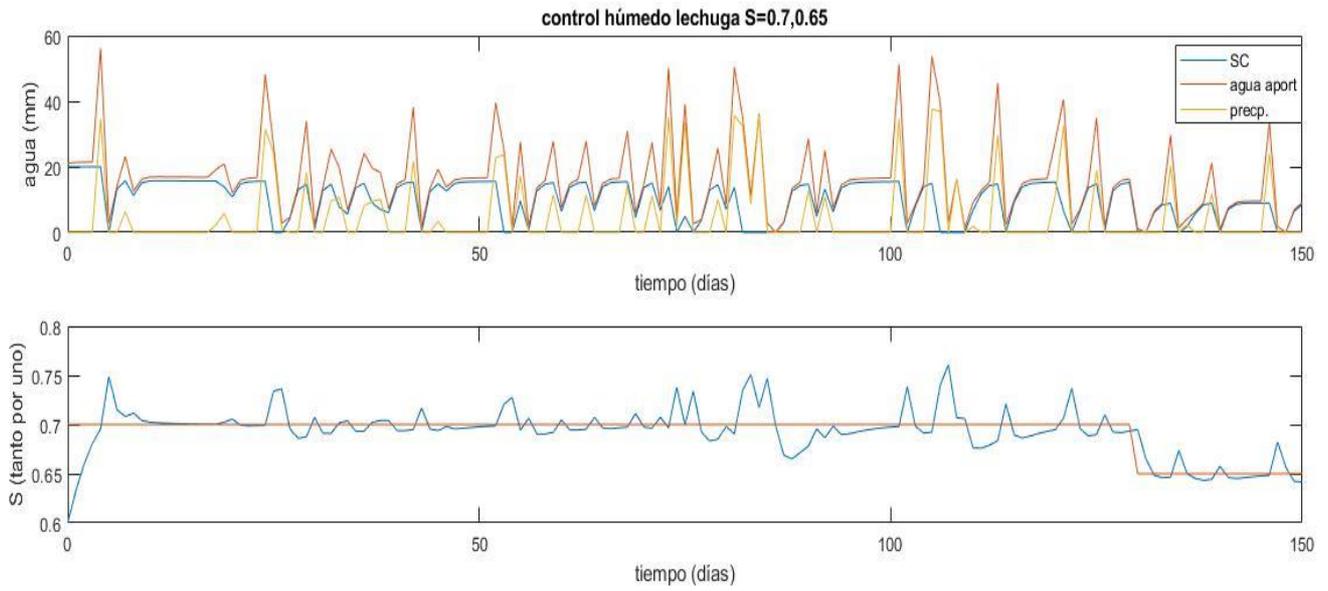


Figura 3.10. Control de humedad en una celda en estación húmeda.

En el conjunto de las celdas ocurre:

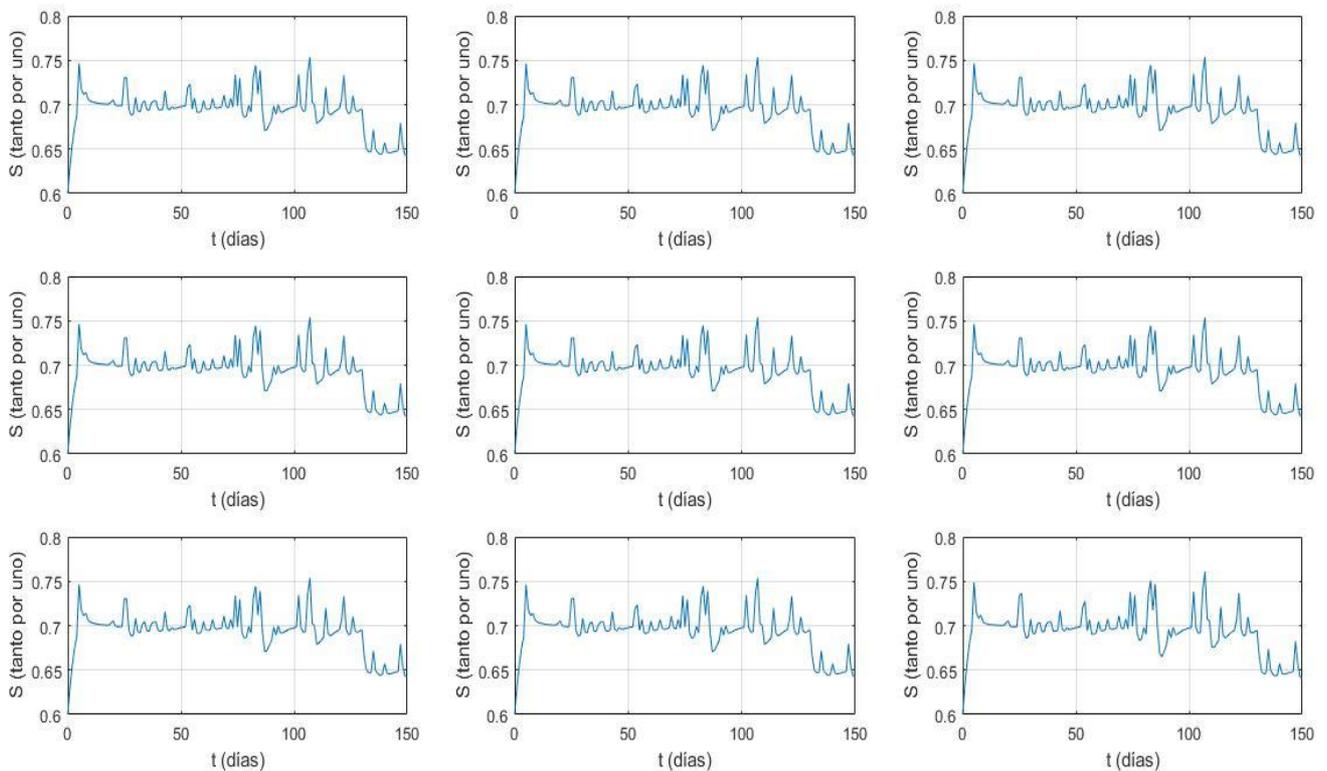


Figura 3.11. Control de humedad en las celdas del plano auxiliar en estación húmeda.

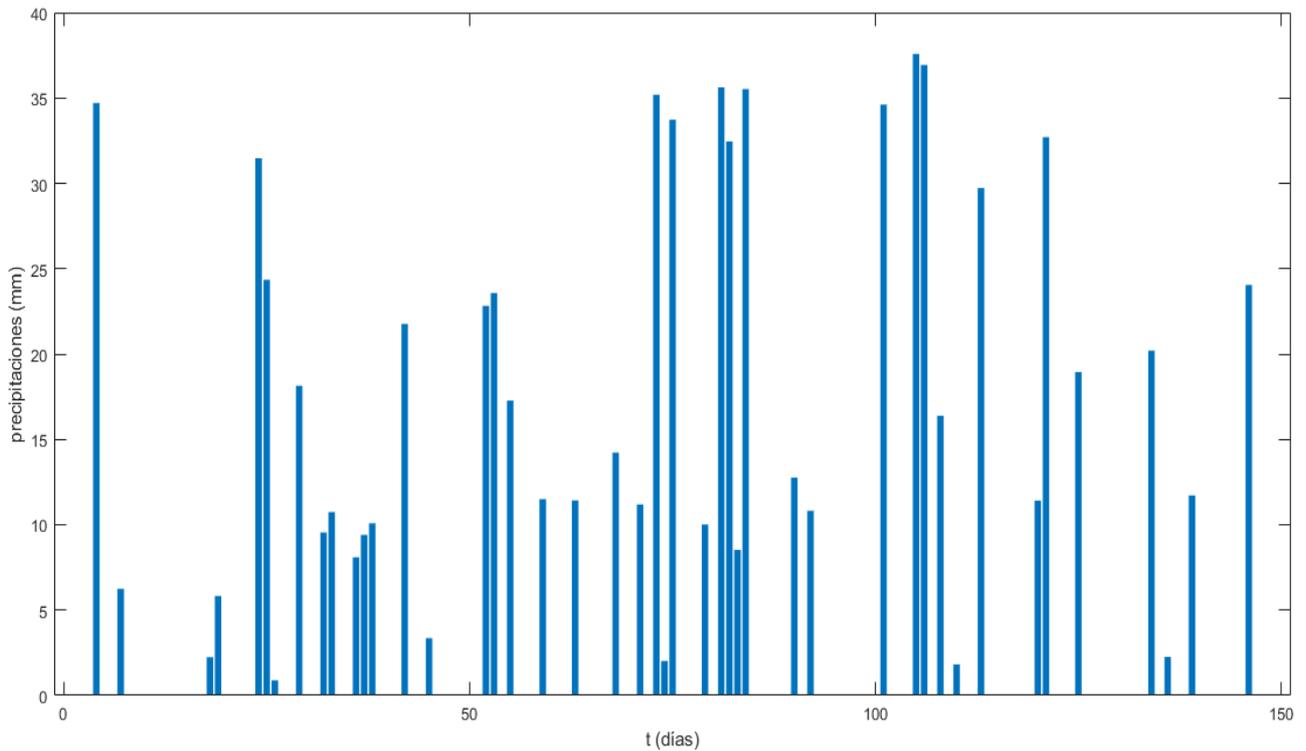


Figura 3.12. Precipitaciones en estación húmeda.

Es notorio que, a pesar de los días de lluvia, el control actúa en base a la humedad del día anterior (la realimentación), sin tener en cuenta las precipitaciones del día actual. Eso quiere decir que, por ejemplo, a falta de humedad la señal de control dará una cierta cantidad de agua, un día que casualmente puede tener una gran cantidad de lluvia. Como resultado a esto, la humedad crecerá más de lo debido por la suma de riego y de precipitaciones. Por tanto, se contempla la opción de un control predictivo, donde no se aporte agua por riego el día que haya gran cantidad de precipitaciones. Esto requiere conocer la lluvia del día en cuestión, bien sea por predicciones meteorológicas, bien sea porque el riego se produzca al final del día (cuando ya se conoce cuánta agua ha caído).

Para ello, será necesario implementar el controlador en un archivo .m, es decir, en una función de Matlab. Simplemente, el código tendrá el controlador PI calculado con una pequeña condición al inicio que pone a cero la señal de control en caso de que las precipitaciones superen los 16 mm (cantidad que daba en torno a un 0.7 de valor de humedad a la salida).

Para la implementación en código del controlador, se hace uso de:

$$u = Kp * (error + \frac{error_{integral}}{Ti}) \quad 3.11$$

Con u como señal de control. Y para calcular los valores de Kp y Ti basta con relacionar las expresiones 3.12 y 3.13.

$$C(s) = \frac{K_c}{s} * \frac{1}{G(s)} = 1.5 * \frac{3.5s+1}{0.0076s} \quad 3.12$$

$$C(s) = Kp * \frac{Ti s + 1}{Ti s} \quad 3.13$$

Se obtienen valores de 690.79 mm y 3.5 días para K_p y T_i respectivamente.

El código de implementación se encuentra disponible en el anexo de códigos como *control.m*. Este código forma parte de un bloque de Simulink *Interpreted MATLAB function*, que sustituye a la función de transferencia del controlador. El resto del montaje sigue igual al que se muestra en la figura 3.5. El resultado es ligeramente mejor, gracias a la condición predictiva, sobre todo en la reducción de picos por debajo de la referencia. Se observa en la figura 3.13 que en aquellos días donde la lluvia es abundante, la señal de control es nula. Las precipitaciones de la simulación siguen siendo las mismas que en la figura 3.12, y en la figura 3.14 se muestran todas las celdas del plano auxiliar.

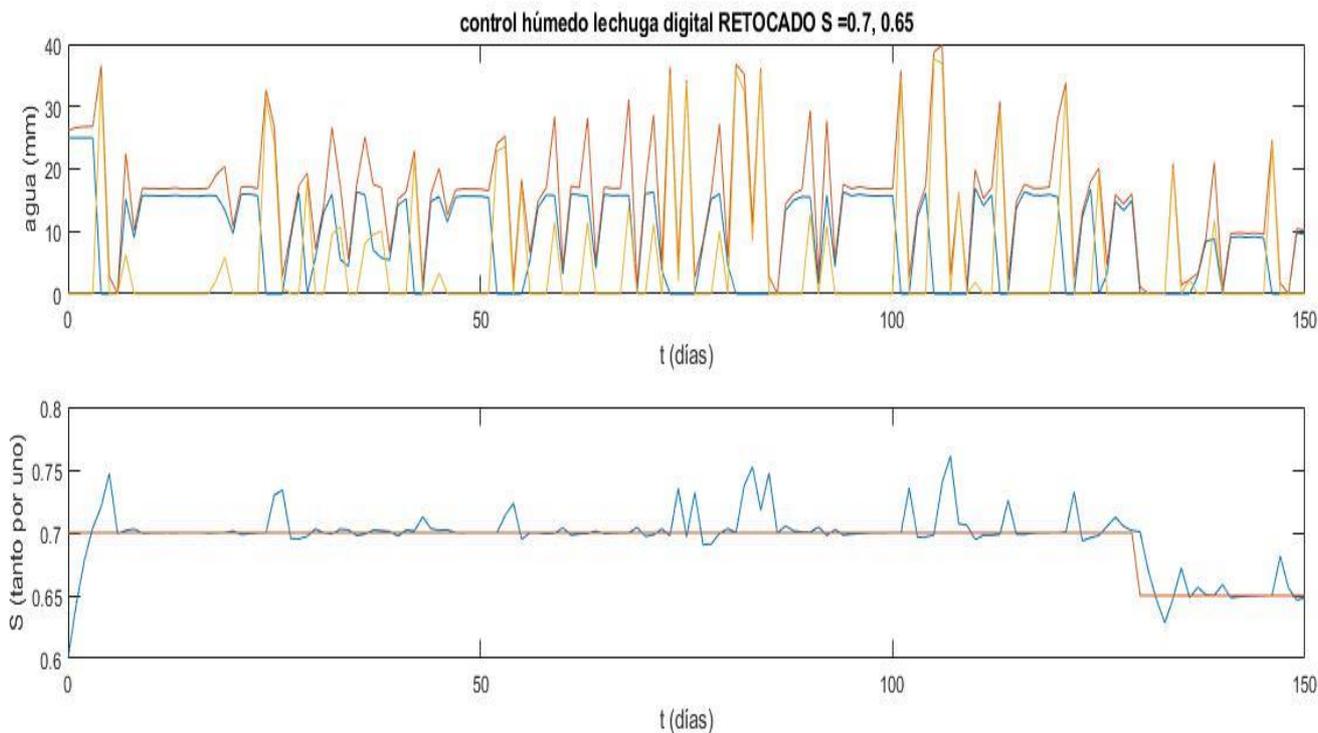


Figura 3.13. Control de humedad en una celda en estación húmeda, con condición predictiva.

