

# Metodologías para la monitorización de la aplicación de lodos de depuradora. Bioseguridad microbiana y modelos de flujo y transporte de contaminantes solubles

Informe 3<sup>er</sup> año



Luis Moreno Merino  
M<sup>a</sup> Emilia Jiménez Hernández  
Almudena de la Losa Román  
Silvino Castaño Castaño

Septiembre 2012



## ÍNDICE

	<b>Pág</b>
1. Introducción. Plan de trabajo y objetivos	5
2. Investigación del impacto por metales pesados y arsénico	6
2.1 Introducción y antecedentes	6
2.2 Diseño experimental	6
2.3 Resultados analíticos y discusión	7
2.4 Conclusiones	12
3. Modelo de flujo en Zona no Saturada	14
3.1 Introducción y objetivos	14
3.2 Modelo conceptual	14
3.3 Resultados del sistema de monitorización de humedad en ZNS	16
3.4 Implementación del modelo conceptual en el modelo de matemático de flujo.	20
3.4.1 Condiciones generales.	20
3.4.2 Discretización espacial	21
3.4.3 Discretización temporal	21
3.4.4 Condiciones iniciales y de la matriz sólida	21
3.4.5 Condiciones de contorno: entradas de agua al dominio	24
3.4.6 Condiciones de contorno: salidas del agua del sistema	30
3.5 Resultado final y conclusiones	39
3.6 Conclusiones del modelo de zona no saturada	44



## **1. Introducción, plan de trabajo y objetivos**

En este documento se presenta el tercer informe científico y técnico de los trabajos desarrollados por el equipo del IGME en el marco del proyecto titulado “Metodologías para la monitorización de la aplicación de lodos de depuradora Bioseguridad microbiana y modelos de flujo y transporte de contaminantes solubles” (022/PC0813-04.2).

Los trabajos presentados corresponden al desarrollo de las tareas encomendadas al IGME en el plan de trabajo general. De forma muy resumida los objetivos de estas tareas han sido:

Análisis de los procesos de lixiviación. En esta tarea se planteó como objetivo principal determinar las características hidráulicas del material no alterado en el que se van a aplicar los lodos.

Estudio del proceso de lixiviación hacia las aguas subterráneas. La parte correspondiente al IGME de esta tarea ha tenido como objetivo principal la elaboración de un modelo de flujo en zona no saturada que permita conocer la dinámica del proceso de afección a las aguas subterráneas si lo hubiere. Además se determinará la distribución de nutrientes y contaminantes en el perfil edáfico.

Análisis de los resultados obtenidos.

La primera de las tareas se encontraba finalizada al comienzo de este tercer año de trabajo de forma que se han centrado los esfuerzos en terminar la segunda y tercera tareas.

## **2. Investigación del impacto por metales pesados y arsénico**

### **2.1 Introducción y antecedentes**

Durante las primeras campañas de muestreo, se centro la atención en la dinámica de las especies mayoritarias, no obstante los análisis de los extractos acuosos de julio de 2010 alertaron de la existencia de una diferencia significativa en la concentración de arsénico entre las parcelas en las que se habían aplicado lodos y las parcelas de control (Jiménez Hernández, ME et al 2011). Así mientras en las parcelas de control la concentración de arsénico no alcanzaba el límite de detección de la técnica empleada (5 µg/l) en las parcelas con lodos aerobios se alcanzaron concentraciones que oscilaban entre 12 y 20 µ/L y en las que se aplicaron lodos anaerobios las concentraciones se situaron en torno a los 10 µ/L. Alertados por la posibilidad de que mediante la aplicación de lodos se estuviera induciendo la liberación de arsénico y puesto que los contenidos de este elemento encontrados en algunas de las parcelas experimentales del proyecto superan los límites establecidos en la legislación de aguas de consumo humano (RD 140/2003) (10 µg/l), interesaba confirmar el hallazgo y en su caso determinar si la aplicación de los lodos de depuradora puede alterar la movilidad del arsénico en el suelo de forma que migrando hasta las zonas más profundas del mismo y pudiera contaminar las aguas subterráneas y generar problemas para el consumo humano. Hay que señalar que en los lodos de depuradora aplicados no se ha detectado arsénico en su composición (límite de detección de 10 µg, técnica: ICP-AES).

Respecto al análisis de la composición de los lodos (datos de analíticas de 2010, ver informe correspondiente), los elementos más abundantes en los lodos son: Zn, Sr, Ba, Cu, Pb, Rb y Cr. Las concentraciones de Zn, Cu, Pb, Cr, Ni y Cd están por debajo del valor límite que marca la ley para la utilización de lodos de depuradora en el sector agrario (RD 1310/1990).

El objetivo de la campaña de 2011 ha sido analizar la distribución del arsénico en el perfil del suelo para confirmar lo observado en la campaña anterior y determinar si existía la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas debido a la movilización de arsénico desde el suelo. Un segundo objetivo fue determinar la existencia de otros posibles indicadores de afección en el suelo.

### **2.2 Diseño experimental**

Con el fin de confirmar lo detectado en los análisis de la campaña de julio de 2010 (3 meses después de la aplicación de los lodos), en febrero de 2011 (10 meses después de la aplicación de los lodos) se llevó a cabo un muestreo tanto en las parcelas en las que se habían aplicado lodos aerobios como en la que se habían aplicado lodos aerobio.

Con el fin de optimizar el uso de recursos analíticos el plan de muestreo se centro en dos horizontes, así de cada parcela se extrajeron tres replicas de manera aleatoria mediante excavación manual en tramos de 5 cm hasta los 20 cm de profundidad, que es la zona en la que mayor debería ser la afección de haberla. Además con objeto de comprobar si había habido algún movimiento de solutos en profundidad también se muestreo la zona de 45 a 50 cm. Las muestras se guardaron en bolsas de polietileno y se etiquetaron adecuadamente. De cada muestra se tomaron tres replicas. También se muestrearon las zonas de almacén y acopio de lodos, tanto aerobios (MAE) como anaerobios (MAN). Estas muestras se emplean para detectar posibles transformaciones de los lodos y compararlas con las de las parcelas de muestreo. En total se obtuvieron 47 muestras.

Las determinaciones analíticas realizadas han sido las siguientes:

a) pH del suelo – medido en la suspensión de suelo en agua en proporción 1:2,5.

b) Determinaciones en el extracto acuoso (relación suelo agua 1:5) – La determinación de As y de los metales Zn, Mg, Cr el extracto acuoso se realizó mediante ICP-MS (Espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo), técnica más sensible que la absorción atómica empleada en las anteriores campañas, lo cual ha permitido resolver dudas cuando las concentraciones se encontraban en el límite de detección de dicha técnica.

c) Además de los extractos se ha analizado la composición de la matriz sólida mediante Fluorescencia de Rayos X. Los elementos analizados han sido: Cd, Sn, Sb, I, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Hf, Ta, W, Ti, Pb, Bi, Th, U, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag.

## 2.3 Resultados analíticos y discusión

### a) Determinaciones en el extracto acuoso y pH del suelo

Se comentan con detalle los resultados analíticos correspondientes a los parámetros en los que se han observado diferencias significativas entre el contenido en los perfiles de control y los perfiles tomados en las parcelas tratadas (pH, As, NO<sub>3</sub>, Zn, y Cr). Para el resto de parámetros analizados no se observan diferencias significativas por la aplicación de los lodos. Los análisis completos se recogen en el anexo.

Se observa una mayor variabilidad en los valores de pH (figura 1 y 2) en los primeros 20 cm del suelo, tanto en los extractos acuosos como en las muestras de suspensión del suelo, en las muestras con lodos y en las de control. El pH del extracto acuoso los lodos anaerobios presenta valores que oscilan entre 6,5 y 6,9, los aerobios entre 6,9 y 7,1 y los de control entre 7,2 y 7,3. Esto muestra como la solución del suelo en las parcelas tratadas con lodos sufre una acidificación. A lo largo de los perfiles, el pH disminuye, alcanzando valores por debajo de 6,8 en todos los casos. En las pilas de lodo aerobio el pH es básico (7,18) mientras que el lodo anaerobio es ligeramente ácido (6,74). Estas pequeñas diferencias también repercuten en los extractos acuosos pues los anaerobios son algo más ácidos que los aerobios.

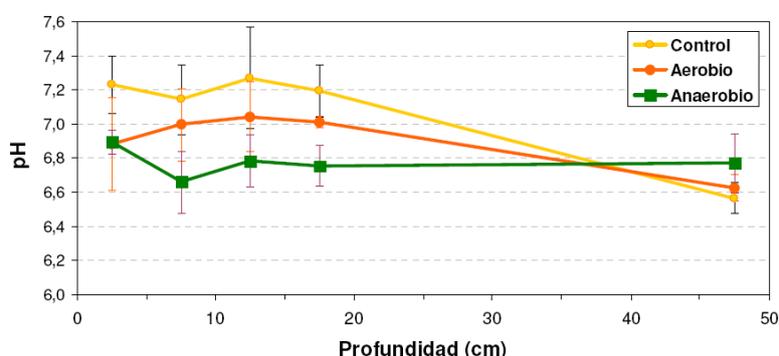


Figura 1 Distribución del pH del suelo con la profundidad.

Las muestras de la suspensión 1:2,5 presentan valores más básicos respecto al extracto acuoso, presentando los anaerobios valores entre 7,8 y 8,0, los aerobios entre 8,2 y 8,4 y los de control entre

8,4 y 8,6. Una vez más, los valores más altos (más básicos) se midieron en las parcelas de control y los más bajos (más ácidos) en los lodos anaerobios.