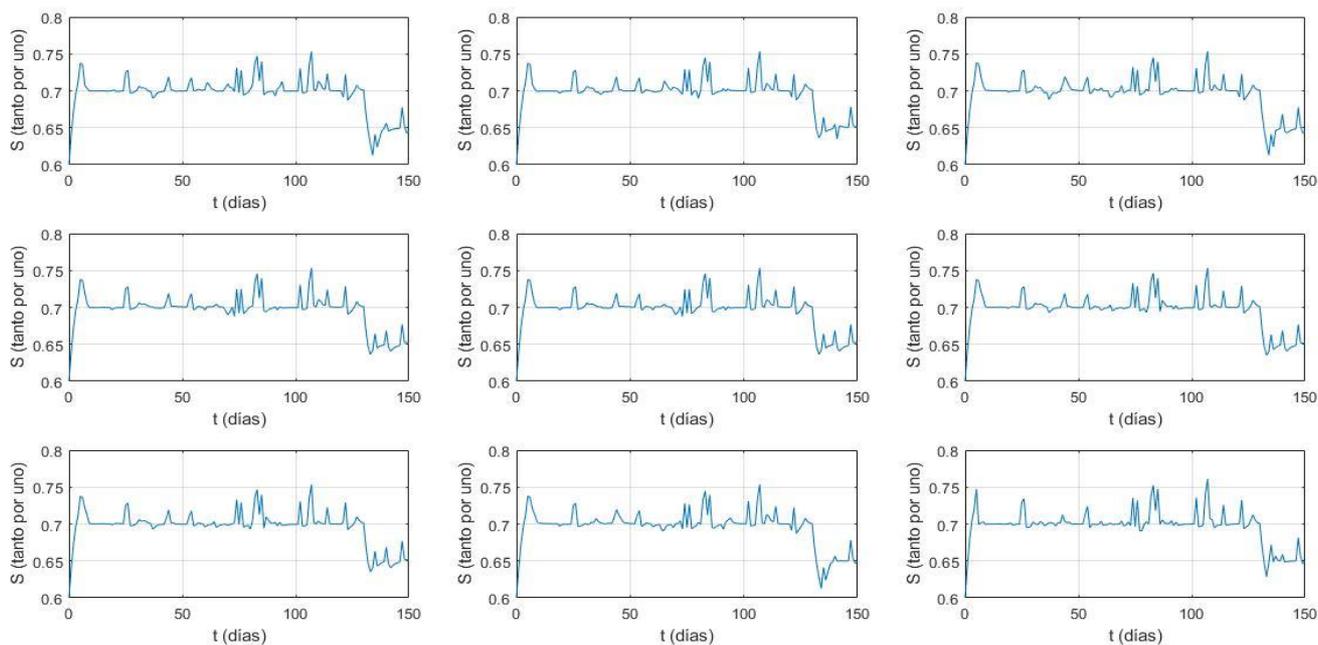


Figura 3.14. Control de humedad en las celdas del plano auxiliar en estación húmeda, con condición predictiva

Por último, en este capítulo, se plantea la opción de utilizar un control proporcional (P) en lugar de un PI, ya que en esta aplicación el efecto integral no resulta especialmente útil: aunque elimina el error en régimen permanente, para llegar a él quizá hagan falta mayor cantidad de días que el intervalo en el que no hay lluvias. En otras palabras, se producen gran cantidad de perturbaciones que impiden que el efecto integral lento consiga su propósito. Otra opción es hacer un efecto integral más agresivo, con la consecuencia de aumentar las oscilaciones y picos en la respuesta.

El control proporcional se implementa exactamente igual que el PI anterior, en el mismo código, salvo que ahora:

$$u = K_p * error \quad 3.14$$

Simplemente se estima una constante proporcional y se multiplica por la diferencia entre humedad y referencia. Por lo demás, el archivo de Simulink es el mismo, y el código *control.m* idéntico salvo en lo mencionado de la expresión 3.14. Las precipitaciones de la simulación no cambian. Los resultados son:

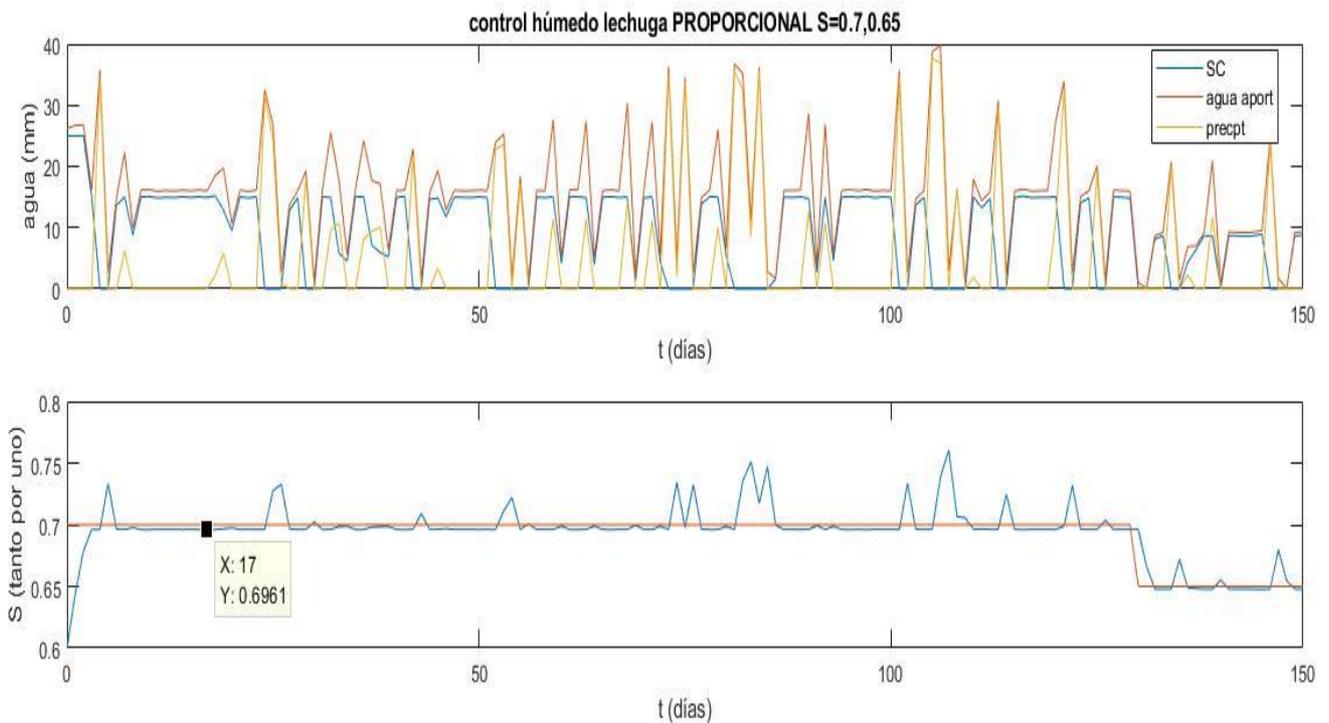


Figura 3.15. Control de humedad en una celda en estación húmeda, control P.

Es notable un comportamiento suave. Los picos debidos a las precipitaciones son inevitables, pero el sistema responde sin apenas oscilaciones por lo demás. Por contra, tiene un pequeño error en régimen permanente, aunque no es un inconveniente ya que el error es de aproximadamente 0.004 en humedad (0.4 % de error de humedad).

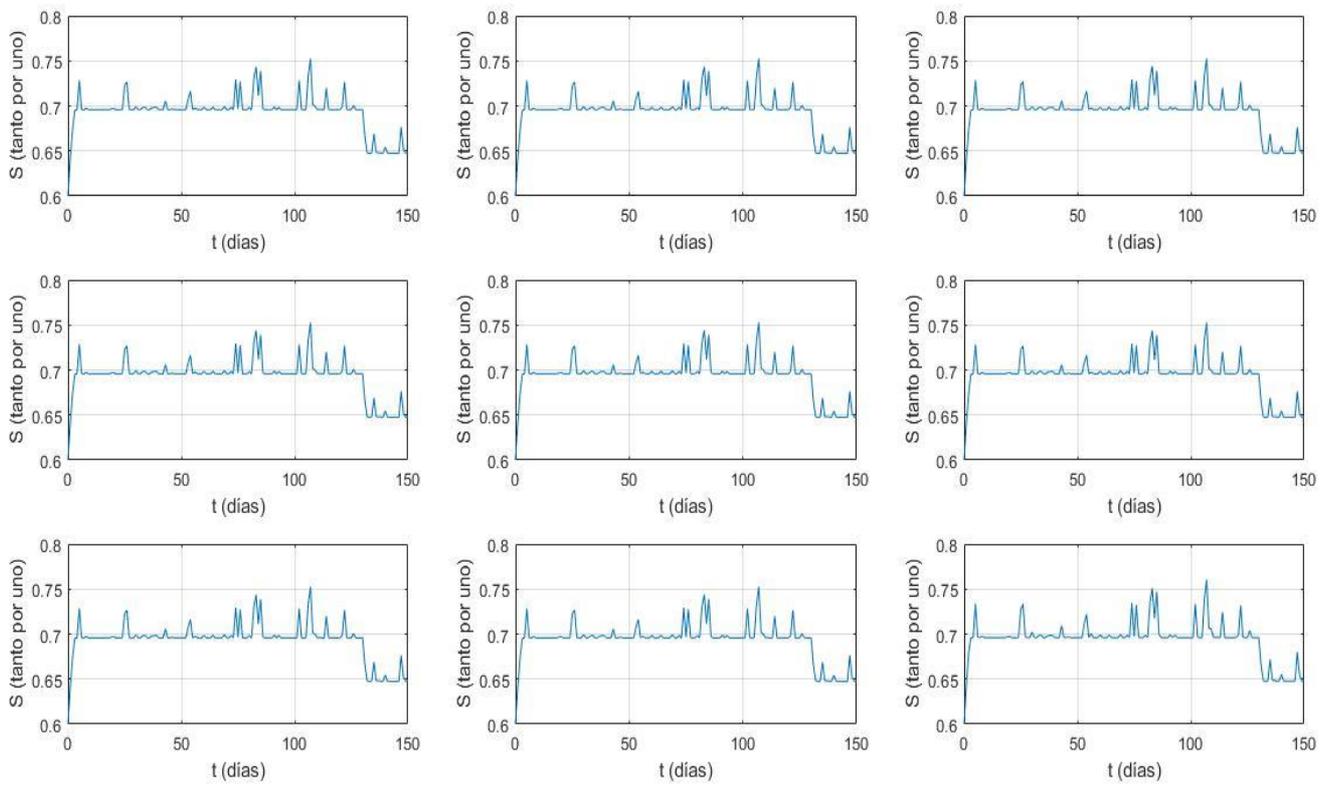


Figura 3.16. Control de humedad en las celdas del plano auxiliar en estación húmeda, control P.

4 CONTROL REALISTA DE LA HUMEDAD

El escritor escribe su libro para explicarse a sí mismo lo que no se puede explicar.

- Gabriel García Márquez-

En el capítulo anterior se realizó un control proporcional y proporcional con integrador para el suelo, en casos de estación seca y húmeda. En todos los casos, se recurrió al plano auxiliar del capítulo dos del trabajo como terreno de aplicación. Para cada una de sus celdas, había un sensor disponible, de tal forma que era posible establecer una realimentación de la salida para el control en cada una de ellas. Como se adelantó, en la realidad esto no ocurre, pues las sondas necesarias son de alto valor económico.

En el último capítulo del trabajo, se pretende realizar un control en la parcela que se adelantó en el capítulo dos, en la que hay doscientas celdas, pero sólo ocho sensores. En la figura 4.1 se muestran las celdas que tendrán sensores (en rojo) y las ocho vecindades de veinticinco celdas (separadas por una línea más gruesa). Se recuerda que la vecindad 1 es la de la izquierda, arriba.

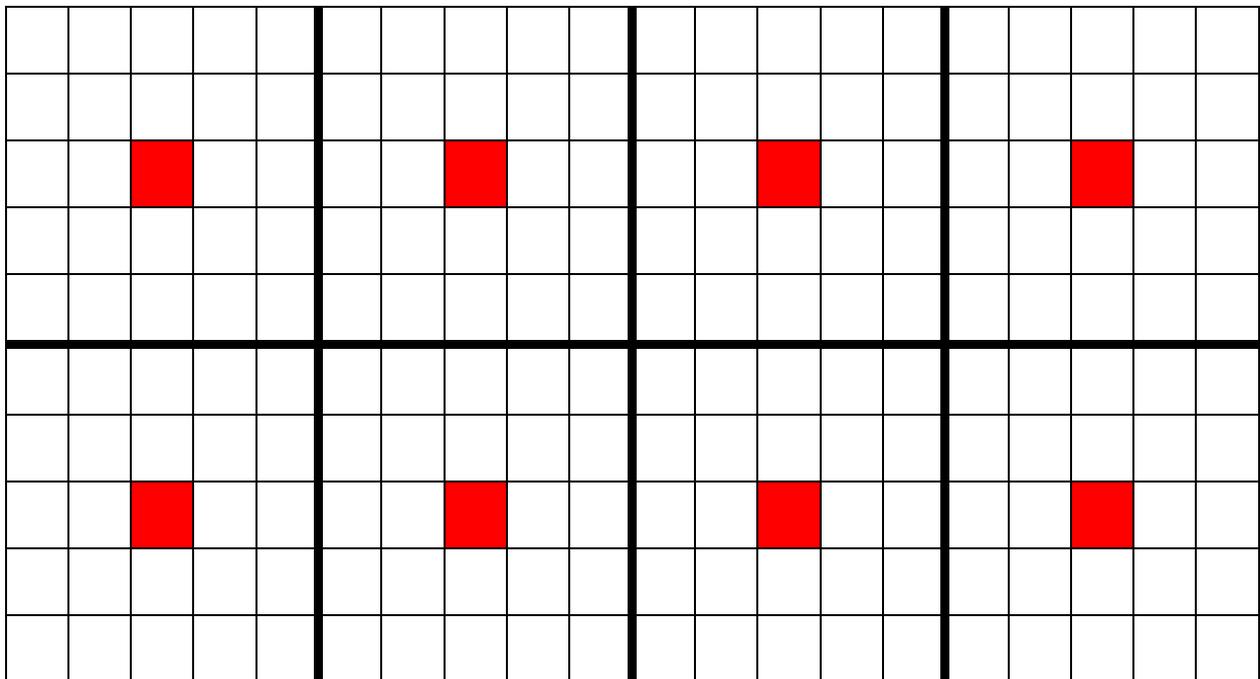


Figura 4.0. Celdas en la parcela de estudio, dividida en ocho vecindades.