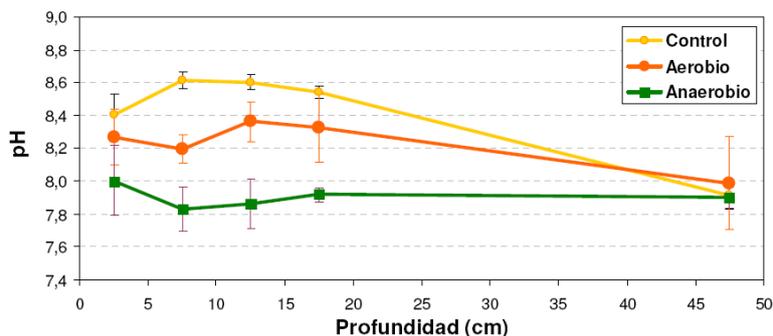


Figura 2. Distribución del pH en la suspensión del suelo 1:2,5

En el análisis del extracto acuoso se ha observado que el As está presente en todas las muestras tomadas tanto en las parcelas de control como en las tratadas con lodos (figura 3). Mientras que en las muestras de control se detecta una concentración inferior a 25  $\mu\text{g/l}$  en la capa comprendida entre 0-20 cm, en las anaerobias el valor es inferior a 15  $\mu\text{g/l}$  y en las aerobias inferior a 30  $\mu\text{g/l}$ . En general, la concentración de As en la capa superficial es mayor que en profundidad. Las concentraciones de As en las muestras de la campaña de febrero 2011 eran mayores que las de julio 2010 (en la cual la concentración en las parcelas de lodos aerobios era inferior a 20  $\mu\text{g/l}$ , en la de lodos anaerobios inferior a 12  $\mu\text{g/l}$  y en las parcelas de control igual a cero). Entre 20-50 cm de profundidad la concentración de este elemento disminuye, alcanzando en las muestras de control y en las aerobias valores inferiores a 25  $\mu\text{g/l}$  y en las anaerobias inferiores a 15  $\mu\text{g/l}$ .

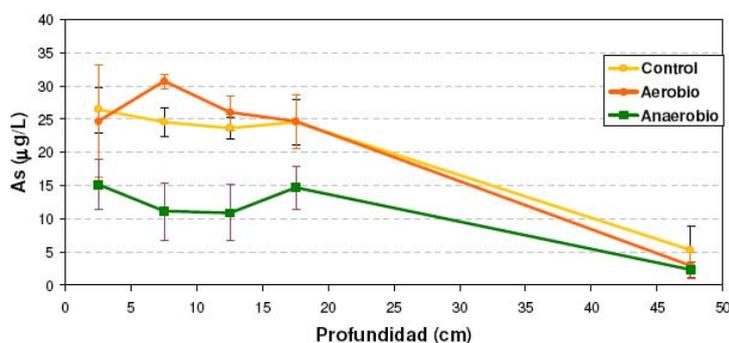


Figura 3. Distribución del contenido en Arsénico con la profundidad

La concentración de  $\text{NO}_3$  presenta una diferencia significativa entre las parcelas tratadas con lodos y las de control (figura 4). Respecto a la campaña anterior (julio de 2010), se observa que el  $\text{NO}_3$  se ha movilizado a lo largo del perfil, encontrándose a una profundidad de 45-50 cm, habiendo descendido 25 cm en siete meses. Entre 0-5 cm su concentración es de 100 mg/l en las parcelas con los lodos aerobios y de sólo 5 mg/l en las parcelas con lodos anaerobios, mientras que en las parcelas de control no se detecta. Las mayores concentraciones de nitrato se encuentran en profundidad, presentando valores de 80 mg/l en las parcelas aerobias y de 120 mg/l en las anaerobias. Esto nos indica que la aplicación de los lodos incrementa notablemente la concentración de  $\text{NO}_3$  en el perfil del suelo. Se observa además que en las pilas de acopio de lodos hay notables diferencias en la concentración de  $\text{NO}_3$  entre los lodos aerobios (22 mg/l) y los anaerobios (2,93 mg/l).

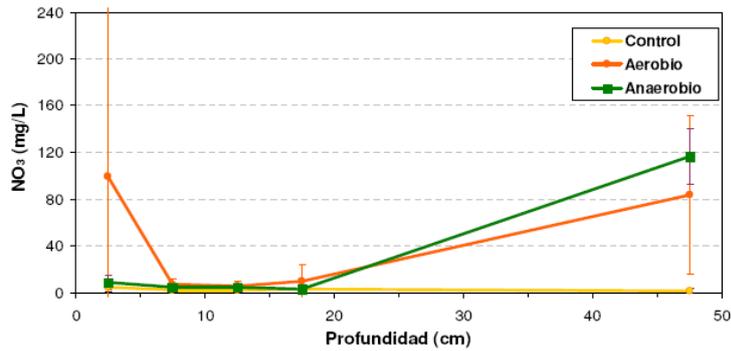


Figura 4. Distribución del contenido en nitrato con la profundidad

Respecto al Zn, las mayores concentraciones se alcanzan en la capa más superficial del suelo (0-10 cm) siendo más altas en los suelos con lodos aerobios (30 mg/l) que en los anaerobios (24 mg/l). Las parcelas de control muestran valores entre 25 y 19 mg/l. En profundidad (20-50 cm), la concentración disminuye tanto en las parcelas con lodos (5 mg/l, en los anaerobios y < 23 mg/l en los aerobios) como en las de control (<17 mg/l) (figura 5).

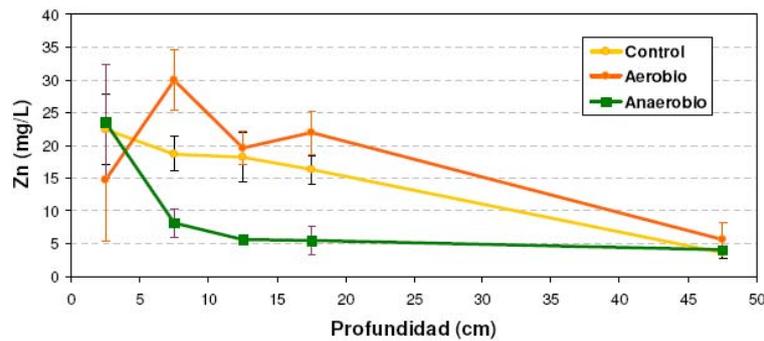


Figura 5 Distribución del contenido en Zinc con la profundidad

El Cr muestra concentraciones muy bajas y no presenta diferencias significativas entre las parcelas de control y aquellas en las que se han aplicado lodos. Su concentración en las muestras aerobias y anaerobias es inferior a 0,8 µg/l, mientras que en las de control presenta valores inferiores a 1 µg/l (figura 6).

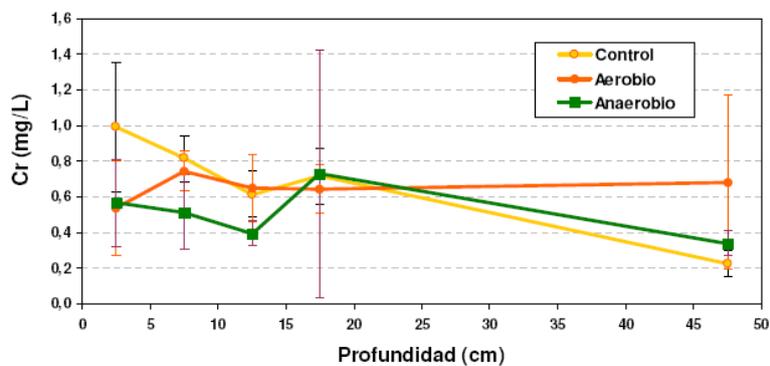
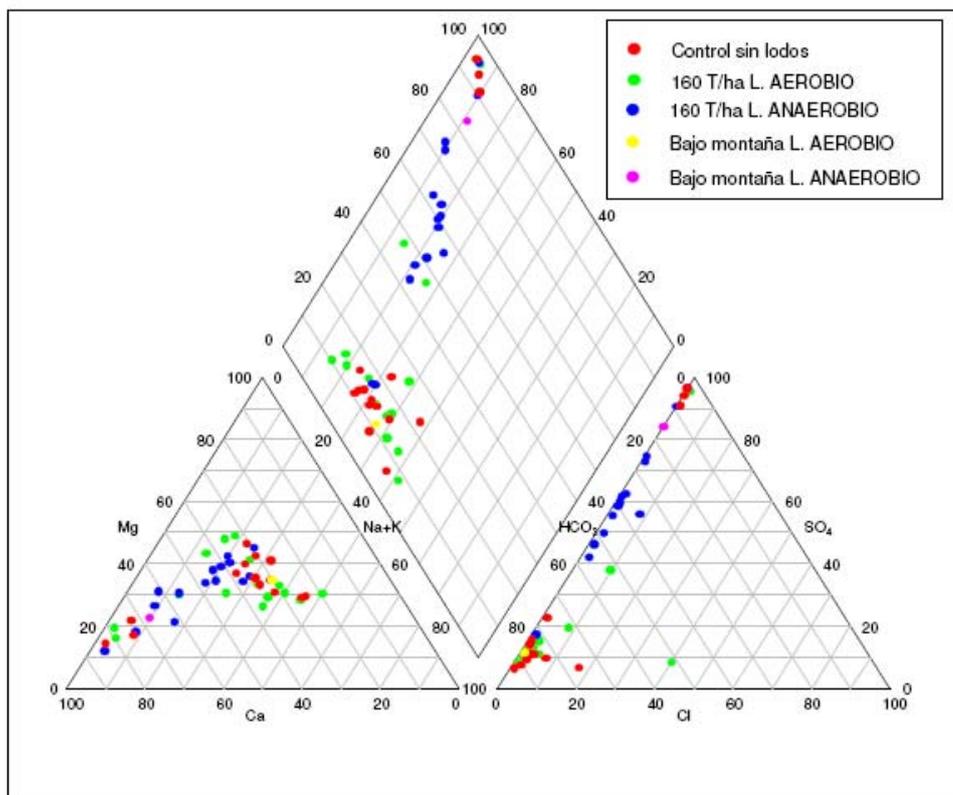


Figura 6. Distribución del contenido en Cromo con la profundidad

El diagrama de Piper de la figura 7 muestra las fácies hidroquímicas de los extractos acuosos. Las muestras procedentes de las parcelas con lodos aerobios y las parcelas de control muestran fácies bicarbonatadas cálcico magnésicas o magnésico cálcicas, aunque en las más profundas (entre 45-50 cm) pasan a sulfatadas cálcicas. Las muestras con lodo anaerobio presentan principalmente fácies sulfatadas cálcicas, si bien las de la capa superficial presentan fácies bicarbonatadas cálcico magnésicas o magnésico cálcicas. La aplicación del lodo y la generación de CO<sub>2</sub> a él asociado podría modificar las fácies intermedias de tipo sulfatadas-bicarbonatadas o bicarbonatadas-sulfatadas hacia fácies netamente bicarbonatadas.



*Figura 7. Fácies característica de los extractos acuosos*

#### **b) Determinaciones en la matriz sólida**

Se muestran los resultados obtenidos para el contenido en As y se describen además los resultados obtenidos para los elementos más abundantes en los lodos de depuradora (Zn, Sr, Ba, Cu, Pb, Rb y Cr), entre ellos interesan especialmente Zn, Cu, Pb y Cr, ya que sus concentraciones están limitadas en la legislación (RD 1310/1990).

El contenido de As en la matriz sólida es muy similar en todas las parcelas y a todas las profundidades (figura 8). En la capa más superficial (0-20 cm) la concentración es de 15 µg/g en las parcelas anaerobias, varía entre 13 y 17 µg/g en las aerobias y entre 19 y 14 µg/g en las de control. A partir de los 20 cm de profundidad en la parcela de control la concentración de As es inferior que en las parcelas tratadas. No obstante, dada la notable dispersión en las concentraciones observadas las diferencias no son estadísticamente significativas.

En la figura 9 se muestra el perfil del Cr, donde se aprecia que no existen variaciones significativas en profundidad entre las muestras de suelo tratadas con lodos y la de control. La concentración en los tres tipos de muestras se mantiene igual tanto en la capa superficial (40  $\mu\text{g/g}$ ) como en profundidad, aunque las muestras anaerobias presentan un valor ligeramente mayor (45  $\mu\text{g/g}$ ).

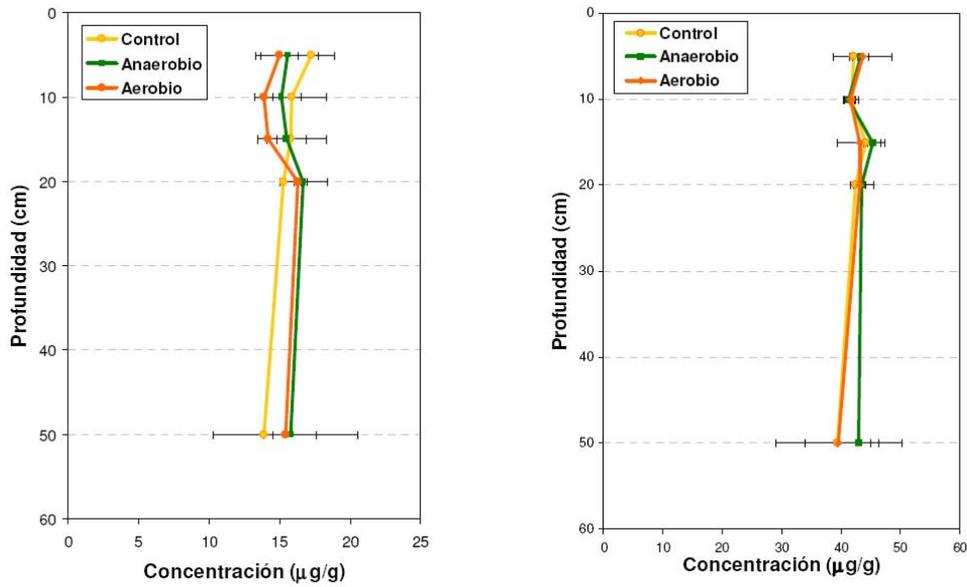


Figura 8. Perfiles de arsénico y cromo en el suelo

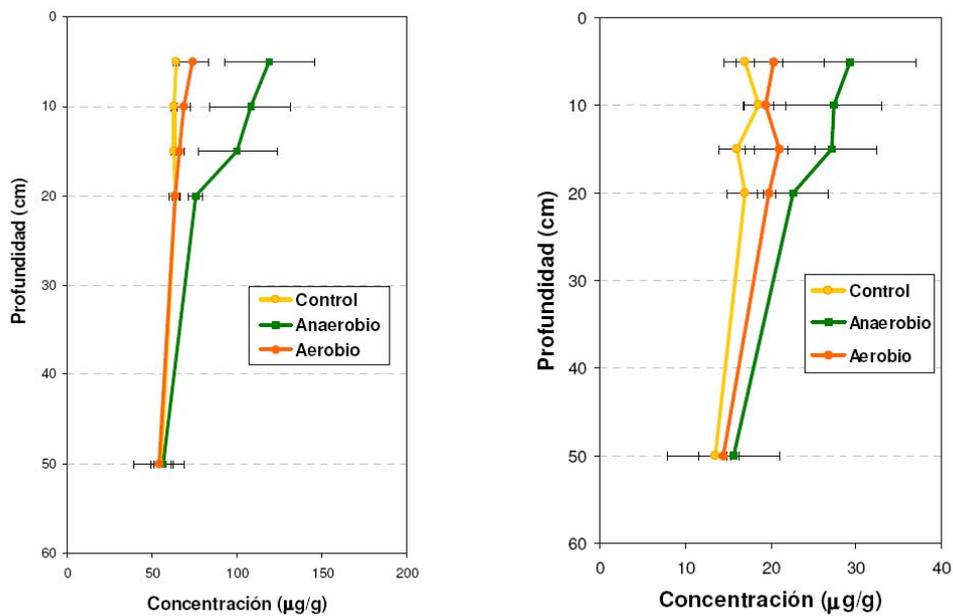


Figura 9. Perfiles de Zinc y cobre en el suelo

El comportamiento del Zn y del Cu figura 9 es similar, se observa mayor concentración y dispersión en las concentraciones de los horizontes superficiales (entre 0 y 20 cm), mientras que en profundidad (20-50 cm) se hacen prácticamente iguales a la concentración en la parcela de control,

independientemente del tipo de tratamiento (entre 12 y 16  $\mu\text{g/g}$  en Cu y 60  $\mu\text{g/g}$  en Zn). Para ambos metales se observa mayor concentración en las parcelas tratadas con lodos anaerobios que en las tratadas con lodos aerobios.

En cuanto al Pb, las diferencias entre los distintos tipos de muestras son muy pequeñas, si bien en la capa superficial (0-15 cm) la concentración es ligeramente superior en el lodo anaerobio que en el aerobio, presentando el primero un valor de 35  $\mu\text{g/g}$  y el segundo de 30  $\mu\text{g/g}$ . En profundidad (20-50 cm), la concentración se mantiene alrededor de 30  $\mu\text{g/g}$  en los tres tipos de muestras (Figura 10).

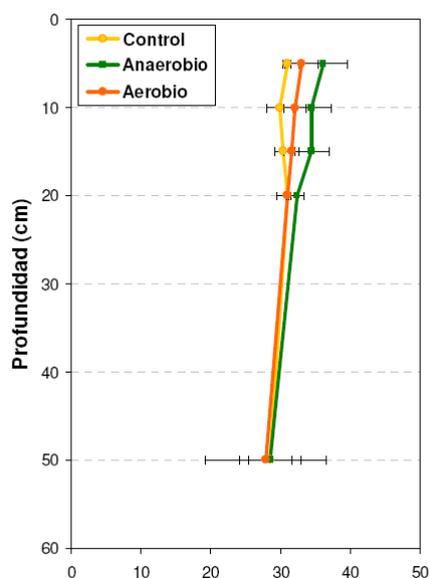


Figura 10. Perfiles de plomo en el suelo

No se aprecian diferencias significativas en Sr, Ba, y Rb debido a que el nivel de fondo en estos elementos en las parcelas de control es muy elevado.

Por último, se ha observado un incremento entre el 10 y el 25% en la concentración de Br, Sn, Ni, Cs y Co en las parcelas en las que se ha aplicado lodo respecto a las de control. Sin embargo, al encontrarse concentraciones muy próximas al límite de detección, los errores pueden ser altos y, por tanto, estas diferencias pueden no ser significativas.

## 2.4 Conclusiones

El análisis de la matriz sólida y de los extractos acuosos de febrero de 2011 muestra que el As está presente en concentraciones apreciables en la capa superficial (entre 13 y 19  $\mu\text{g/g}$  en la matriz sólida y entre 15 y 30  $\mu\text{g/l}$  en los extractos acuosos) en todas las parcelas experimentales, tanto en las que se aplicó lodo como en las de control. El límite de As en las aguas de consumo humano (RD 140/2003) es de 10  $\mu\text{g/l}$ , por lo que en todos los casos excede las concentraciones admisible. No se aprecian diferencias significativas en el contenido de As entre las distintas parcelas. Se descarta pues que la presencia de As se deba a la aplicación de lodos, o que dicha aplicación favorezca la liberación de arsénico de la matriz sólida.

La composición química de los extractos del suelo y de la propia matriz sólida presenta una gran variabilidad espacial debido a una distribución no homogénea del lodo aplicado sobre la superficie del

suelo, haciendo más compleja la evaluación de diferencias significativas en los parámetros analizados.

En la campaña de julio de 2010, se observó que el pH podría ser un posible indicador de afección del suelo porque parecía que la aplicación de lodos acidificaba el medio. Sin embargo, los valores de pH medidos en febrero 2011 están comprendidos en el intervalo entre 6,5 y 7,4, sin detectarse diferencias significativas entre las parcelas. El pH del suelo es un parámetro sensible a la temperatura y varía en las diferentes épocas del año, por ello los resultados de esta segunda campaña son más fiables, al haberse recogido todas las muestras en la misma fecha y ser analizadas simultáneamente. Estos valores de pH no son lo suficientemente ácidos para inducir la movilización de los metales hacia la fase acuosa, esto contribuye a que las concentraciones de metales disueltos se mantengan muy bajas.