Se observa que la distribución propone que la celda central de cada vecindad sea la única celda con sensor. El valor que lea este sensor será, por tanto, representativo para la vecindad.

4.1 Control de humedad en la parcela en ausencia de sensores

Caso de estación húmeda. *La Coruña, meses de octubre a febrero (150 días). Cultivo de Lechuga.*

En el mismo caso que el último del capítulo anterior, pero aplicado a la parcela con falta de sensores.

La primera idea para solventar la realimentación a falta de sensores es utilizar el propio modelo linealizado del capítulo anterior, a modo de observador. La salida de éste será lo que realimente al bucle de control. El siguiente esquema refleja la idea:

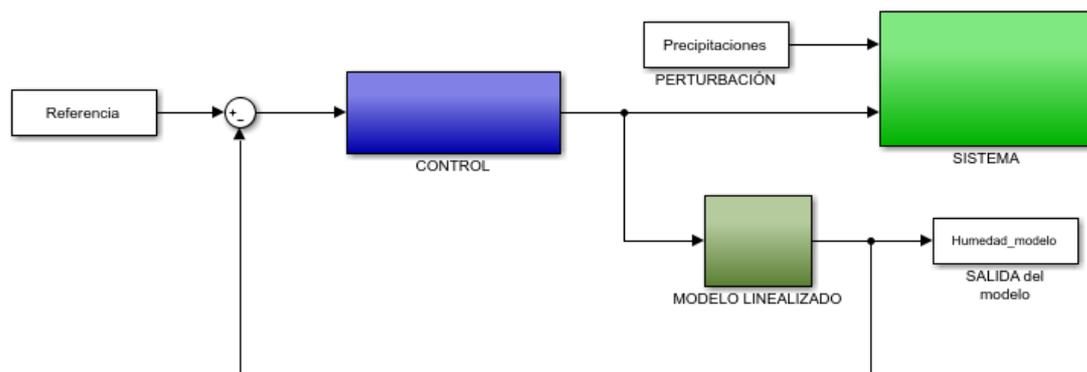


Figura 4.1. Esquema de control empleando el modelo linealizado como realimentación.

Esto lleva a la limitación de que sólo podrá funcionar el conjunto para el entorno del punto de funcionamiento, ya que el modelo linealizado es una aproximación del sistema en ese entorno únicamente.

Puesto en marcha (el montaje de Simulink es idéntico al anterior, pero cambiando la realimentación de la salida por la del modelo), se ven discrepancias en la primera vecindad (figura 4.2). La explicación radica en que, para una determinada celda donde haya gran afluencia de agua por escorrentías, habrá mayor grado de humedad. En aquellas donde ocurran pérdidas y no ganancias por escorrentías, la humedad será menor. Nótese que en la figura 4.2 la línea de color rojo (muestra la salida del modelo, S_{mod}) sí alcanza y se mantiene en el valor de referencia ($S = 0.7$), pero la salida real del sistema (línea azul) tiene menor grado de humedad, según la celda, debido a las explicaciones sobre escorrentías. En la figura 4.3 se ve un detalle de este efecto.

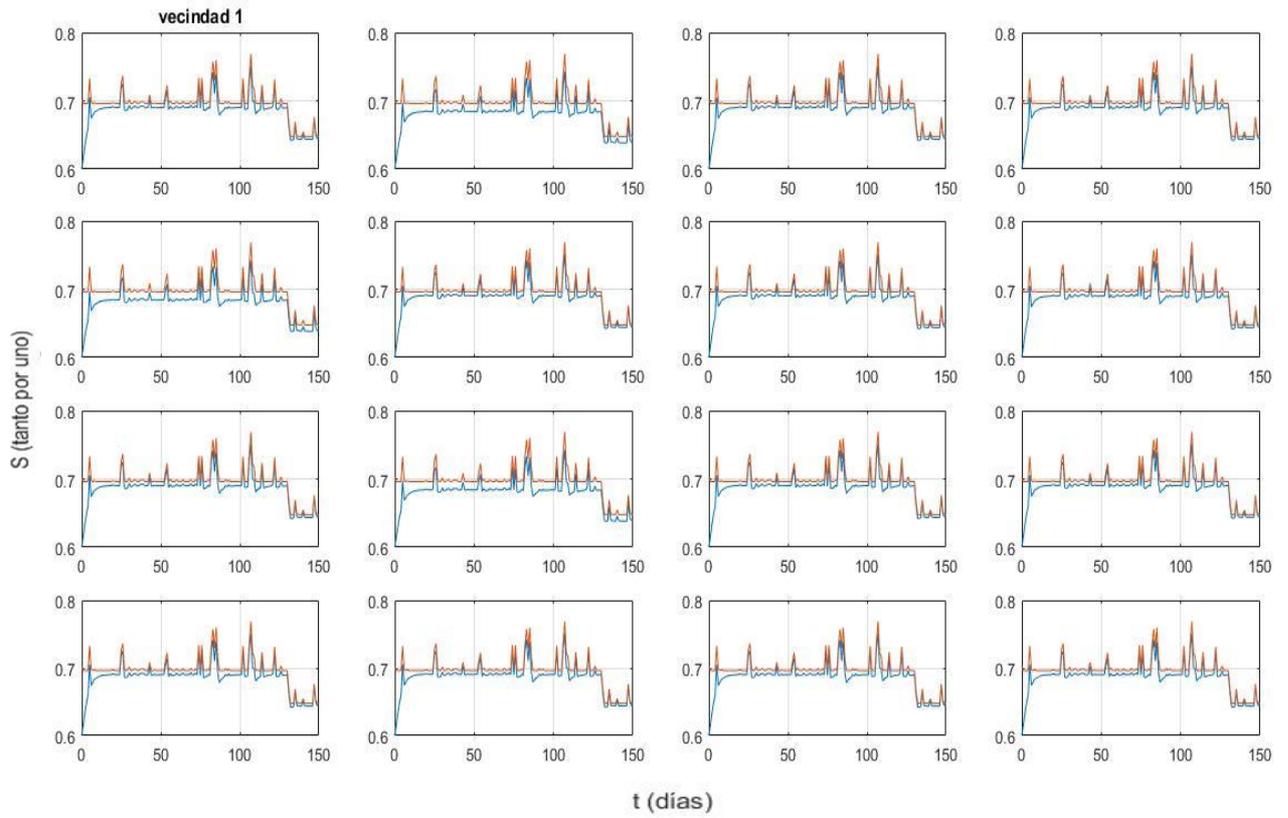


Figura 4.2. Control con realimentación por el modelo linealizado, Smod Vs Sreal

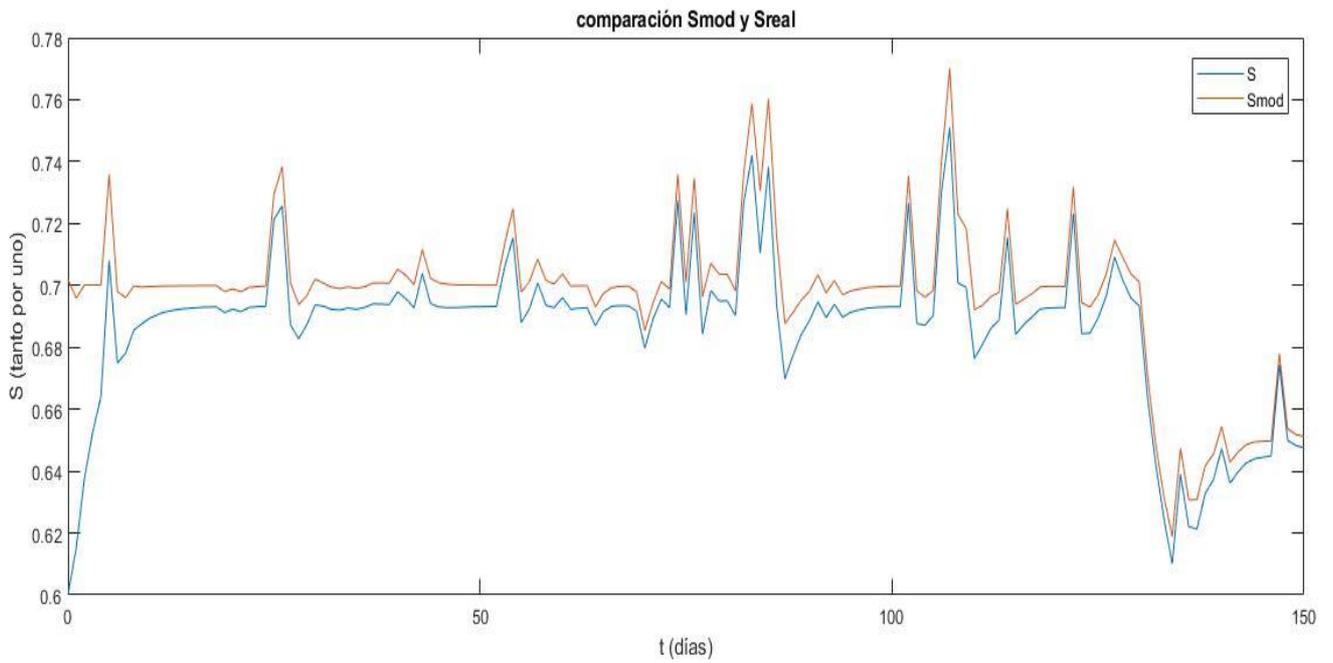


Figura 4.3. Control con realimentación por el modelo linealizado, detalle de una celda.

La solución propuesta se basa en un aporte “extra” de compensación. Además, para este caso concreto no tiene sentido el uso de un control PI, ya que la realimentación por el modelo tendrá errores en régimen permanente debido a que la salida del modelo no es la misma que la del sistema. El uso del PI sí eliminará, como se ve en la figura 4.2, el error de régimen permanente de la salida del modelo *Smod*, algo que no es importante al final. Por este motivo, y por el resultado que se apreció en el capítulo anterior, es preferible el uso de un control proporcional.

La falta de humedad en algunas celdas se debe a las escorrentías a celdas vecinas. Se comprobó empíricamente que las que tenían al menos dos celdas vecinas con menor altura (les ceden agua) y otras dos con la misma altura (ni reciben ni ceden) son las más afectadas. En la vecindad 8, hay una celda que recibe agua de las cuatro celdas vecinas, que tienen todas mayor altura; esta celda verá incrementada su humedad por encima del resto. El aporte de agua extra para las celdas debe estar proporcionado, por tanto, a la cantidad de celdas vecinas con mayor o menor altura.

Por otro lado, la única celda con sensor (a esta sí se le puede aplicar un control con efecto integral) puede proporcionar la diferencia de humedad entre salida del sistema y salida del modelo. Esta diferencia, *dife*, es significativa, pues heurísticamente será un error también presente en todas las demás de la vecindad. También se precisa un reajuste en la referencia para poder alcanzar en la salida real del sistema 0.7, ya que se aprecia una ganancia ligeramente inferior, provocando un efecto de offset.

Así, las dos propuestas son, por un lado, aplicar una cantidad de agua proporcional a *dife* y según las celdas más próximas. Por otro, subir la referencia como ajuste manual para este caso.

La forma de implementar esto fue la siguiente:

En primer lugar, se realiza el control en la celda central (que tiene el sensor) y que aportará la información necesaria entre salida del modelo y real. Por tanto, esta celda tendrá realimentación del sensor, pero también recibirá información de la respuesta del modelo ante la señal de control, para calcular la diferencia (figura 4.4). Esta diferencia se usará como una entrada más para el resto de celdas. Esta es la única diferencia entre la celda central y las demás celdas de la vecindad (figura 4.5) con respecto a las simulaciones anteriores. Por lo demás, el montaje de Simulink sigue igual que en la figura 3.5.

A nivel de código, se precisan dos archivos nuevos, que pueden ser consultados en el anexo como *control_especial.m* (para la celda central con sensor), que calcula la mencionada diferencia y tiene realimentación por sensor; y *control_completo.m* (para el resto de celdas de la vecindad), que tiene en cuenta el valor antes mencionado y las celdas próximas para el cálculo de una cantidad de agua de compensación.

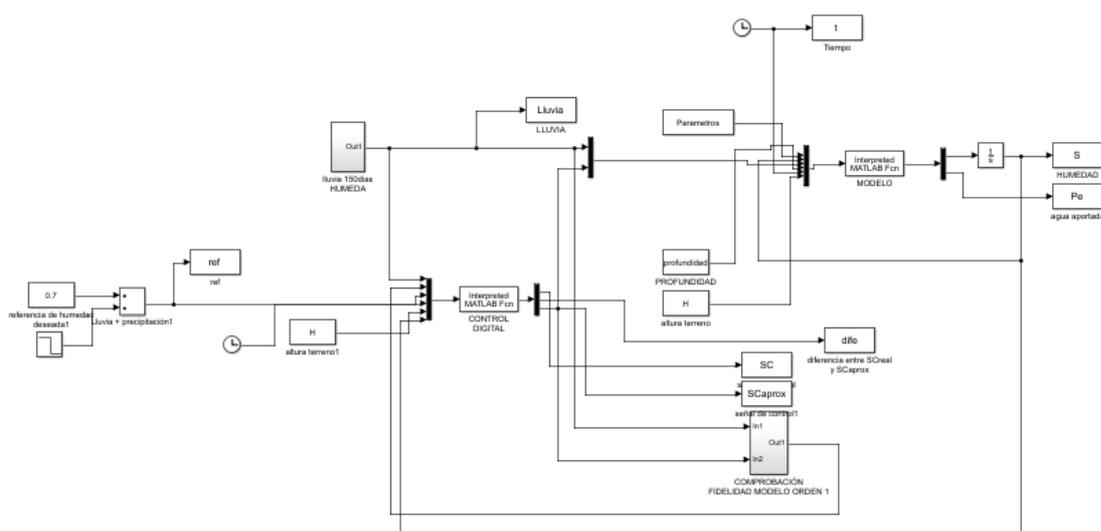


Figura 4.4. Esquema con control para la celda central con sensor.

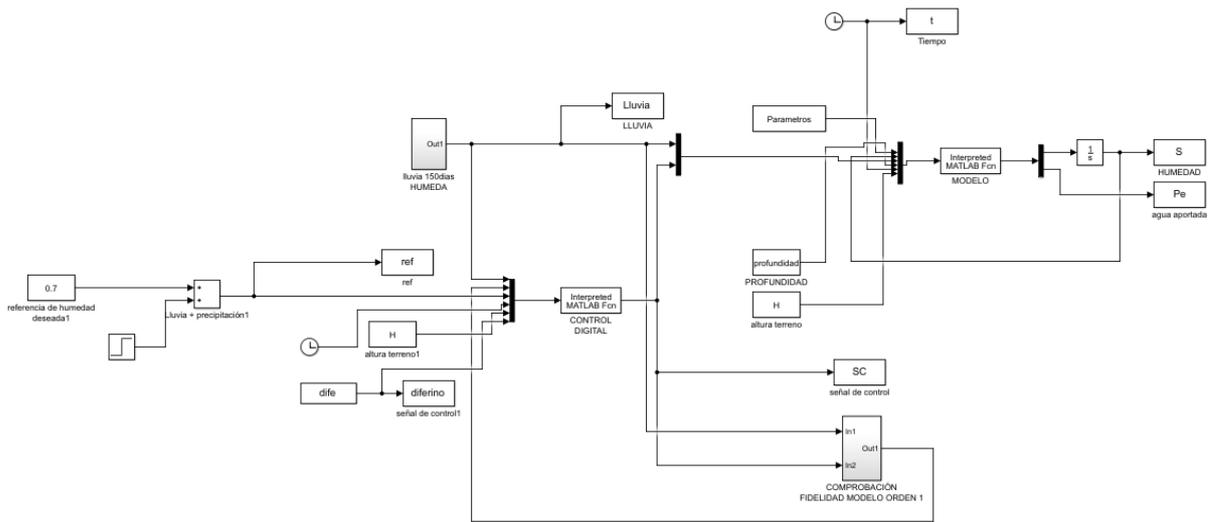


Figura 4.5. Esquema con control para el resto de celdas de la vecindad.

Tras sumar el agua extra aportada a cada celda y el cambio de referencia, se obtiene de resultado para la primera vecindad:

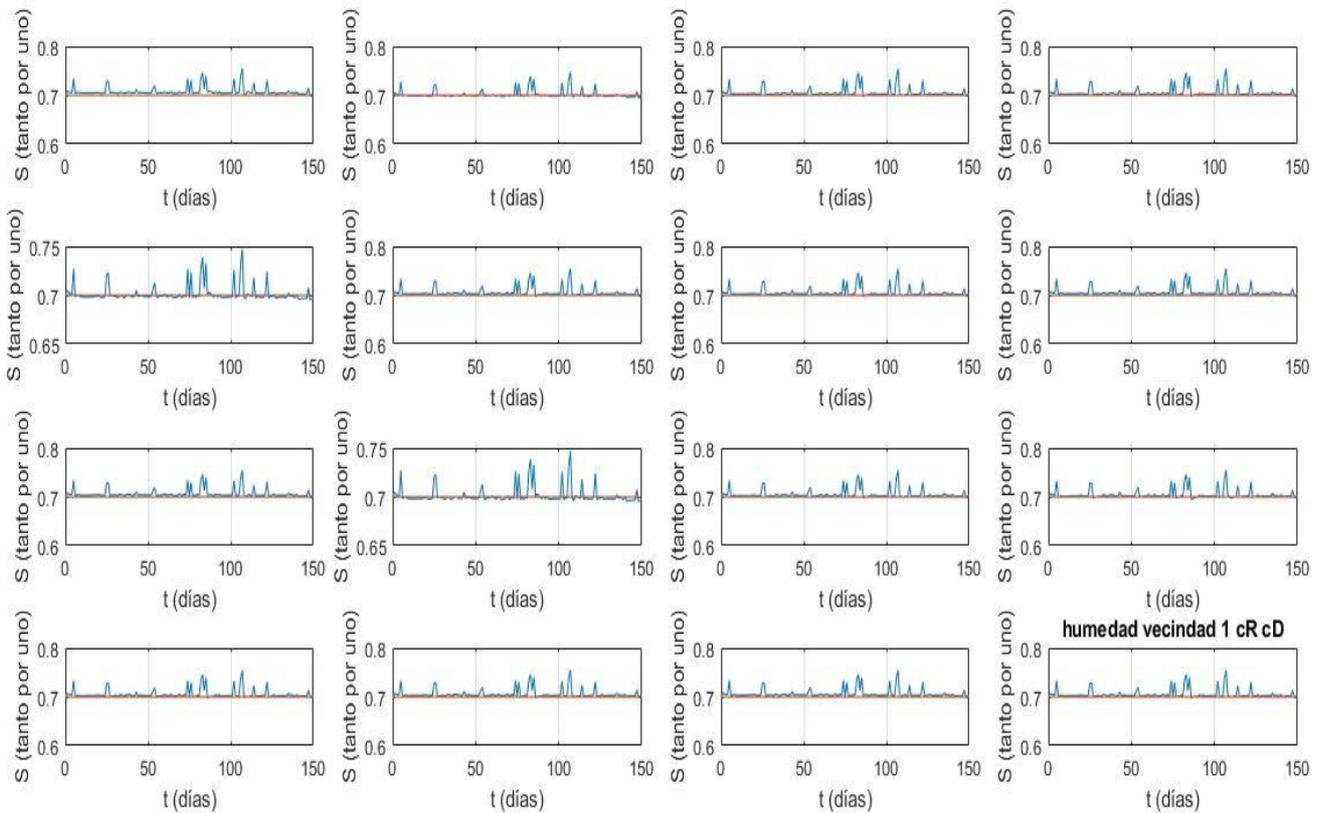


Figura 4.6. Control tras la compensación en la primera vecindad.

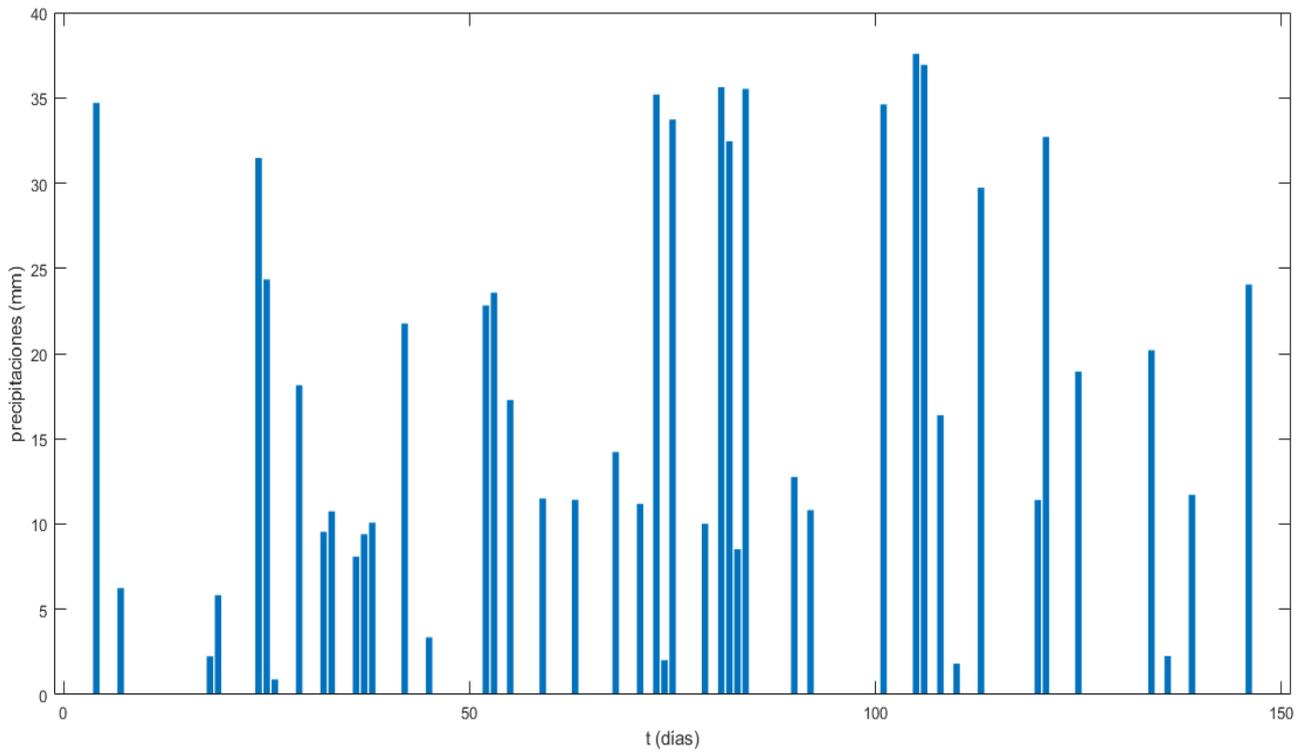


Figura 4.7. Precipitaciones en estación húmeda.

En cuanto a la vecindad 8, pasa de un resultado como se muestra en la figura 4.8 a un resultado mejorado como se muestra en 4.9.

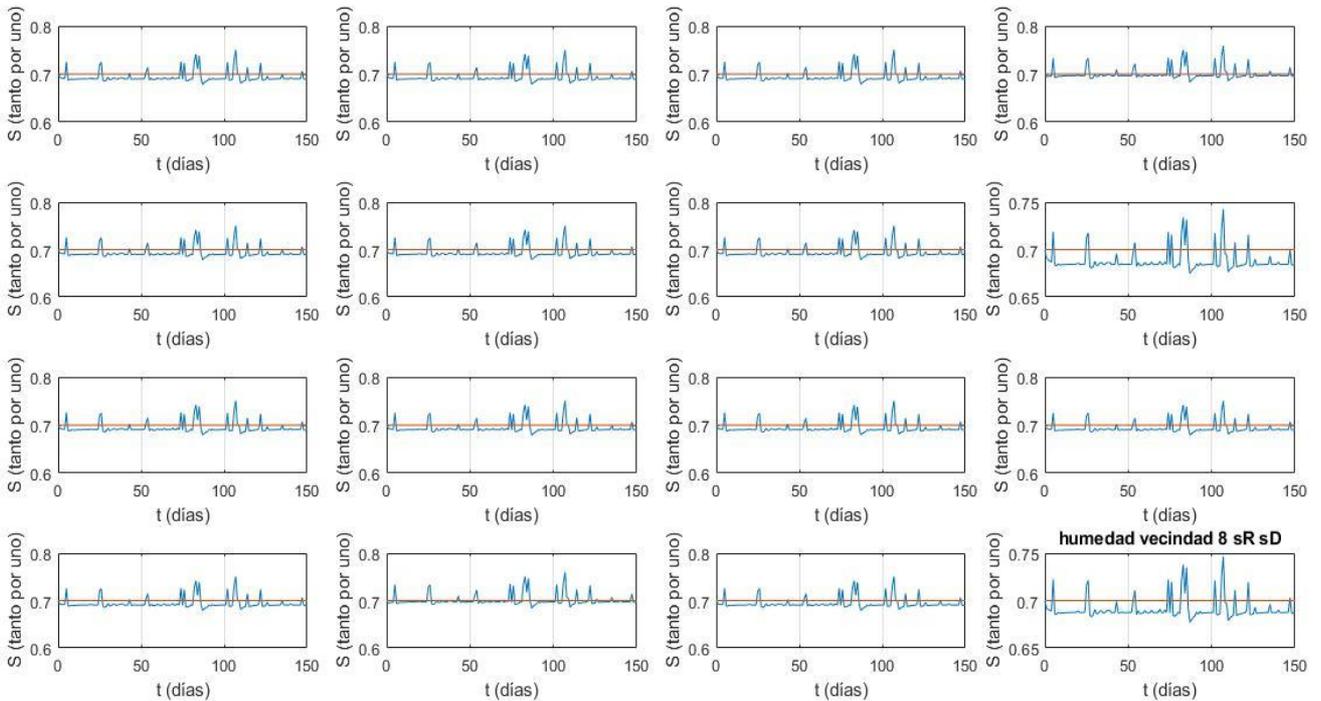


Figura 4.8. Control ante de la compensación en la octava vecindad.