La aplicación de lodos influye claramente en la concentración de nitrato. Se ha observado, además, que entre las dos últimas campañas (julio de 2010 y febrero de 2011) se ha movilizado, llegando a una profundidad de 50 cm. En julio de 2010 la mayor concentración de  $\text{NO}_3$  se encontraba en la capa superficial del suelo (0-20 cm), siendo en los lodos aerobios inferior a 250 mg/l y en los anaerobios inferior a 216 mg/l. En febrero de 2011, la mayor concentración se encuentra entre los 45- 50 cm, tanto en las parcelas aerobias como en las anaerobias, presentando en las primeras un valor de 80 mg/l y en las segundas de 120 mg/l. Los criterios sanitarios de calidad de aguas para el consumo humano admiten concentraciones de 50 mg/l como valor límite, por lo cual la aplicación de lodos genera un riesgo efectivo de contaminación de las aguas subterráneas al alcanzarse concentraciones elevadas fuera de la zona de extracción radicular y fuera de la zona de máxima actividad bacteriana.

### **3. Modelo de flujo en Zona no Saturada**

#### **3.1 Introducción y objetivos**

El impacto sobre el medio ambiente y sobre la calidad del agua que puede tener la aplicación de lodos de depuradora en el suelo depende directamente de su movilidad. Si el lodo y los productos liberados a lo largo del proceso de degradación biológica de los mismos no son transportados por el agua hasta el nivel freático, el impacto, si existe, será estrictamente puntual y limitado al suelo afectado. Si existe percolación de agua mas allá de la zona de raíces, el impacto será local o regional dependiendo de las características del lodo, de su composición, de las dosis aplicadas y de las características hidráulicas del acuífero y de la zona no saturada.

En cualquier caso, para que los posibles contaminantes puedan moverse a lo largo del suelo, la zona no saturada y llegar al acuífero es necesario que sean transportados por el agua. Si no hay flujo de agua, no hay transporte ni afección acuífero.

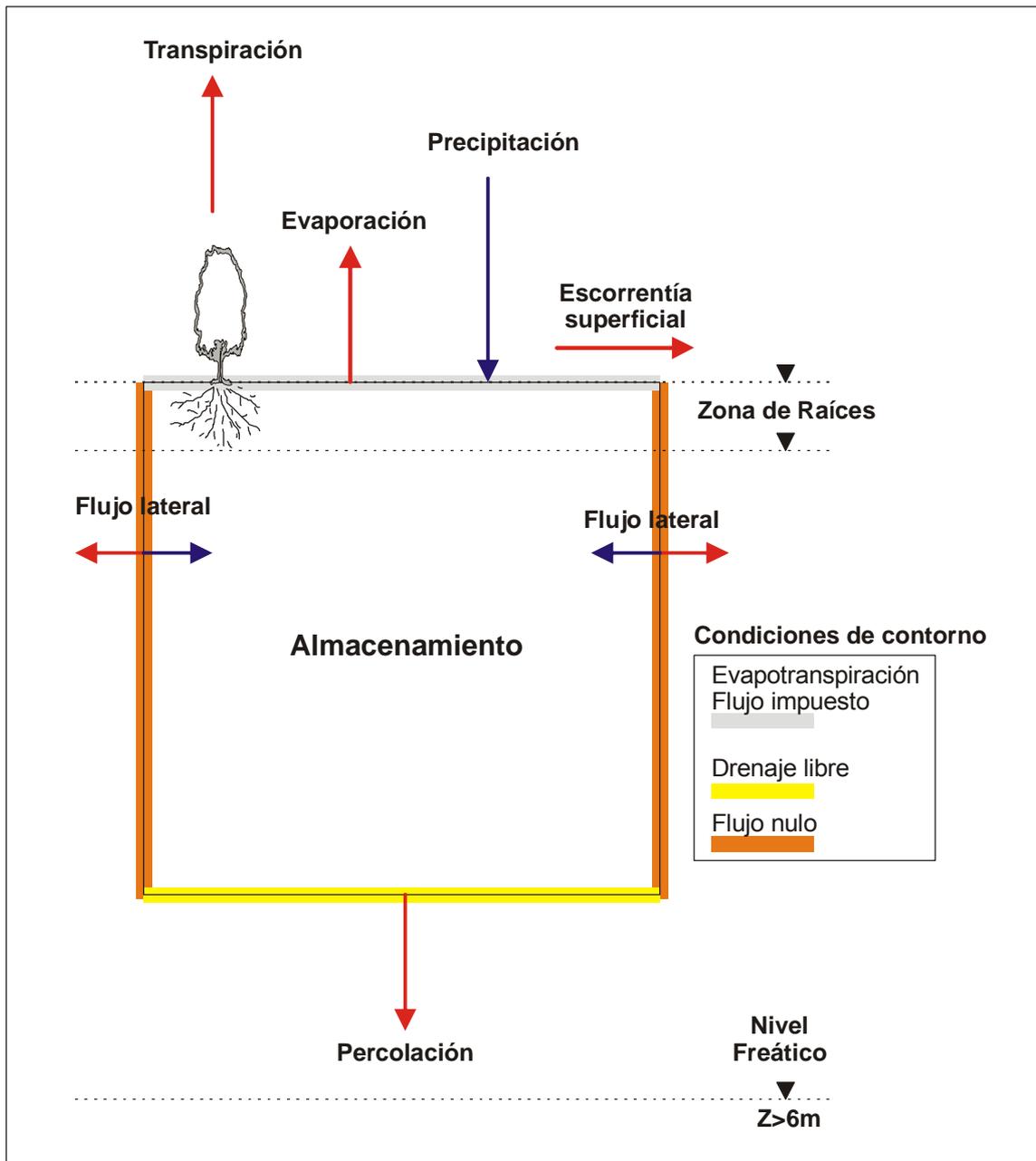
En sistemas en régimen natural, es decir sin aporte de agua de forma artificial mediante riego, sobre todo bajo climas áridos o semiáridos de carácter mediterráneo, es muy difícil prever la velocidad del agua al atravesar la zona no saturada y la cantidad que finalmente llegará al acuífero. Esta depende de un clima que impone patrones de lluvia muy variable según nos encontramos en un ciclo húmedo o seco. La mejor forma de intentar abordar este problema es mediante la construcción de un modelo matemático de flujo en zona no saturada que tenga en consideración todas las variables que entran en juego y permita hacer hipótesis en diversos escenarios climáticos, de cubierta vegetal y de vertido.

En este apartado se presentan los resultados de la construcción de un modelo de flujo que permite conocer la velocidad de flujo y el balance hídrico a lo largo del periodo de aplicación de los lodos en las parcelas experimentales, y prever su evolución en sucesivos años o ante nuevos escenarios climáticos.

El modelo se ha implementado mediante el software libre VS2DTI versión 1.2 del U.S. Geological Survey. La calibración se ha realizado mediante los datos obtenidos en un sistema de monitorización de la humedad del suelo que se describe en el apartado 3.3. Los parámetros estimados se han resuelto mediante el programa Rosetta Versión 1.2 del U.S. Salinity Laboratory ARS-USDA.

#### **3.2 Modelo conceptual**

Dada la naturaleza del sistema a modelizar el modelo conceptual se basa en un esquema unidimensional de balance de agua en el suelo, considerando que toda el agua que es capaz de sobrepasar la zona de raíces puede ser considerada como recarga en tránsito. En la figura 11 se muestra un esquema del modelo propuesto.



*Figura 11. Modelo conceptual del modelo de flujo en las parcelas experimentales de aplicación de lodos.*

Como se puede ver en la figura el modelo se plantea desde una doble perspectiva: velocidad de flujo y balance de masas. Los parámetros clave que definen el modelo son:

- a) El dominio físico, que abarca desde la superficie del terreno hasta una posición dentro de la zona no saturada suficientemente alejada de la superficie para no tener influencia sobre el balance de masas ni sobre el sensor situado a cota mas profunda. De forma arbitraria se ha considerado la extensión vertical del dominio del modelo en 2 metros. Esta extensión asegura que todo el agua que atraviesa su base pueda llegar a la zona saturada pues está muy alejada de la zona en la que puede existir evapotranspiración.

b) Los componentes del balance de masas. Se han considerado como componentes del balance:

b1) La precipitación

b2) La transpiración por la vegetación y la evaporación directa desde la superficie del terreno

b3) El almacenamiento en la porosidad del suelo.

b4) La percolación fuera del dominio y que por tanto contribuirá a la recarga del acuífero. La percolación será el volumen efectivo de agua que puede llegar a transportar contaminantes fuera del dominio simulado.

c) Las condiciones de contorno que definen la relación del dominio del modelo con el entorno físico próximo y lejano. Se han definido tres condiciones de contorno:

c1) La condición superior, en la que se permite la entrada de agua de lluvia y la salida por evapotranspiración, está estará limitada únicamente por las condiciones climáticas y de desarrollo de la vegetación.

c2) La condición de contorno lateral seleccionada ha sido flujo nulo, pues se simula la evolución de un perfil de muy pequeña extensión en comparación con la extensión del medio real. Hay que tener en consideración que desde la perspectiva del modelo la condición de contorno superior se extienden hasta el infinito y por tanto a través de los contornos laterales no existe flujo.

c3) Condición de la base (botton) del dominio. La base se considera una superficie de drenaje que el agua atraviesa libremente en función del balance de potenciales. La posición del nivel freático, siempre a una distancia mayor de 5 metros de la base del dominio asegura que no exista influencia de la zona capilar sobre esta como condición de contorno.

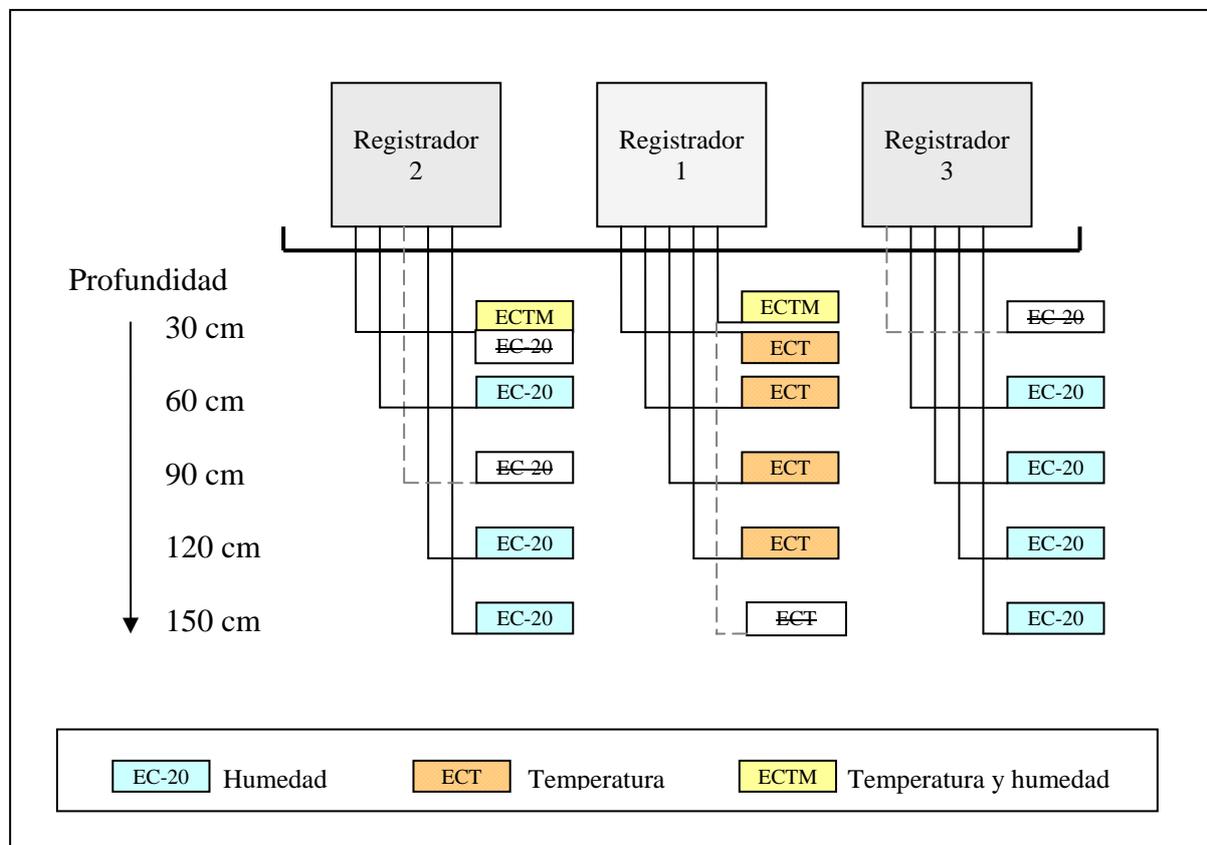
Es importante señalar que aunque estrictamente se trata de uno modelo unidimensional se ha implementado a través de un esquema bidimensional con una discretización espacial en el plano transversal relativamente fina, esto se ha hecho con el fin de permitir en el futuro la simulación de escenarios mas complejos sin necesidad de modificar sustancialmente las características del modelo.

### **3.3 Resultados del sistema de monitorización de humedad en ZNS**

Como cualquier modelo de simulación son necesarios datos físicos objetivos que permitan su calibración, en este caso hemos elegido como elemento de calibración la evolución de la humedad del suelo medida en un perfil tipo. Para ello entre febrero de 2010 y noviembre de 2011 se ha mantenido un sistema de sensores de humedad conectados un registrador en continuo.

El perfil tipo consiste en cinco sensores situados a profundidades de 30, 60, 90, 120 y 150 cm medidas desde la superficie del terreno en el momento de la instalación. Además se han situado sensores de temperatura como apoyo y control.

La configuración inicial de la instalación en campo (12/02/2010) fue: 3 registradores, cada uno de ellos con 5 sensores instalados en un perfil del suelo a las diferentes profundidades. Con objeto de evitar pérdida de información en caso de fallo del equipo los sensores de humedad se instalaron por duplicado. En la figura 12 se muestra un esquema con la disposición física de los sensores.



*Figura 12. Situación de los sensores de humedad y temperatura.*

Como se puede observar en el registrador 1 se instalaron los sensores tipo ECT (temperatura) y en el registrador 2 y 3 los sensores tipo EC-20 (humedad).

A lo largo del periodo de monitorización se observó el fallo de alguno de los sensores, por ello fue necesario modificar la configuración inicial. En concreto el 15/09/2010 fallaron dos EC-20 a 30 cm, un EC-20 a 90 cm y un ECT a 150 cm que fueron sustituidos por sensores ECTM con capacidad de registrar de forma simultánea humedad y temperatura. Durante 2011 continuaron los registros de datos. La descarga de los registros completos y desinstalación de los registradores de datos tuvo lugar el día 23/11/2011

En las figuras 13, 14 y 15 se muestran los registros obtenidos de la descarga de los sensores.

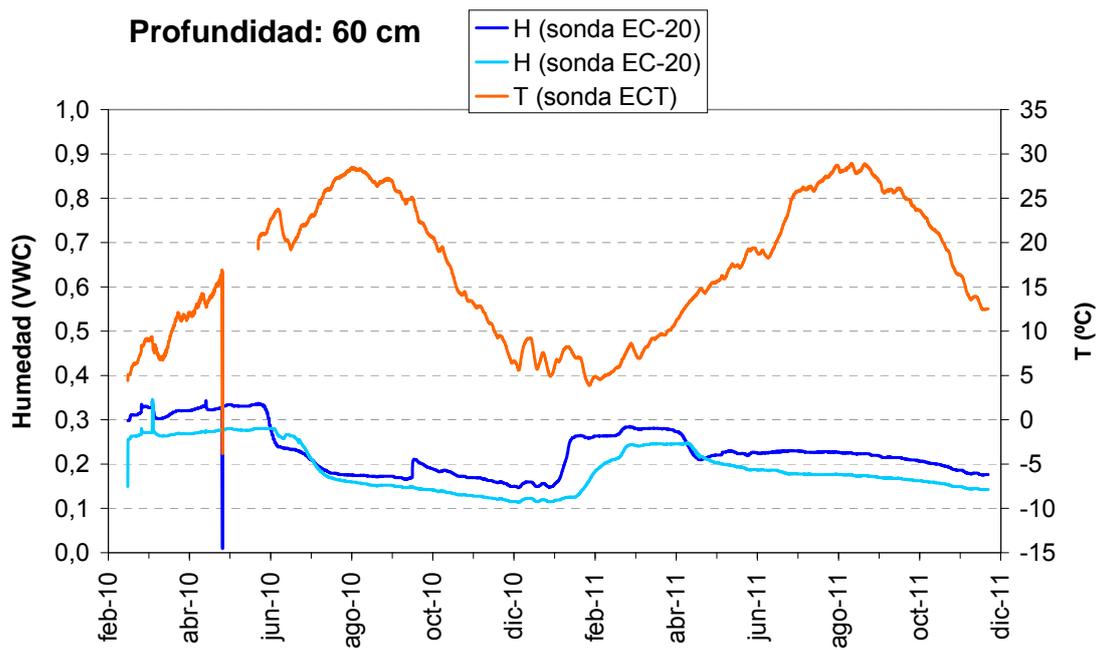
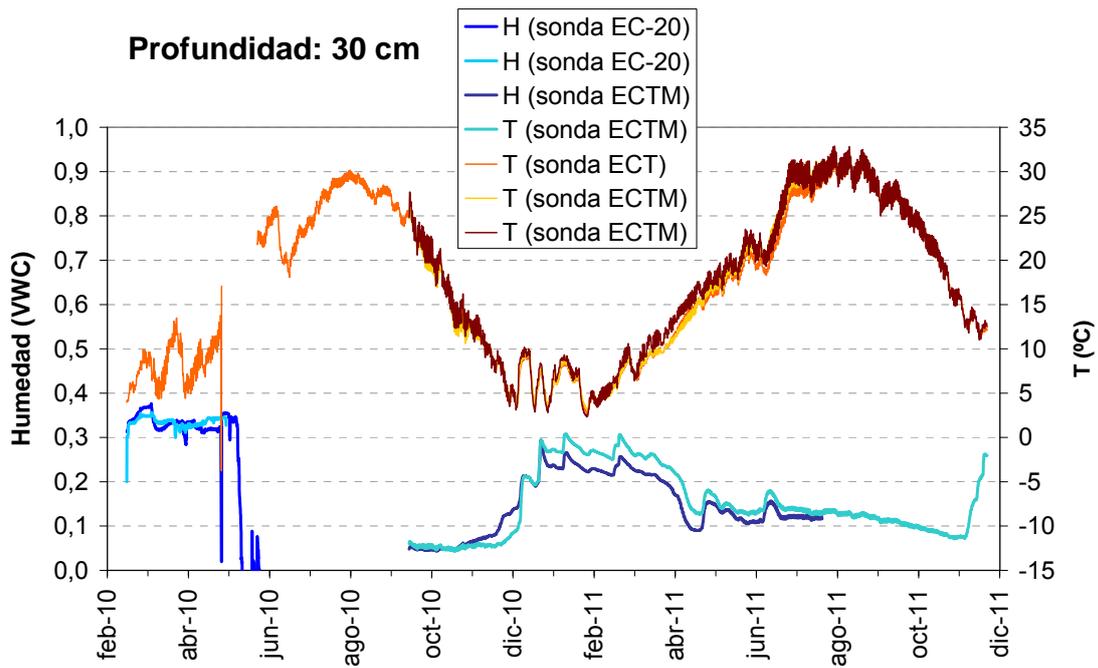


Figura 13. Datos RAW de descarga de los sensores de H y T<sup>a</sup>.