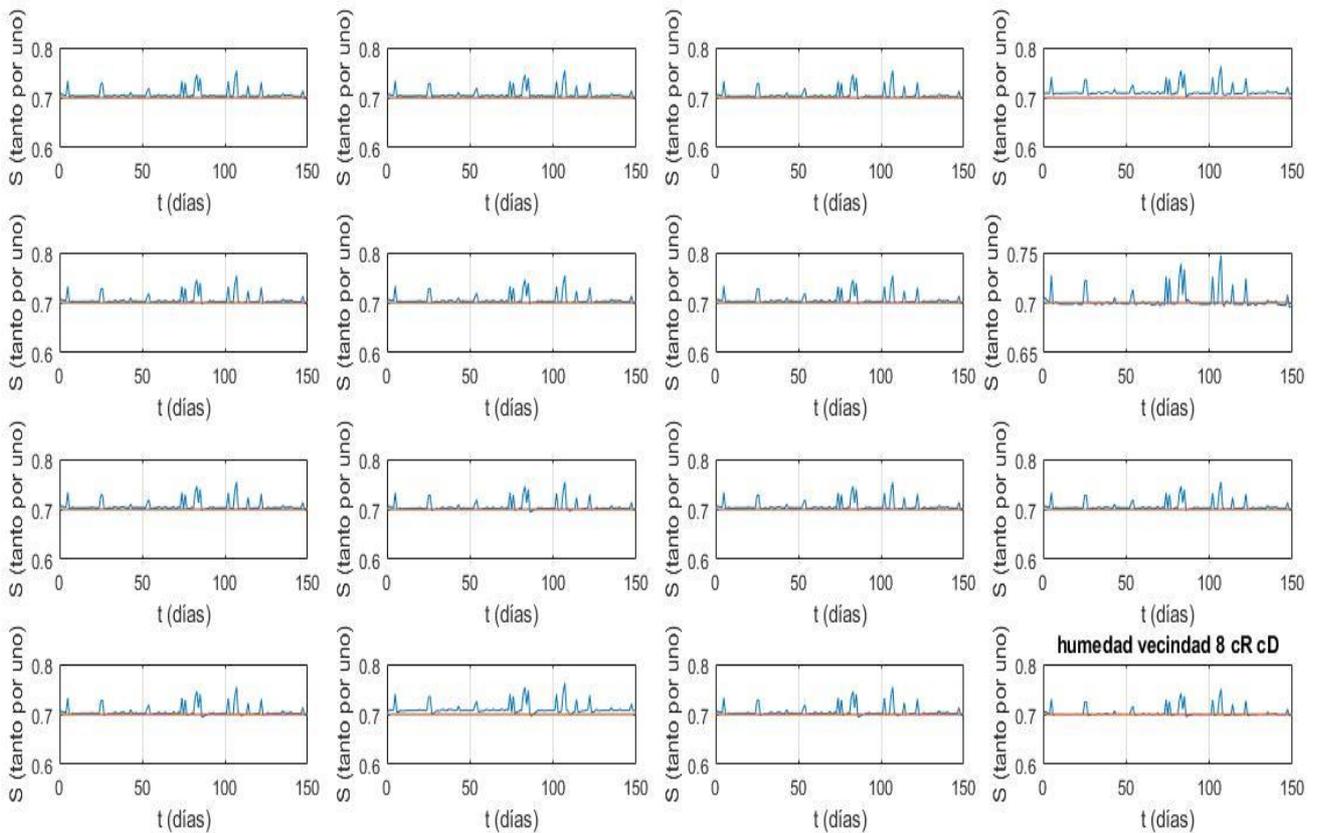


Figura 4.9. Control tras la compensación en la octava vecindad.

4.2 Control de humedad en la parcela por ganancia por tabla.

La estrategia de control *Gain Scheduling* se basa en el uso de diferentes valores de ganancia y parámetros de control según el punto de operación en el que se encuentre el sistema. Es una estrategia utilizada en sistemas fuertemente no lineales. Así, para el caso que nos ocupa, cambiar de referencia puede ser viable si cambiamos los parámetros del control para el nuevo punto de funcionamiento del sistema.

En general, no tiene por qué ser necesario cambios bruscos en la humedad del suelo agrícola, ya que en general el cultivo requerirá un mismo valor de riego a lo largo de su ciclo, salvo pequeñas variaciones. La utilidad de esta técnica en el cultivo sería poder utilizar el suelo para diferentes plantas según la fecha, o el uso de un cultivo que requiere varios valores de humedad. Un ejemplo sería el trigo, que requiere de una humedad mucho menor al final de su etapa ya que la recogida del grano se realiza cuando está seco.

En este último caso se pretende hacer la simulación más realista, por lo que se utilizará un control en tiempo discreto ($C(z)$) y su posterior implementación en una función de Matlab con tiempo de muestreo. Además, el sensor aportará ruido a la señal leída.

Caso de estación seca. Sevilla, meses de mayo a septiembre (150 días). Cultivo de Trigo.

El trigo requiere una humedad de 0.5 durante su ciclo, aunque se reduce hasta un 18% la humedad del grano en su recogida. Extrapolando, se puede considerar que la humedad del suelo debe tener un valor similar al del grano.

El primer punto de este caso será encontrar unos valores de constante de proporcionalidad y constante de tiempo para cada tramo. Para ello, se llevó a cabo un experimento similar al mostrado en la figura 3.2, donde se dio un tren de escalones de 1 mm al sistema en estación seca. Se arrojaron los siguientes datos:

Tramo (mm)	S (tanto por uno)	K (mm ⁻¹)	Tiempo subida (días)
0	0.016	-	48
1	0.1165	0.1005	29
2	0.2049	0.0884	12
3	0.2335	0.0286	12
4	0.2621	0.0286	12
5	0.2907	0.0286	12
6	0.3193	0.0286	12
7	0.3479	0.0286	12
8	0.3765	0.0286	12
9	0.5557	0.1792	144
10	0.5793	0.0236	12
11	0.5976	0.0183	12
12	0.6127	0.0151	8
13	0.6256	0.0129	6
14	0.6368	0.0112	6
15	0.6468	0.01	6
16	0.6557	0.0089	6
17	0.6638	0.0081	6
18	0.6713	0.0075	6
19	0.6781	0.0068	5
20	0.6845	0.0064	5

Tabla 4.1. Parámetros del sistema según tramo de funcionamiento.

En los casos anteriores, se ha trabajado con valores de humedad altos, que tenían ganancias pequeñas y tiempos de subida también pequeños. Los puntos más cercanos a poca humedad, tienen mayores valores de K y tiempos de subida. Además, se recuerda la zona con linealidad respecto al tiempo, donde un escalón aumenta la humedad

linealmente a lo largo de los días.

Con los datos anteriores, se podría establecer un modelo de primer orden para cada tramo. Y con este modelo, calcular un controlador, PI, para cada tramo igualmente.

El cálculo de cada modelo, y posterior control, se realiza exactamente igual que en las expresiones 3.8, 3.9 y 3.10. Una vez obtenido, se pasa a discreto. Hay varias opciones para ello, como emplear el comando *c2d* del propio Matlab para que nos devuelva la función de transferencia en tiempo discreto, indicando el tiempo de muestreo, un día. También se puede conseguir los parámetros Ti y Kp relacionándolos con:

$$C(s) = Kp * \frac{Ti s + 1}{Ti s} \quad 4.1$$

Esos parámetros son necesarios para poder calcular la señal de control en tiempo continuo como:

$$u(t) = Kp * (error(t) + \frac{error_{integral}}{Ti} + Td * \frac{derror}{dt}) \quad 4.2$$

Con Td igual a cero ya que no hay efecto derivativo en este control. Esos parámetros, como se verá en las ecuaciones 4.7, 4.8 y 4.9, sirven para implementar el control en tiempo discreto.

Teniendo un controlador en tiempo discreto, se puede realizar una prueba para comprobar su funcionamiento, sustituyendo en el archivo de Simulink el control continuo por el control discreto:

$$C(s) = \frac{0.25}{s} * \frac{4s + 1}{0.0286} \quad 4.3$$

$$C(z) = \frac{43.97 z - 26.22}{z - 1} \quad 4.4$$

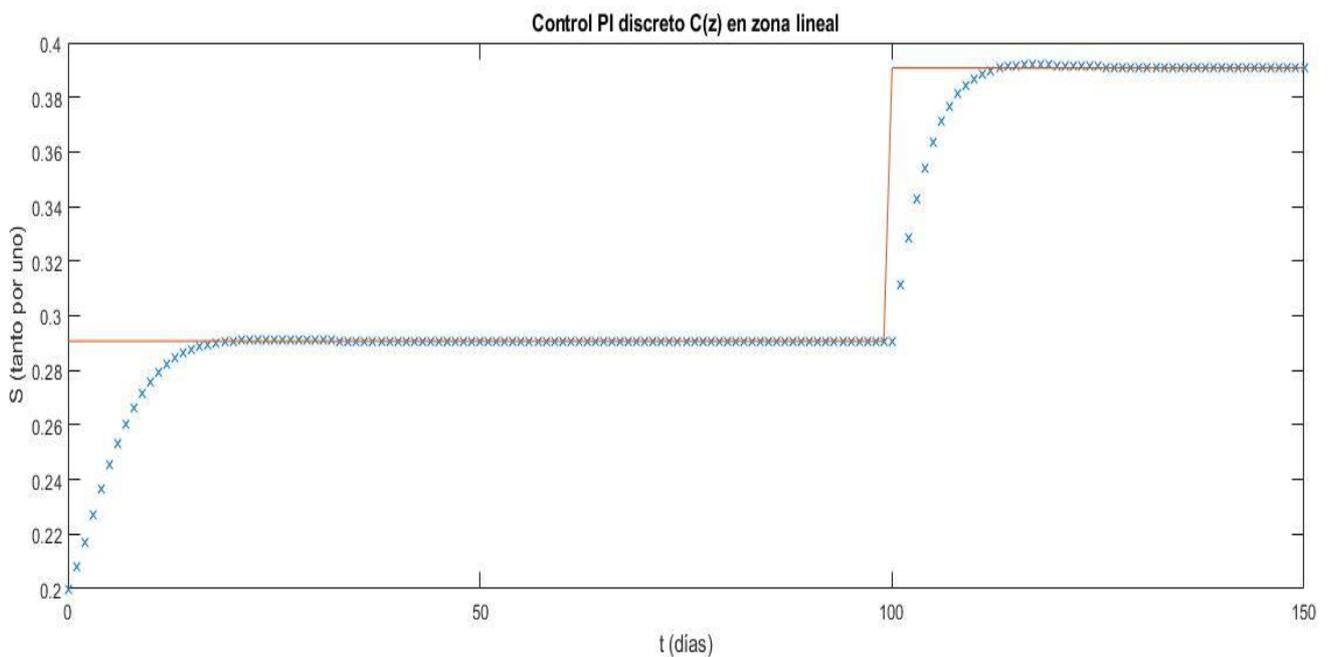


Figura 4.10. Prueba del control discreto del sistema.

Visto el correcto funcionamiento, bastaría con pasar cada control continuo a discreto. En concreto, para la implementación en tiempo discreto del control se utilizará la aproximación de Euler II, con lo que:

$$u_k = Kp * (e_k + \frac{Tm}{Ti} \sum e_i + \frac{Td}{Tm} * (e_k - e_{k-1})) \quad 4.5$$

$$u_k - u_{k-1} = q0 * e_k + q1 * e_{k-1} + q2 * e_{k-2} \quad 4.6$$

$$q0 = Kp * (1 + \frac{Tm}{Ti} + \frac{Td}{Tm}) \quad 4.7$$

$$q1 = Kp * (-1 - 2 * \frac{Td}{Tm}) \quad 4.8$$

$$q2 = Kp * \frac{Td}{Tm} \quad 4.9$$

Así, conocido el tiempo de subida y K de cada tramo, se pueden obtener los controladores continuos, y con los parámetros Kp y Ti de éstos, obtener los valores de $q0$, $q1$, $q2$. La implementación, basada en el control por tabla, se encuentra disponible en el anexo como *control_FINAL.m*. Este código es único, tanto para celdas con sensores en el centro de la vecindad, como para el resto de celdas.

En la siguiente figura se aprecia el resultado para varios puntos de funcionamiento del sistema a lo largo de un tiempo de simulación de 800 unidades.

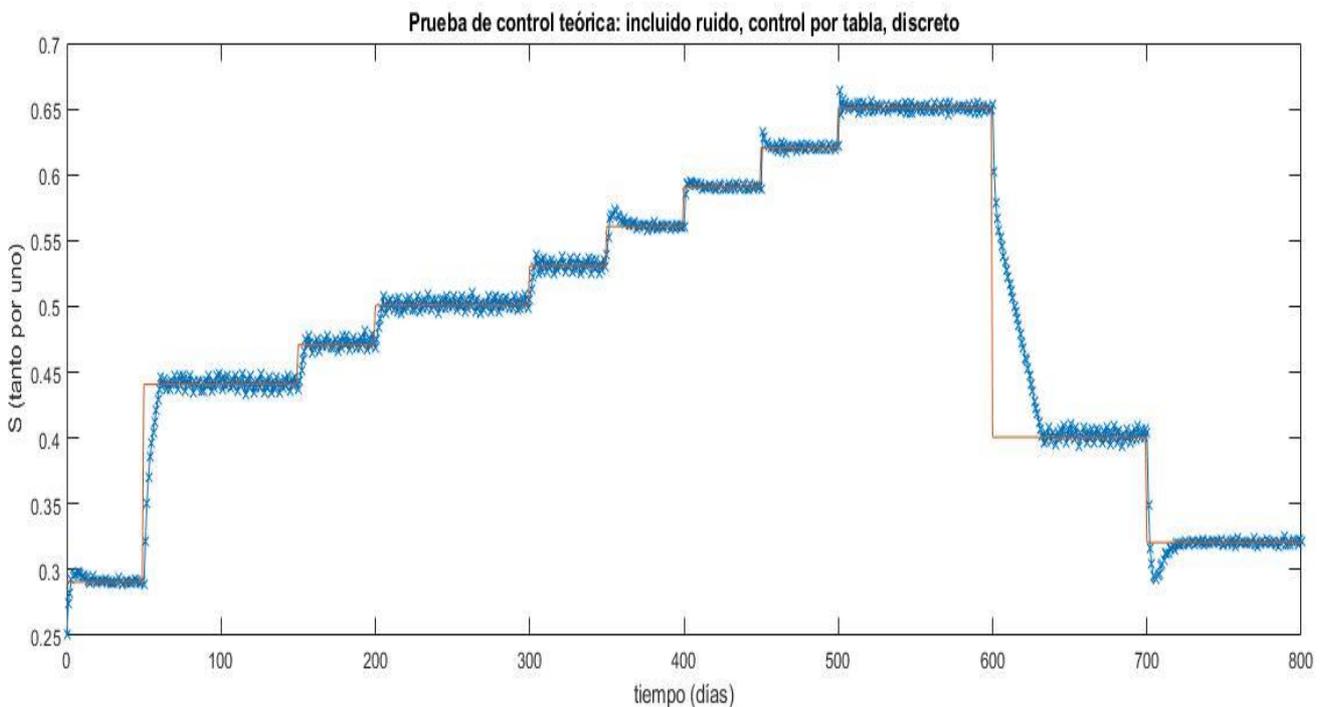


Figura 4.11. Prueba del control discreto por tabla, en ausencia de precipitaciones, para varios puntos de operación del sistema. El sensor incluye ruido.

Por último, sólo quedaría plantear la estrategia para poder controlar aquellas celdas sin necesidad de sensores. En esta ocasión, no se hará uso del modelo linealizado, sino que se tratará de estimar la humedad para las celdas que no tienen sensor en función de la humedad leída en la celda central y la altura a la que se encuentra el resto de la vecindad.

En este punto se plantean dos opciones:

Por un lado, utilizar el modelo del sistema (capítulo I) para estimar la cantidad de agua que reciben o ceden las celdas por escorrentías, y compensar con ese mismo valor la señal de control. Así, se anularía el efecto de corrientes de agua por pendientes del terreno. Aunque a simple vista parezca una idea sencilla y eficaz, tiene serios problemas:

- Requiere conocer los parámetros del suelo. Aunque en este trabajo ya se conocen, implementar este tipo de algoritmo para estimar la humedad para un terreno cualquiera supondría tener que estimar dichos parámetros primero. Esta labor puede ser compleja y lenta.
- Aunque se conocieran todos los parámetros del suelo, el cálculo de escorrentías implicaría conocer el modelo del suelo aproximado, y tiene una forma compleja:

$$escurr_i(I^-, S^-, t) = I^- * \left(1 - e^{-\frac{S^-}{\tau}}\right) * \frac{\theta_i}{\sum_{j=1}^4 \theta_i} \tag{4.10}$$

- La expresión de escorrentía, además de compleja y de requerir parámetros del suelo, necesita de valores anteriores de infiltración y humedad. Es, por tanto, complicado de determinar para cada celda y en cada dirección la cantidad de escorrentía.

Como solución simplificadora de todo lo anterior, se utilizaron resultados empíricos sobre diferencia de humedad y diferencia de altura entre celdas. Naturalmente, las pérdidas o ganancias que haya por la diferencia de altura entre celdas también dependerán del tramo de humedad en que se encuentre el suelo.

Se obtuvo:

Tramo de humedad (tanto por uno)	Ganancia de humedad por cada metro de altura de diferencia
$S < 0.4$	0.0005
$0.4 < S < 0.55$	0.0002
$S > 0.55$	0.000005

Tabla 4.2. Relaciones aproximadas entre diferencias de humedad y altura.

Esto arroja una aproximación de que, por ejemplo, una celda que esté un metro por encima de cada una de las cuatro vecinas, tendrá una humedad $4 * 0.0005$ menor que ellas (si el sistema se encuentra funcionando en el tramo $S < 0.4$).

Así, lo primero que hay que hacer para este último caso será medir la humedad en la celda central de la vecindad, y con este valor, estimar la humedad en cada una de las celdas vecinas. La medida de humedad se realiza igual que el caso anterior, guardando el valor leído que será necesario para el resto de celdas. La estimación de humedad se realiza con un código, *estimación_humedad.m*, que simplemente recibe el valor de humedad leído por la celda central y añade una cantidad (puede ser negativa) a ese valor dependiendo de las alturas de las cuatro celdas vecinas para la celda en cuestión.

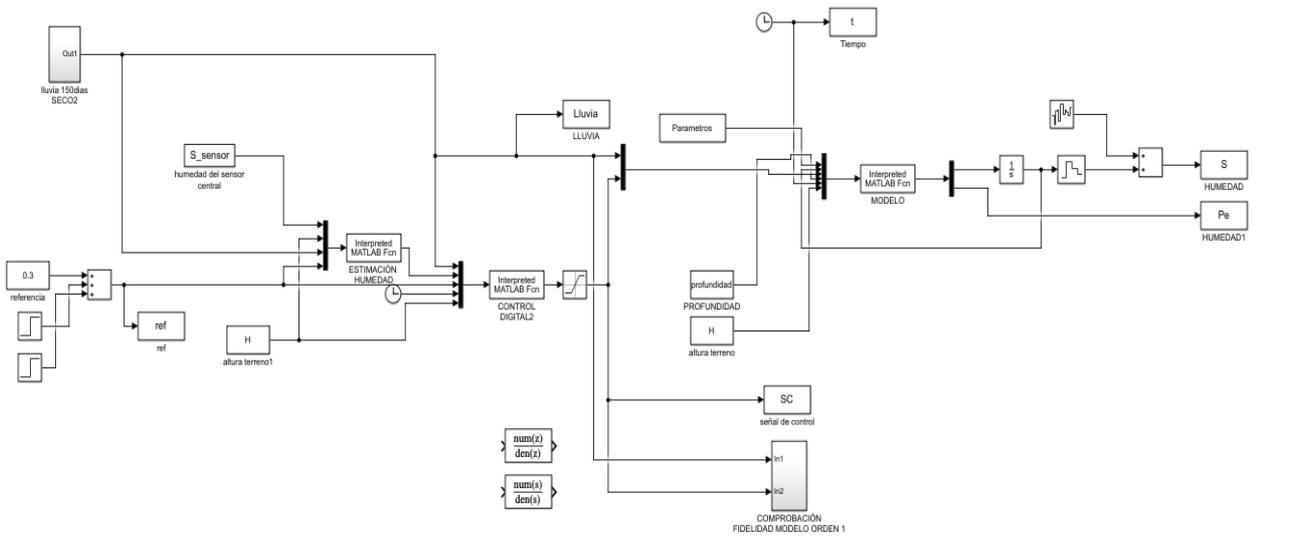


Figura 4.12. Esquema para la simulación de las celdas de la vecindad. Se aprecia que no hay realimentación de la salida del sistema. Se observa una función de Matlab antes del control, que estima la humedad.

Sólo queda añadir el resultado de este control para alguna vecindad:

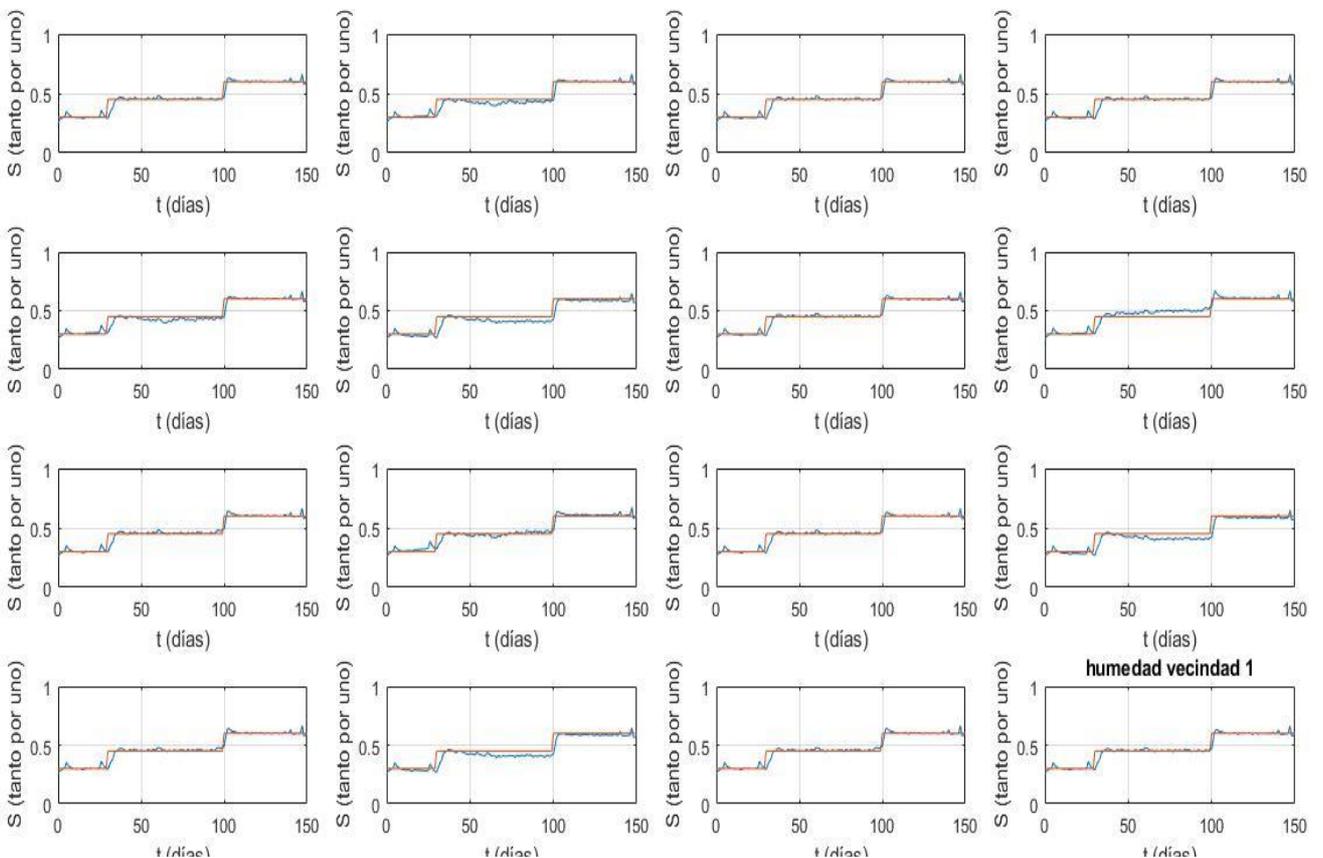


Figura 4.13. Control para toda la vecindad primera, por tabla. La estimación de humedad se realiza en base a altura y lectura del único sensor (con ruido).

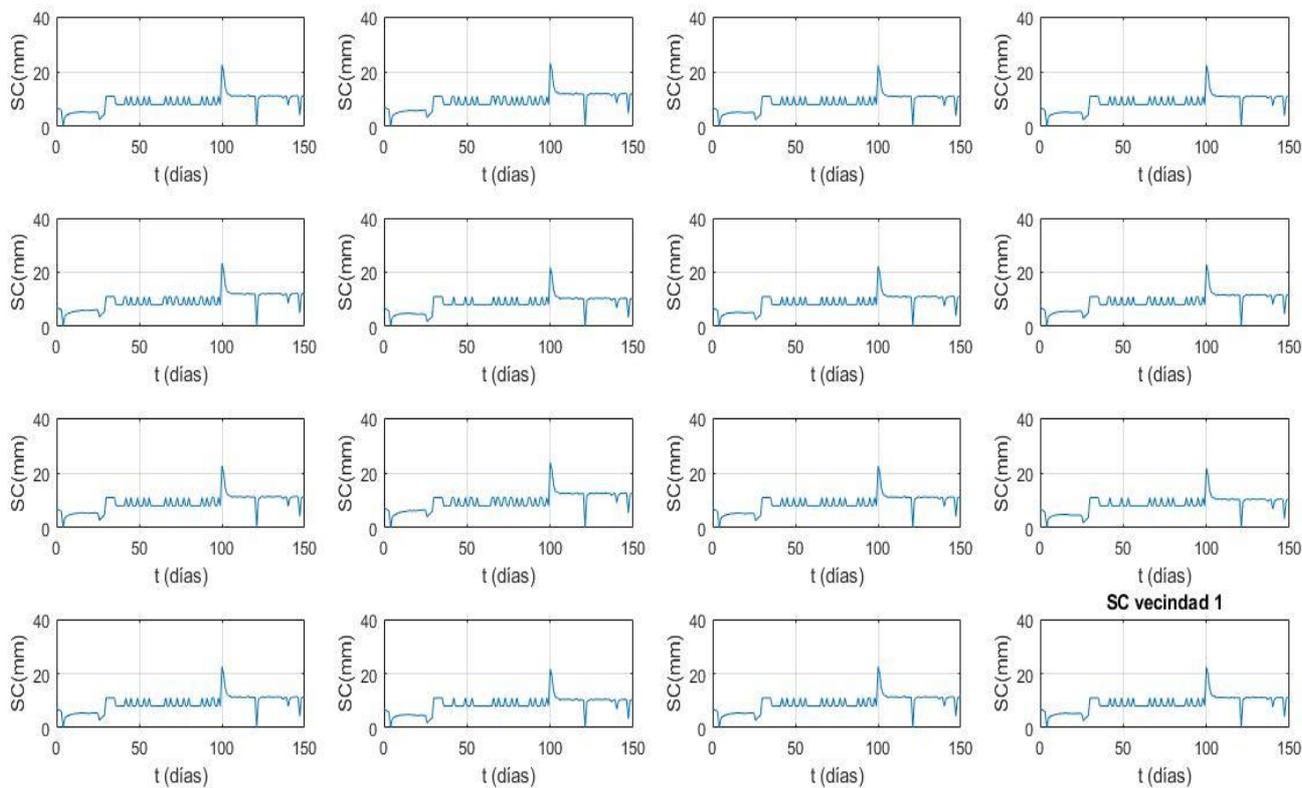


Figura 4.14. Señal de control para toda la vecindad primera, por tabla.

Se añade como detalle una celda donde el control es satisfactorio. Sin embargo, en la figura 4.13 se pueden apreciar diferencias entre algunas celdas, con valores superiores o inferiores a la referencia de humedad según el caso. Por tanto, se concluye que la estimación de humedad un método más rápido, pero menos preciso que el ajuste manual de la compensación de agua del caso anterior.

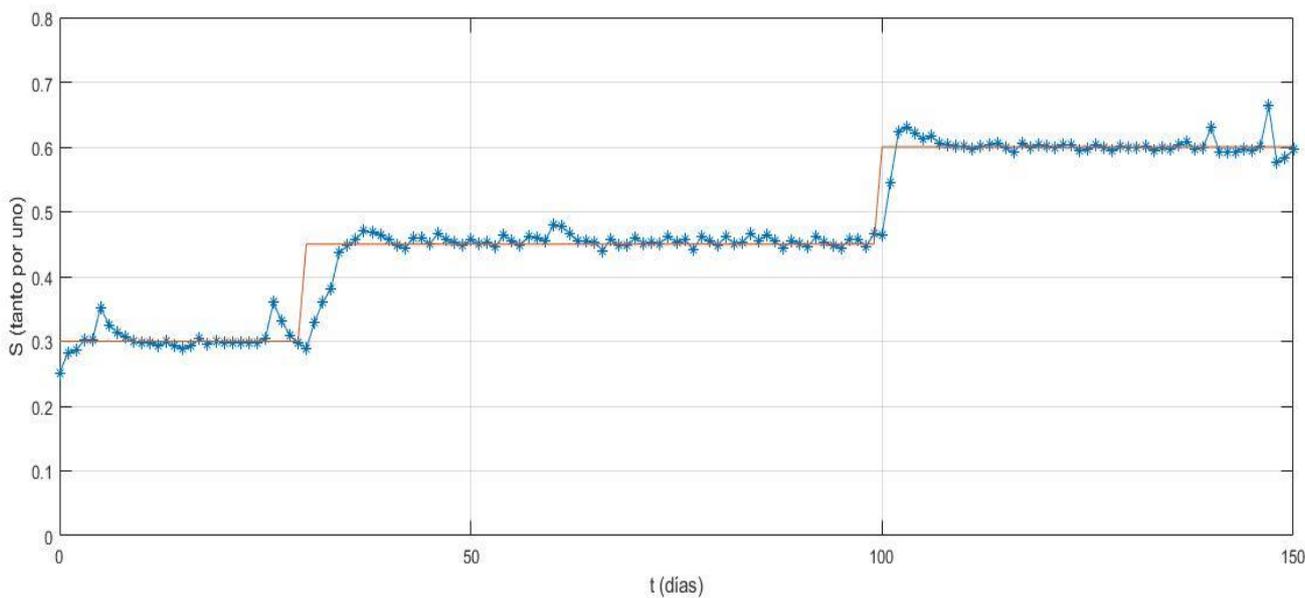


Figura 4.15. Control de una celda, por tabla, con estimación de humedad.