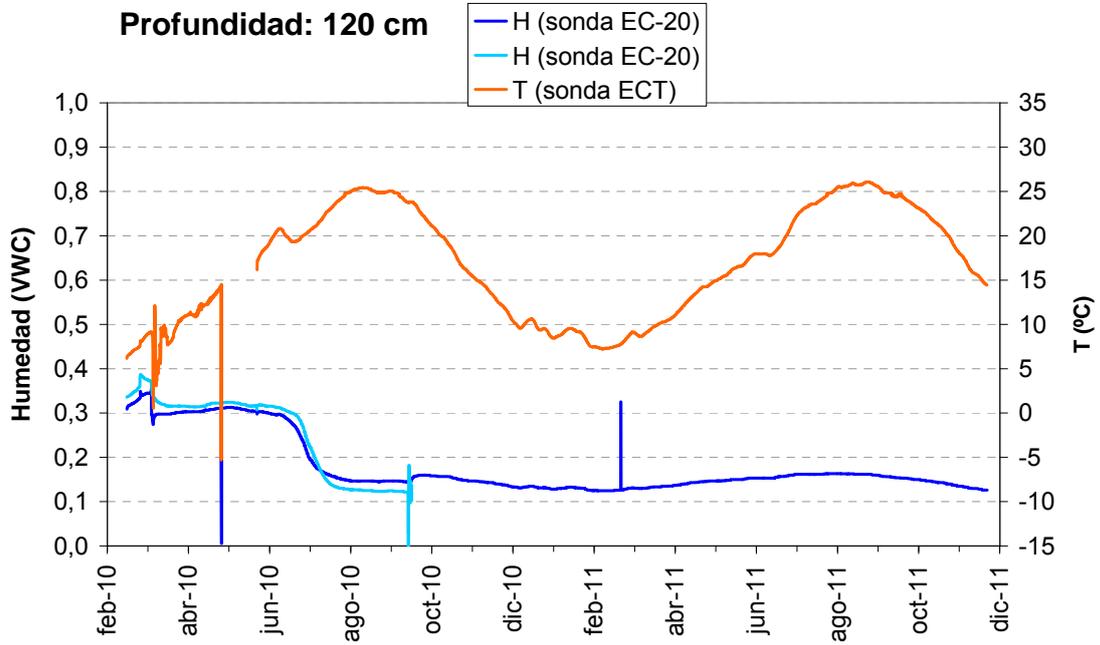
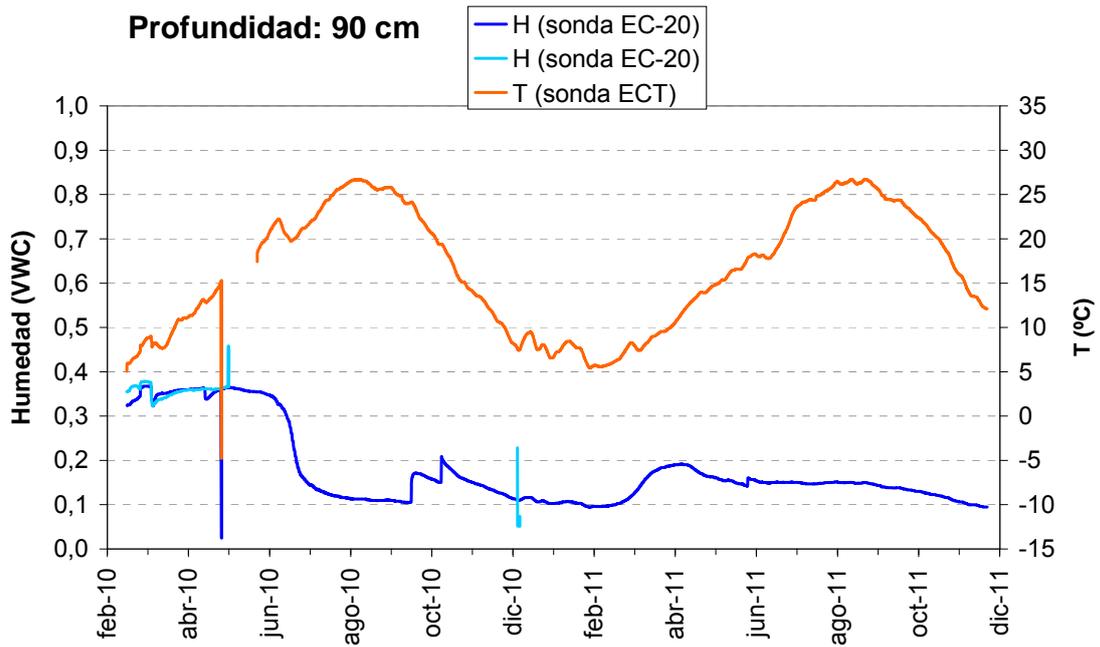
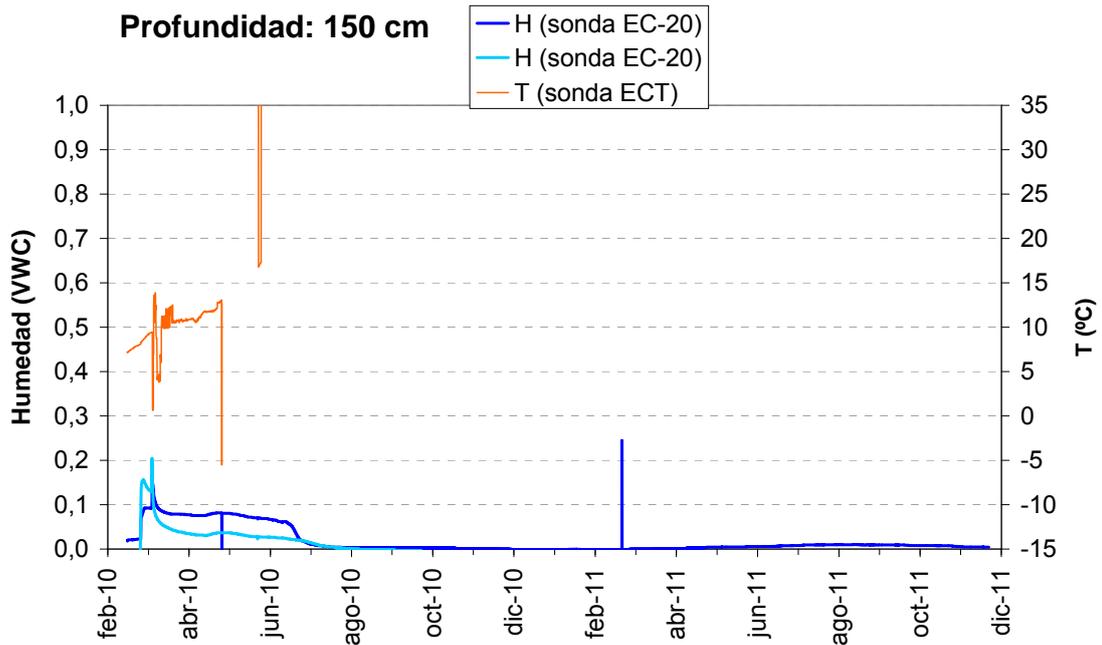


Figura 14. Datos RAW de descarga de los sensores de H y T<sup>a</sup>.



*Figura 15. Datos RAW de descarga de los sensores de H y T<sup>a</sup>.*

En las figuras con los resultados de las descarga de los sensores se pueden observar algunos artefactos seguramente debidos a la presencia de ruido eléctrico, hay que tener en cuenta la proximidad de las vías del tren, estos picos espúreos se han filtrado para poder tratar los datos.

### 3.4 Implementación del modelo conceptual en el modelo de matemático de flujo.

Para la implementación práctica del modelo de flujo se ha seleccionado el código VS2DTI. Este código permite el empleo de la ecuación de van Genuchten para simular la relación entre el contenido en agua del suelo y su potencial. Se ha seleccionado el modelo de van Genuchten porque es capaz de de describir la curva de retención en un margen muy amplio de situaciones, incluyendo suelos alterados.

#### 3.4.1 Condiciones generales.

Las opciones generales del modelo han sido:

- a) Unidades de longitud: centímetros. Unidad de tiempo: día.
- b) Condiciones iniciales impuestas = contenido en humedad, en el apartado 3.4.4 se detalla como se ha determinado la humedad inicial.
- c) Cálculo de la conductividad hidráulica intercelda mediante la media aritmética.
- d) Las opciones de cálculo y convergencia se han dejado en los valores por defecto:

Factor de relajación	0,7
Mínimo número de interacciones por paso de tiempo	2
Máximo número de interacciones por paso de tiempo	1000
Máximo número de pasos de tiempo	1000
Criterio de cierre para el potencial	0,0010

### **3.4.2 Discretización espacial**

La extensión del dominio simulado ha sido de 150x200 cm. El dominio se ha discretizado siguiendo un mallado uniforme mediante una matriz de 5 columnas x 40 filas, por tanto la resolución vertical obtenida es de 5 cm que coincide con la resolución máxima con la que se han muestreado el suelo para su caracterización física y química.

En base a la caracterización física de la matriz sólida (ver apartado 3.4.4), el dominio se ha dividido verticalmente en 6 horizontes homogéneos de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-145 y 145-200 cm

### **3.4.3 Discretización temporal**

Se ha establecido como periodo temporal mínimo el día. Se han simulado dos periodos de tiempo. El primero o de estabilización, se extiende desde abril de 2009 hasta octubre de 2010. Este primer periodo de 18 meses de duración se ha empleado para determinar las condiciones iniciales del periodo siguiente, el de simulación y permitir la estabilización de los sensores.

El periodo de simulación ha servido para determinar las características del medio calibrando con los sensores de humedad. Se extiende desde octubre de 2010 hasta octubre de 2011, abarcando un año hidrológico completo.

Como se verá en el apartado de interpretación de resultados, los tres primeros meses del periodo de simulación se han considerado como de estabilización pues el fallo en los dos dispositivos EC-20 instalados a 30 cm de profundidad obligó a sustituirlos.

Sobre la discretización temporal de 1 día que impone el periodo mínimo de simulación se ha superpuesto una discretización en periodos de tres meses a efectos de cuantificar los valores de evaporación y transpiración.

### **3.4.4 Condiciones iniciales y de la matriz sólida**

#### **a) Características de la matriz sólida:**

En el perfil vertical se han definido 6 horizontes atendiendo a los cambios observados las determinaciones experimentales de textura, densidad aparente, conductividad hidráulica saturada y humedades características de las curvas pF (tabla 1).