CONCLUSIONES

La vida es el arte de sacar conclusiones suficientes a partir de datos insuficientes.

- Samuel Butler -

El presente trabajo tuvo como objeto de estudio el suelo agrícola, con objetivo de reducir el gasto de agua al mínimo a través de la gestión eficiente de un sistema de control. Se dividió en dos partes claramente diferenciadas: por un lado, modelado del suelo, por otro, control de la humedad en el suelo.

En cuanto a la primera parte, se podría concluir que el comportamiento del contenido de agua en el suelo puede aproximarse matemáticamente a un modelo sin excesiva complejidad. Este modelo tiene en cuenta parámetros que sí requieren de un estudio más exhaustivo del terreno de estudio, requiriendo experimentos y pruebas. Como se comentó al principio de este TFG, el alcance no incluye la estimación de estos parámetros, por lo que fueron facilitados por otras fuentes directamente. En sí, el modelo puede resumirse en una ecuación diferencial, que relaciona variación del contenido de agua con una serie de pérdidas y ganancias de agua, es decir, un balance. Cada uno de los términos de la ecuación es sencillo: las pérdidas de transpiración y evaporación tienen un comportamiento lineal a trozos con respecto a la humedad; las pérdidas de percolación aumentan siguiendo alguna exponencial con respecto a la humedad; y la escorrentía depende de cuestiones geométricas y trigonométricas del terreno.

La elaboración de un código que implementara esta ecuación para su posterior simulación no fue complicada. La humedad en el suelo sube y baja de una forma característica como se aprecia en cada una de las simulaciones del trabajo. Se debe a un comportamiento no lineal, pues las pérdidas varían según el tramo. Además, se distinguen los casos de estación seca y estación húmeda.

Si bien el modelo tipo “leaky bucket” es simple y determinista, ayuda a entender el funcionamiento de la humedad en el suelo para un posterior control. Necesariamente, el control debe ser para un punto de funcionamiento concreto, ya que el carácter fuertemente no lineal del suelo hará que cada tramo, según humedad, tenga diferentes parámetros. Sin embargo, esto no es ninguna limitación, pues para la aplicación real de este control no se debería requerir el cambio de referencia de humedad frecuentemente.

En cuanto al control, las técnicas clásicas para un controlador proporcional con efecto integral (PI) son suficientes para adecuar la humedad en torno a la referencia deseada, sin muchos errores u oscilaciones. En cualquier caso, el control nunca se volvía inestable. No obstante, en el caso de estación húmeda, la cantidad de precipitaciones era tal que impedía un correcto efecto integral para reducir el error en régimen permanente, a menos que se impusiera uno más agresivo, aumentando las oscilaciones y picos. Se probó un control únicamente proporcional, con excelentes resultados, demostrando que es suficiente un controlador P para mantener la humedad en la referencia deseada. El error en régimen permanente de este control no era significativo, menor al 1%. Además, hay que tener en cuenta que dudosamente un cambio tan pequeño de humedad sea notorio en la planta del cultivo. Naturalmente, sólo es válido para el entorno del punto de operación, pues tanto más separado esté el sistema funcionado de este punto, más notables serán los errores.

Por último, se barajaron diferentes maneras de poder controlar celdas sin uso de sensores. Las opciones han sido, en primer lugar, compensación de agua en el control para suplir la demanda de aquellas celdas que cedían por escorrentías grandes cantidades y dejaban su nivel de humedad por debajo de la referencia, usando como

realimentación la salida del modelo lineal, a modo de observador. Por otro lado, luego se usó una estimación de humedad (por orografía del terreno) previa a cada celda, y con esa estimación a modo de realimentación, aplicarle el control. En general, el segundo método es más sencillo (sólo requiere unas pruebas para observar la diferencia de humedad entre celdas según la altura) pero ofrece un resultado menos preciso que el primer método. Además, en el segundo sólo se hizo una estimación de humedad en base a la experiencia, no usando como recurso el modelo propio del suelo, pues como se comentó, tiene varios inconvenientes.

En cuanto al control por la técnica *gain scheduling*, es cierto que permite usar el sistema en múltiples puntos de funcionamiento, a cambio de tener que realizar un exhaustivo estudio de respuestas del sistema para conocer las ganancias y parámetros diferentes según el tramo en que se encuentre trabajando el sistema. La cuestión radica en la utilidad de todo este proceso para hacer un control que permita el cambio de referencia. Sólo merecerá la pena en aquellos terrenos que cambien de cultivo regularmente y no quieran tener que ir cambiando el control continuamente, o para cultivos que requieran un cambio de humedad en el suelo, como el trigo. Por lo demás, se puede concluir que el más eficiente en cuanto a complejidad y resultado es el control proporcional, especialmente en épocas de lluvia, pensando que el cultivo no requerirá cambiar de humedad a lo largo de su ciclo.

REFERENCIAS

- [1] Wikipedia (2019). Agricultura. Consultado el 22 mayo 2019 de <https://es.wikipedia.org/wiki/Agricultura>
- [2] TAUGER, MARK B. *Agriculture in World History*. EEUU: Routledge Press (2010)
- [3] Aprendiendo Geografía Escolar (2016). Río Nilo - Agricultura en el Antiguo Egipto y en el Actual Egipto. Consultado el 22 de mayo 2019 de <http://aprendiendogeografiaescolar.blogspot.com/2016/02/agricultura-en-el-antiguo-egipto-y-en.html>
- [4] Agroicultura (2018). La Agricultura en la Historia de la Humanidad (I). Consultado el 22 de mayo 2019 de <https://agroicultura.com/general/la-agricultura-en-la-historia-de-la-humanidad/>
- [5] Our World in Data (2019). World Population Growth. Consultado el 22 de mayo 2019 de <https://ourworldindata.org/world-population-growth>
- [6] Our World in Data (2019). World Population Growth. Consultado el 22 de mayo 2019 de <https://ourworldindata.org/world-population-growth>
- [7] Naciones Unidas (2019). Agua. Consultado el 23 de mayo de 2019 de <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>
- [8] LUIS ECHARRI (1998). *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. España: Ed. Teide. Consultado el 23 de mayo 2019 de: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/06Recursos/110Producci.htm>
- [9] Naciones Unidas (2019). Agua. Consultado el 23 de mayo de 2019 de <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>
- [10] LUIS ECHARRI (1998). *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. España: Ed. Teide. Consultado el 23 de mayo 2019 de: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/06Recursos/121ImpactAmbAgr.htm>
- [11] Naciones Unidas (2019). Alimentación. Consultado el 23 de mayo de 2019 de <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/food/index.html>
- [12] Naciones Unidas (2019). Población. Consultado el 23 de mayo de 2019 de <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>
- [13] Our World in Data (2019). World Population Growth. Consultado el 23 de mayo 2019 de <https://ourworldindata.org/world-population-growth>

- [14] PCE Iberica S.L. Instrumentación (2019). Medidor de humedad absoluta. Consultado el 26 de mayo 2019 https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-de-medida/medidor/medidor-de-humedad-absoluta-kat_70069_1.htm
- [15] Arduino (2019). Productos. Consultado el 26 de mayo 2019 de: <https://store.arduino.cc/>
- [16] SEGURA MÉNDEZ, FCO JOSÉ. *Análisis comparativo de modelos agregados de balance hídrico en la España peninsular y su sensibilidad a la incertidumbre climática*. Murcia, España (Mayo de 2017).
- [17] SEGURA MÉNDEZ, FCO JOSÉ. *Análisis comparativo de modelos agregados de balance hídrico en la España peninsular y su sensibilidad a la incertidumbre climática*. Murcia, España (Mayo de 2017).
- [18] RICCARDI, GERARDO. ZIMMERMANN, ERIK. *Simulación de series temporales de lluvias puntuales mediante un modelo estocástico de composición de estación Rosario Aero (Argentina)*. Rosario, Argentina (2000).
- [19] ARRIAGA SEVILLA, JAVIER. *Modelado, simulación y control del agua en la agricultura*. Sevilla, España (Abril de 2015).
- [20] SEGURA MÉNDEZ, FCO JOSÉ. *Análisis comparativo de modelos agregados de balance hídrico en la España peninsular y su sensibilidad a la incertidumbre climática*. Murcia, España (Mayo de 2017).
- [21] Wikipedia (2019). Densidad. Consultado el 31 de mayo 2019 de: https://es.wikipedia.org/wiki/Densidad#Densidad_aparente
- [22] ARRIAGA SEVILLA, JAVIER. *Modelado, simulación y control del agua en la agricultura*. Sevilla, España (Abril de 2015).
- [23] Tiloom (2017). Conductividad hidráulica saturada: evolución de la infiltración. Consultado el 01 de junio 2019 de: <https://www.tiloom.com/conductividad-hidraulica-saturada/>
- [24] StuDocu (2019). Hidrología Continental y Marina, Tema 4: infiltración y percolación. Autor: Aída Martínez, Univesidad de Valencia (2019). Consultado el 01 de junio 2019 de: <https://www.studocu.com/es/document/universitat-de-valencia/hidrologia-continental-y-marina/apuntes/tema-4-infiltracion-percolacion/2423970/view>
- [25] ARRIAGA SEVILLA, JAVIER. *Modelado, simulación y control del agua en la agricultura*. Sevilla, España (Abril de 2015).
- [26] ARRIAGA SEVILLA, JAVIER. *Modelado, simulación y control del agua en la agricultura*. Sevilla, España (Abril de 2015).
- [27] MESTAS VALERO, ROGER MANUEL. *Régimen hídrico del suelo y evapotranspiración en áreas agrícolas y forestales*. Coruña, España (2011).
- [28] BALCÁZAR ORDÓNEZ, LUIS. *Flujos laterales de agua en dos suelos típicos de un bosque primario de montaña en la reserva biológica san Francisco, en el sur del Ecuador*. Loja, Ecuador (2010).
- [29] ARRIAGA SEVILLA, JAVIER. *Modelado, simulación y control del agua en la agricultura*. Sevilla,

España (Abril de 2015).

- [30] Etérea Estudios. Creación de una carretera de montaña. Consultado el 06 de junio 2019 de:
https://www.eteraeestudios.com/training_img/subd_tips/carretera_1.htm
- [31] ARRIAGA SEVILLA, JAVIER. *Modelado, simulación y control del agua en la agricultura*. Sevilla, España (Abril de 2015).
- [32] Weather Atlas. Previsión meteorológica y clima mensual La Coruña, España. Consultado el 14 de marzo 2019 de: <https://www.weather-es.com/es/espana/la-coruna-clima>
- [33] Weather Atlas. Previsión meteorológica y clima mensual Sevilla, España. Consultado el 14 de marzo 2019 de: <https://www.weather-es.com/es/espana/sevilla-clima>
- [34] Weather Atlas. Previsión meteorológica y clima mensual Sevilla, España. Consultado el 14 de marzo 2019 de: <https://www.weather-es.com/es/espana/sevilla-clima>
- [35] Agromática. Guís imprescindible del cultivo del tomate. Consultado el 14 de marzo 2019 de:
<https://www.agromatica.es/cultivo-de-tomates/>
- [36] Infoagro. Cultivo de la lechuga. Consultado el 15 de marzo 2019 de:
<http://www.infoagro.com/hortalizas/lechuga.htm>

CÓDIGOS

Modelo.m

```
function dS = modelo(in)

%----- PARÁMETROS DE ENTRADA -----
n = in(1);
beta = in(2);
ksat = in(3);
Sh = in(4);
Sw = in(5);
Srisco = in(6);
Sfc = in(7);
tau_esc = in(8);
Emax = in(9);
Tmax = in(10);

% ----- REALIMENTACIÓN DE LA HUMEDAD-----
Sant = in(11);

% -----ENTRADAS (LLUVIA Y RIEGO)-----
P = in(12);
riego = in(13);

% ----- PROFUNDIDAD -----
Zr = in(14);

% ----- TIEMPO-----
t = in(15);

% ----- ALTURAS MEDIAS DE LAS CELDAS -----
Ha = in(16);
Harriba = in(17);
Habajo = in(18);
Hderecha = in(19);
Hizquierda = in(20);

persistent infiltracion
if (t<10e-3)
    infiltracion = 20;
end

% ----- PÉRDIDAS POR PERCOLACIÓN-----
if Sant>Sfc
    L = ksat * (exp(beta*(Sant - Sfc))-1)/(exp(beta*(1 - Sfc))-1);
else
    L = 0;
end

% ----- PÉRDIDAS POR TRANSPIRACIÓN-----
if Sant<Sw
    T = 0;
elseif (Sw<Sant)&&(Sant<Srisco)
    T = Tmax * (Sant - Sw)/(Srisco - Sw);
else
```

```

    T = Tmax;
end

% ----- PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN-----
if Sant<Sh
    E = 0;
elseif (Sh<Sant)&&(Sant<Srisco)
    E = Emax * (Sant - Sh)/(Srisco - Sh);
else
    E = Emax;
end

%-----FLUJOS LATERALES -----
theta1 = atan2((Ha - Harriba),10); %ángulos de pendiente
theta2 = atan2((Ha - Habajo),10);
theta3 = atan2((Ha - Hderecha),10);
theta4 = atan2((Ha - Hizquierda),10);

if theta1 > 0
    L1 = 0;
else
    L1 = -(L/4)*(Zr/10000)*sin(theta1);
end

if theta2 > 0
    L2 = 0;
else
    L2 = -(L/4)*(Zr/10000)*sin(theta2);
end

if theta3 > 0
    L3 = 0;
else
    L3 = -(L/4)*(Zr/10000)*sin(theta3);
end

if theta4 > 0
    L4 = 0;
else
    L4 = -(L/4)*(Zr/10000)*sin(theta4);
end

Lz = L; % percolación vertical

flujo = L1 + L2 + L3 + L4; %flujo lateral

%-----ESCORRENTÍA-----
stp = 0;
stn = 0;
if theta1 > 0
    stp = stp + theta1;
else
    stn = stn + theta1;
end
if theta2 > 0
    stp = stp + theta2;
else
    stn = stn + theta2;
end
if theta3 > 0

```

```

    stp = stp + theta3;
else
    stn = stn + theta3;
end
if theta4 > 0
    stp = stp + theta4;
else
    stn = stn + theta4;
end

if (theta1 > 0) && (stp > 0)
    escurr1 = infiltracion*(1 - exp(-Sant/tau_esc))*(theta1/stp);
elseif (theta1 < 0) && (stn < 0)
    escurr1 = - infiltracion*(1 - exp(-Sant/tau_esc))*(theta1/stn);
else
    escurr1 = 0;
end
if (theta2 > 0) && (stp > 0)
    escurr2 = infiltracion*(1 - exp(-Sant/tau_esc))*(theta2/stp);
elseif (theta2 < 0) && (stn < 0)
    escurr2 = - infiltracion*(1 - exp(-Sant/tau_esc))*(theta2/stn);
else
    escurr2 = 0;
end
if (theta3 > 0) && (stp > 0)
    escurr3 = infiltracion*(1 - exp(-Sant/tau_esc))*(theta3/stp);
elseif (theta3 < 0) && (stn < 0)
    escurr3 = - infiltracion*(1 - exp(-Sant/tau_esc))*(theta3/stn);
else
    escurr3 = 0;
end
if (theta4 > 0) && (stp > 0)
    escurr4 = infiltracion*(1 - exp(-Sant/tau_esc))*(theta4/stp);
elseif (theta4 < 0) && (stn < 0)
    escurr4 = - infiltracion*(1 - exp(-Sant/tau_esc))*(theta4/stn);
else
    escurr4 = 0;
end

escurr = escurr1 + escurr2 + escurr3 + escurr4;

%----- TOTAL -----
satu = n*Zr*(1 - Sant);

Pe = P - escurr + riego;

minimo = min(Pe, satu);

infiltracion = minimo + flujo ;

suma = minimo + flujo - Lz - T - E;

dS = [suma/(n*Zr),Pe];

end

```

Simulacion_celdas.m

```

clear all

parametros
altura_terreno

k=1;

for i=2:4
    for j=2:4
        Ha = hterr(i,j);
        Harriba = hterr(i-1,j);
        Habajo = hterr(i+1,j);
        Hderecha = hterr(i,j-1);
        Hizquierda = hterr(i,j+1);

        H = [Ha,Harriba,Habajo,Hderecha,Hizquierda];

        %sim('control_humedo_lechuga_digital_sinsensor')
        sim('control_humedo_lechuga_digital');
        %sim('control_humedo_lechuga');
        %sim('control_seco_tomate');
        %sim('modelosim');

        Sreg(k,:) = S;
        PeReg(k,:) = Pe;
        %Smodreg(k,:) = Smod;
        k=k+1;

    end
end

```

parametros.m

```

% n = 0.3; %estación seca
% beta = 11.37;
% ksat = 518.2; %mm/dia
% Sh = 0.0163; %estación seca
% Sw = 0.2;
% Srisco = 0.4;
% Sfc = 0.5515;
% tau_esc = 10;
% Emax = 3.823; %mm/dia en estación seca
% Tmax = 5; %mm/dia en estación seca
%
% profundidad = 500; %mm (0.5 metros)
% %%-----
n = 0.9; %estación humeda
beta = 11.37;
ksat = 518.2; %mm/dia
Sh = 0.1; %estación humeda
Sw = 0.2;
Srisco = 0.4;
Sfc = 0.5515;
tau_esc = 10; %69.73;
Emax = 1; %mm/dia en estación humeda
Tmax = 2; %mm/dia en estación humeda

```

```
profundidad = 500; %mm (0.5 metros)
```

```
Parametros = [n, beta, ksat, Sh, Sw, Srisco, Sfc, tau_esc, Emax, Tmax]
```

Altura_terreno.m

```
hterr=[293,293,292,289,287;
        290,290,289,286,285;
        287,286,285,284,283;
        285,284,283,281,285;
        282,281,282,286,290]
```

Control.m

```
function SC = control(in)

P = in(1);
Sant = in(2);
ref = in(3);
t = in(4);

kp = 690.7895;
kp1 = 1800;
kpp = 3850;
Ti = 3.5;

persistent integral

if(t<10e-2)
    integral = 0;
end

if P > 16
    SC = 0;
else
    error = ref - Sant;
    integral = integral + error;
    %siguiente línea para control PI
    SC = kp1*(error + 0.1111*integral/Ti);
    %siguiente línea para control Proporcional
    %SC = kpp*error;
    if SC > 25
        SC = 25;
    elseif SC < 0
        SC = 0;
    end
end
end
end
```

Control_especial.m

```

function salida = control_especial(in)

P = in(1);
Sant = in(2);
ref = in(3);
t = in(4);
Ha = in(5);
Harriba = in(6);
Habajo = in(7);
Hderecha = in(8);
Hizquierda = in(9);
Sreal = in(10);

kp = 690.7895;
kp1 = 1800;
kpp = 3850;
Ti = 3.5;

persistent integrall1
persistent integral2

if(t<10e-2)
    integrall1 = 0;
    integral2 = 0;
end

if P > 16
    SCreal = 0;
    SCaprox = 0;
    dife = 0;
    salida = [SCreal,dife,SCaprox]
else
    error1 = ref - Sant;
    error2 = ref - Sreal;
    dif_S = Sant - Sreal;
    integrall1 = integrall1 + error1;
    integral2 = integral2 + error2;
    %siguiente línea para control PI
    SCaprox = kp1*(error1 + 0.1111*integrall1/Ti);
    SCreal = kp1*(error2 + 0.1111*integral2/Ti);
    %siguiente línea para control Proporcional
    %SCaprox = kp1*error1;
    %SCreal = kp1*error2;

    %diferencia entre señal de control con realimentación del modelo
    %linealizado y realimentación con la señal medida con el sensor.

    dife = dif_S*kpp

    if SCaprox > 25
        SCaprox = 25;
    elseif SCaprox < 0
        SCaprox = 0;
    end

    if SCreal > 25

```

```

        SCreál = 25;
    elseif SCreál < 0
        SCreál = 0;
    end

    salida = [SCreál,dife,SCaprox];
end

```

Control_completo.m

```

function SC = control_completo(in)

P = in(1);
Sant = in(2);
ref = in(3);
t = in(4);
Ha = in(5);
Harriba = in(6);
Habajo = in(7);
Hderecha = in(8);
Hizquierda = in(9);
dife = in(10);

kp = 690.7895;
kp1 = 1800;
kpp = 3850;
Ti = 3.5;

persistent integral

if(t<10e-2)
    integral = 0;
end

if P > 16
    SC = 0;
else
    error = ref +0.015 - Sant;
    integral = integral + error;
    %siguiente línea para control PI
    %SC = kp1*(error + 0.1111*integral/Ti);
    %siguiente línea para control Proporcional
    act_arriba = 0;
    act_abajo = 0;
    act_derecha = 0;
    act_izquierda = 0;
    if(Ha > Harriba || Ha == Harriba)
        act_arriba = 1;
    end
    if(Ha > Habajo || Ha == Habajo)
        act_abajo = 1;
    end
    if(Ha > Hderecha || Ha == Hderecha)
        act_derecha = 1;
    end
    if(Ha > Hizquierda || Ha == Hizquierda)
        act_izquierda = 1;
    end
end

```

```

    SC = kpp*error + dife*act_arriba/4 + dife*act_abajo/4 +
dife*act_derecha/4 + dife*act_izquierda/4;

    if SC > 25
        SC = 25;
    elseif SC < 0
        SC = 0;
    end
end
end

```

Control_FINAL.m

```

function salida = control_FINAL(in)

P = in(1);
Sant = in(2);
ref = in(3);
t = in(4);
Ha = in(5);
Harriba = in(6);
Habajo = in(7);
Hderecha = in(8);
Hizquierda = in(9);

persistent kant

if(t<10e-2)
    kant = 0.0286;
end

if (ref <= 0.4)
    ts = 10;
    k = (0.0286 + kant)/2;
    ueq = 5;
    kp = 1/k;
    ti = ts/3;
end
if (ref>0.4 && ref<0.5557)
    if(Sant > ref)
        SC = 8;
    elseif(Sant < ref)
        SC = 11;
    end
end
if (ref>0.5557)
    ts = 10;
    k = (0.0236 + kant)/2;
    ueq = 10;
    kp = 1/k;
    ti = ts/3;
end
if (ref>0.5793)
    ts = 6;
    k = (0.0183 + kant)/2;
    ueq = 11;
    kp = 1/k;
    ti = ts/3;
end
end

```

```
if (ref>0.5976)
  ts = 6;
  k = (0.0151 + kant)/2;
  ueq = 12;
  kp = 1/k;
  ti = ts/3;
end
if (ref>0.5976)
  ts = 4;
  k = (0.0151 + kant)/2;
  ueq = 12;
  kp = 1/k;
  ti = ts/3;
end
if (ref>0.6127)
  ts = 4;
  k = (0.0129 + kant)/2;
  ueq = 13;
  kp = 1/k;
  ti = ts/3;
end
if (ref>0.6127)
  ts = 4;
  k = (0.0129 + kant)/2;
  ueq = 13;
  kp = 1/k;
  ti = ts/3;
end
if (ref>0.6256)
  ts = 4;
  k = (0.0112 + kant)/2;
  ueq = 14;
  kp = 1/k;
  ti = ts/3;
end
if (ref>0.6368)
  ts = 4;
  k = (0.01 + kant)/2;
  ueq = 15;
  kp = 1/k;
  ti = ts/3;
end
if (ref>0.6468)
  ts = 20;
  k = (0.0089 + kant)/2;
  ueq = 16;
  kp = 1/k;
  ti = ts/3;
end

tm = 1;

persistent ek1 ek2 ek3
persistent uk1 uk2 uk3

if(t<10e-2)
  ek1 = 0;ek2 = 0;ek3 = 0;
  uk1 = 0;uk2 = 0;uk3 = 0;
end

if P > 10
  SC = 0;
```

```

elseif (ref <= 0.4 || ref >= 0.5557)
    ek = ref - Sant;

    q0 = kp*(1+tm/ti);
    q1 = -kp;
    q2 = 0;

    uk = uk1 + q0*ek + q1*ek1 + q2*ek2;

    uk3=uk2;
    uk2=uk1;
    uk1=uk;
    ek2=ek1;
    ek1=ek;

    SC = uk + ueq;
    kant = k;
end

if SC > 25
    SC = 25;
elseif SC < 0
    SC = 0;
end

salida = SC;

end

```

estimación_humedad.m

```

function salida = estimacion_humedad(in)

Sant = in(1);
Ha = in(2);
Harriba = in(3);
Habajo = in(4);
Hderecha = in(5);
Hizquierda = in(6);
ref = in(8);

d1 = -Ha + Harriba;
d2 = -Ha + Habajo;
d3 = -Ha + Hderecha;
d4 = -Ha + Hizquierda;

total = d1+d2+d3+d4;

if (ref < 0.4)
    s_estim = Sant + total*0.0005;
elseif (ref>0.4 && ref<0.5557)
    s_estim = Sant + total*0.0002 ;
else
    s_estim = Sant + total*0.000005;
end

salida = s_estim;

end

```

simulación_celdas_FINAL.m

```

clear all

parametros
altura_terreno_completa

k=1;

%cálculo de celda especial 1 con sensor
i=3;
j=3;
Ha = htterr_c(i,j);
Harriba = htterr_c(i-1,j);
Habajo = htterr_c(i+1,j);
Hderecha = htterr_c(i,j-1);
Hizquierda = htterr_c(i,j+1);
H = [Ha,Harriba,Habajo,Hderecha,Hizquierda];
sim('control_seco_trigo_FINAL')

%cálculo de la vecindad 1
for i=2:5
    for j=2:5
        Ha = htterr_c(i,j);
        Harriba = htterr_c(i-1,j);
        Habajo = htterr_c(i+1,j);
        Hderecha = htterr_c(i,j-1);
        Hizquierda = htterr_c(i,j+1);

        H = [Ha,Harriba,Habajo,Hderecha,Hizquierda];

        sim('control_seco_trigo_FINAL_sinsensor')

        Sreg(k,:) = S;
        PeReg(k,:) = Pe;
        Smodreg(k,:) = Smod;
        %difereg(k,:) = diferino;
        SCreg(k,:) = SC;
        k=k+1;
    end
end

i=8;
j=18;
Ha = htterr_c(i,j);
Harriba = htterr_c(i-1,j);
Habajo = htterr_c(i+1,j);
Hderecha = htterr_c(i,j-1);
Hizquierda = htterr_c(i,j+1);
H = [Ha,Harriba,Habajo,Hderecha,Hizquierda];
sim('control_seco_trigo_FINAL')

for i=6:9
    for j=16:19
        Ha = htterr_c(i,j);
        Harriba = htterr_c(i-1,j);
        Habajo = htterr_c(i+1,j);
        Hderecha = htterr_c(i,j-1);
        Hizquierda = htterr_c(i,j+1);
    end
end

```

```
H = [Ha,Harriba,Habajo,Hderecha,Hizquierda];

sim('control_seco_trigo_FINAL_sinsensor')

Sreg(k,:) = S;
PeReg(k,:) = Pe;
Smodreg(k,:) = Smod;
%difereg(k,:) = diferino;
SCreg(k,:) = SC;
k=k+1;

end
end
```