Cada uno de estos horizontes se corresponde con una clase textural que ha de ser definida como entrada en el modelo VS2DTI. Las clases texturales son las que establecen las propiedades físicas que determinan el flujo no saturado en cada horizonte. Así para cada clase es necesario conocer cuatro parámetros generales:

Kzz/Khh: Relación de la conductividad hidráulica saturada en el eje vertical (z) con relación al eje horizontal. Es una medida de la anisotropía del sistema. En nuestro modelo hemos considerado este valor como 1 en todos los casos. No se han observado factores de anisotropía debidos a condiciones de sedimentación y la anisotropía generada por procesos de bioturbación eran evidentes.

Khh: [L]/[T]. Conductividad hidráulica saturada en la dirección vertical.

Almacenamiento específico ( $S_s$ )  $1/[L]$ . Es el almacenamiento en la matriz sólida debido a la compresión del medio cuando se encuentra saturado y en carga. Como el modelo se desarrolla estrictamente en zona no saturada, siempre toma el valor de  $S_s = 0$ .

Porosidad. Definida como el volumen de poros por unidad de de volumen de material.

Tabla 1. Discretización espacial y caracterización de la matriz sólida.

Zona	Prof. (cm)	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Textura			Humedad volumétrica			Ks (cm/d)		
			Clase (ISSS)	% Arena	% Limo	% Arcilla	Sat.	33 KPa (pF = 2,5)	1500 KPa (pF = 4,2)	(lab.)	(campo)
1	0 - 10	1,01	Arcillosa gruesa	41	30	29	0,5	0,25	0,100	223 ± 64	32 ± 13
2	10 - 20	1,31					0,51	0,32	0,129	29 ± 9	
3	20 - 29	1,41					0,43	0,31	0,133	7 ± 1	19 ± 9
4	29 - 40	1,41	Franco arcillosa- arenosa	62	17	21	sin dato	sin dato	sin dato	sin dato	
5	40 - 145	1,33					sin dato	sin dato	sin dato	sin dato	7,4 (40 cm) 99,5 (75 cm)
6	145 - 200	1,49	Arenosa	90	0,6	9,4	sin dato	sin dato	sin dato	sin dato	218

Además de estos cuatro parámetros generales, son necesarios otros tres parámetros característicos del modelo de van Genuchten ( $\alpha$ ,  $\beta$  y RMC). Para su estimación se ha utilizado la aplicación Rosetta, seleccionando el modelo adecuado a los datos experimentales disponibles: modelo SSCBDTH331500 para las capas 1-3 y modelo SSCBD para las capas 4-6. El modelo SSCBD requiere como datos de entrada los porcentajes de arena, limo y arcilla (SSC: sand, silt, clay) y la densidad aparente (BD: bulk density). El modelo SSCBDTH331500 requiere introducir, además de los datos anteriores valores para SSC y BD, los contenidos de humedad en dos puntos pF de la curva experimental de retención hídrica: a 33 kPa (TH33) y a 1500 kPa (TH1500). Rosetta, además de estimar los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y RMC de van Genuchten, también calcula el valor otros parámetros de interés como son la humedad de saturación ( $\Theta_s$ ) y conductividad hidráulica saturada (Ks) y su incertidumbre (ver tabla 2)

Tabla 2. Estimación de parámetros de van Genuchten y de los parámetros  $\Theta_s$  y Ks mediante Rosetta para los seis horizontes del perfil:

Zona	Modelo de Rosetta	RMC (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$\beta$	$\Theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Ks (cm/d)	Intervalo de confianza de Ks
1	SSCBDTH331500	0,039	0,0247	1,324	0,52	77	26 - 231
2	SSCBDTH331500	0,053	0,0054	1,500	0,44	19	10 - 34
3	SSCBDTH331500	0,053	0,0058	1,470	0,42	12	8 - 21
4	SSCBD	0,064	0,0215	1,424	0,43	36	28 - 46
5	SSCBD	0,066	0,0208	1,434	0,45	52	38 - 68
6	SSCBD	0,061	0,0278	2,387	0,40	289	236 - 354

En cuanto al resto de propiedades se han proporcionado valores de la siguiente manera:

**Khh saturada:** [L]/[T]. Conductividad hidráulica saturada en la dirección horizontal (x o r). Como entrada al modelo se han empleado tanto datos de medidas experimentales en campo (infiltrometría de anillo simple mediante el método de Wu) y laboratorio (infiltrómetro de anillo Eijelkaamp) contrastándose con las estimaciones de Rosetta. No obstante el modelo se ha mostrado poco sensible a este parámetro pues al variar Ks dentro del del intervalo de confianza de los datos de Rosseta los resultados obtenidos han sido muy similares.

**Porosidad:** Definida como el volumen de poros en el volumen total de suelo o medio poroso. Las capas 1 a 3 se han calculado a partir del contenido de humedad de saturación experimental, se ha observado además un buen acuerdo con las estimaciones de Rosetta ( $\Theta_s$ ). Cuando no hay dato experimental, capas 4 a 6, el valor se ha obtenido por comparación de los datos de densidad aparente disponibles, en este caso también existe una buena concordancia con las estimaciones de Rosetta ( $\Theta_s$ ).

*Tabla 3. Datos de entrada de parámetros hidráulicos en condiciones saturada y no saturadas.*

Zona	Kzz/Khh	Sat Khh	Ss	Porosidad	RMC	alpha	beta
1	1,0	32 (dato campo)	0,0	0,55	0,039	0,0247	1,324
2	1,0	29 (dato lab)	0,0	0,48	0,053	0,0054	1,500
3	1,0	12 (lab y campo)	0,0	0,43	0,053	0,0058	1,470
4	1,0	36 (Rosetta)	0,0	0,43	0,064	0,0215	1,424
5	1,0	50 (Rosetta)	0,0	0,48	0,066	0,0208	1,434
6	1,0	218 (campo)	0,0	0,37	0,061	0,0278	2,387

#### Establecimiento de las condiciones iniciales

Como condición inicial hidráulica del periodo de simulación se ha establecido un contenido en humedad impuesto. A falta de una medida de humedad inicial se ha optado por establecer una primera simulación de estabilización del sistema que ha comprendido el periodo que va desde abril de 2009 hasta octubre de 2010. Como punto de partida para esta simulación se han introducido los datos experimentales correspondientes al mes de abril de 2010 que sirvieron para la calibración de los sensores (determinación gravimétrica en laboratorio de muestras extraídas cada 5 cm en un perfil de 0 a 200 cm).

*Tabla 4. Humedades iniciales en los dos periodos simulados:*

Abril, 2009		Octubre, 2010	
Profundidad (cm)	Humedad (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Profundidad (cm)	Humedad (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )*
0 - 70	0,30	0 - 40	0,117 (P); 0,170 (T)
		40 - 70	0,206 (P); 0,239 (T)
70 - 145	0,20	70 - 100	0,232 (P); 0,264 (T)
		100 - 145	0,248 (P); 0,284 (T)
145 - 200	0,10	145 - 200	0,083 (P); 0,102 (T)

\*Se han empleado y contrastado dos métodos de estimación de la evapotranspiración potencial (ver apartado 3.4.6) que dan lugar a resultados ligeramente diferentes: Penman-Monteith (P) y Thornwaite (T)

### 3.4.5 Condiciones de contorno: entradas de agua al dominio

La única entrada de agua al sistema es la lluvia. Se han tratado los datos de precipitación diaria facilitados por la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) para las siguientes estaciones meteorológicas:

*Tabla 5. Estaciones meteorológicas en el entorno de la finca experimental de Arganda.*

Nombre	Identificador	Periodo con datos disponibles en el periodo estudiado	Notas
Madrid/Barajas	3129	01/04/2009 – 31/10/2011	Serie completa
Madrid/Torrejón	3175	01/04/2009 – 31/10/2011	Serie completa
Madrid/Getafe	3200	01/04/2009 – 31/10/2011	Serie completa
Aranjuez	3100B	01/04/2009 – 31/10/2011	Incompleta (sin dato 129 días)
Arganda (Comunidad)	3182E	01/04/2009 – 31/10/2011	Serie completa
Arganda del Rey	3182Y	01/04/2009 – 06/10/2010 08/07/2011 – 31/10/2011	Discontinuidad 274 días y sin dato otros 21 días.

La estación de Arganda del Rey (3182Y) está muy próxima a la zona de estudio, pero faltan muchos datos en el periodo de interés, especialmente a partir de octubre, 2010. Arganda (Comunidad, 3182E) también próxima, aunque tal vez no lo suficiente para recoger fielmente la precipitación en eventos tormentosos. Comparando con los datos disponibles de la estación 3182Y, se observa que 3182E recoge en general mayor volumen de precipitación que la estación 3182Y, por ello se ha optado por construir una serie en base a los valores diarios del promedio de las precipitaciones de las estaciones 3129, 3175, 3200, 3100B y 3182E, que es mas parecido a los datos de la estación 3182Y disponibles.

En resumen, durante el periodo de estabilización, entre abril de 2009 y octubre de 2010 las entradas de agua al sistema se han calculado en base a los datos de precipitación de la estación 3182Y completada cuando falta algún dato puntual con los datos registrados en la estación 3182E. Sin embargo puesto que en el periodo que va de octubre de 2010 a octubre de 2011 la estación 3182Y tiene muchos periodos sin registrar información se ha optado por completar la serie con los valores promedio de las cinco estaciones citadas.

La discretización temporal de las etapas de recarga se ha hecho en base a la distribución de lluvias, intentando llegar a un compromiso entre el número de etapas y la duración real del evento de lluvia. Ya que se dispone de datos diarios de precipitación, cada día podría constituir una etapa de recarga, esto daría lugar a un número excesivo de etapas, 365, sin embargo un número demasiado pequeño obligaría a distribuir la lluvia en días en los que la precipitación ha sido cero. Así pues se han definido etapas de un día en el caso de eventos excepcionales aislados. El resto de precipitaciones moderadas consecutivas o muy próximas se agrupan en forma periodos húmedos y, de forma similar, la sucesión de días sin precipitación o con escasa precipitación se agrupan en forma de periodos secos. Cada uno de las etapas queda definida por la duración de la misma (número de días) y por la precipitación diaria promedio (tasa de precipitación en cm/día). Los datos de precipitación correspondientes a la simulación de abril, 2009 – octubre, 2010 se han agrupado en 58 etapas de recarga, mientras que los de la simulación de octubre, 2010 – octubre, 2011 se han agrupado en 57 etapas de recarga (ver figuras 16 y 17 y tablas 5 y 6)

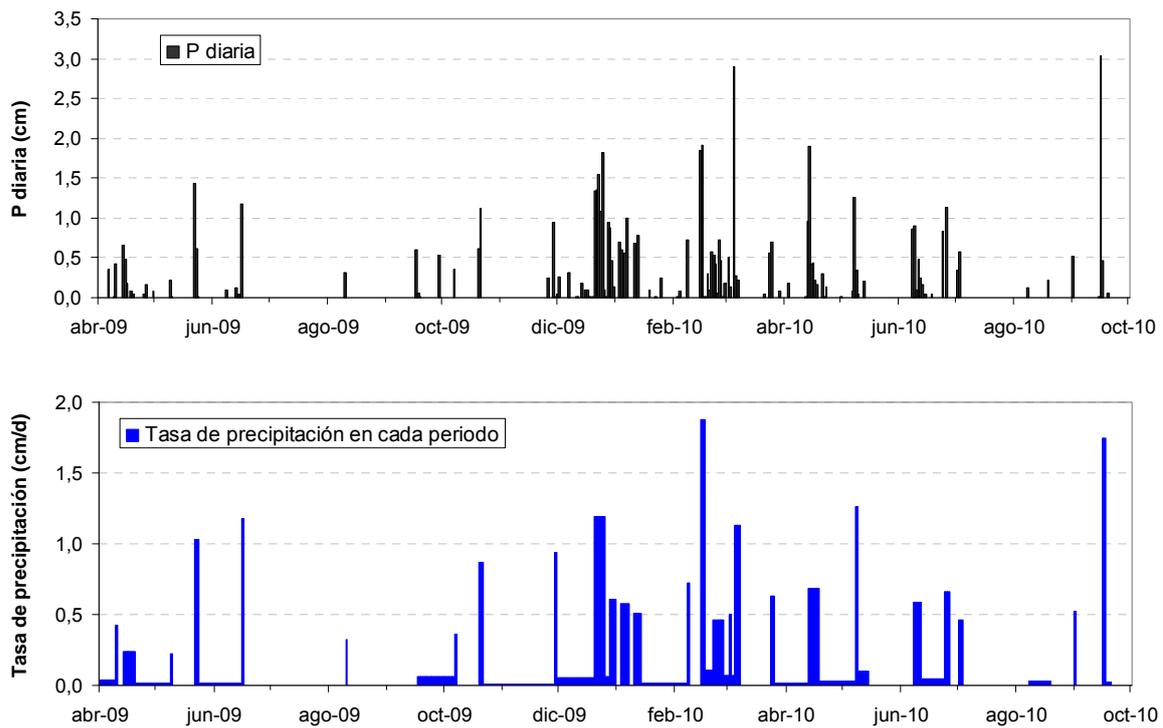


Figura 16. Distribución de la precipitación a escala diaria y discretización temporal para el periodo de estabilización que va de abril de 2009 a octubre de 2010.

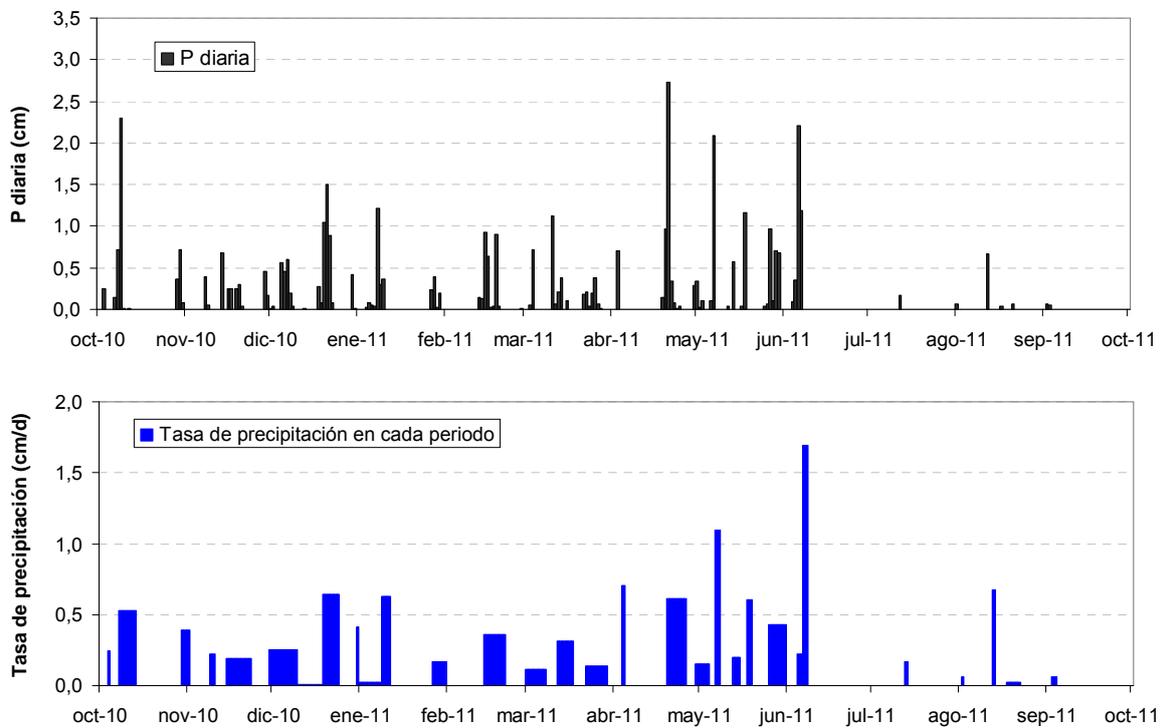


Figura 17. Distribución de la precipitación a escala diaria y discretización temporal para el periodo de simulación de octubre de 2010 a octubre de 2011.

Tabla 6. Discretización temporal y valores de precipitación en cada una de los periodos de la condición de contorno de flujo impuesto.

Abril, 2009 - Octubre, 2010					Octubre, 2010 - Octubre, 2011				
Nº Periodo	Fecha	Nºdías	P total (cm)	P (cm/día)	Nº Periodo	Fecha	Nºdías	P total (cm)	P (cm/día)
1	01/04/2009	9	0,38	0,042	1	01/10/2010	2	0,00	0,000
2	10/04/2009	1	0,42	0,420	2	03/10/2010	1	0,24	0,242
3	11/04/2009	3	0,00	0,000	3	04/10/2010	3	0,00	0,000
4	14/04/2009	6	1,44	0,240	4	07/10/2010	6	3,18	0,530
5	20/04/2009	19	0,28	0,015	5	13/10/2010	16	0,00	0,000
6	09/05/2009	1	0,22	0,220	6	29/10/2010	3	1,17	0,389
7	10/05/2009	12	0,02	0,002	7	01/11/2010	7	0,00	0,000
8	22/05/2009	2	2,06	1,030	8	08/11/2010	2	0,44	0,220
9	24/05/2009	23	0,32	0,014	9	10/11/2010	4	0,00	0,000
10	16/06/2009	1	1,18	1,180	10	14/11/2010	9	1,75	0,195
11	17/06/2009	54	0,00	0,000	11	23/11/2010	6	0,00	0,000
12	10/08/2009	1	0,32	0,320	12	29/11/2010	10	2,53	0,253
13	11/08/2009	37	0,00	0,000	13	09/12/2010	9	0,05	0,005
14	17/09/2009	20	1,22	0,061	14	18/12/2010	6	3,85	0,641
15	07/10/2009	1	0,36	0,360	15	24/12/2010	6	0,00	0,000
16	08/10/2009	12	0,00	0,000	16	30/12/2010	1	0,41	0,412
17	20/10/2009	2	1,74	0,870	17	31/12/2010	8	0,20	0,025
18	22/10/2009	38	0,24	0,006	18	08/01/2011	3	1,88	0,628
19	29/11/2009	1	0,94	0,940	19	11/01/2011	2	0,00	0,001
20	30/11/2009	20	1,08	0,054	20	13/01/2011	13	0,00	0,000
21	20/12/2009	6	7,16	1,193	21	26/01/2011	5	0,86	0,171
22	26/12/2009	2	0,12	0,060	22	31/01/2011	13	0,00	0,000
23	28/12/2009	4	2,42	0,605	23	13/02/2011	8	2,85	0,357
24	01/01/2010	2	0,00	0,000	24	21/02/2011	7	0,00	0,000
25	03/01/2010	5	2,88	0,576	25	28/02/2011	7	0,79	0,112
26	08/01/2010	2	0,00	0,000	26	07/03/2011	4	0,00	0,000
27	10/01/2010	4	2,04	0,510	27	11/03/2011	6	1,87	0,312
28	14/01/2010	25	0,46	0,018	28	17/03/2011	4	0,00	0,000
29	08/02/2010	1	0,72	0,720	29	21/03/2011	8	1,08	0,135
30	09/02/2010	6	0,00	0,000	30	29/03/2011	5	0,00	0,000
31	15/02/2010	2	3,76	1,880	31	03/04/2011	1	0,71	0,708
32	17/02/2010	4	0,44	0,110	32	04/04/2011	15	0,00	0,000
33	21/02/2010	6	2,78	0,463	33	19/04/2011	7	4,32	0,616
34	27/02/2010	3	0,20	0,067	34	26/04/2011	3	0,00	0,000
35	02/03/2010	1	0,50	0,500	35	29/04/2011	5	0,76	0,152
36	03/03/2010	2	0,14	0,070	36	04/05/2011	2	0,00	0,000
37	05/03/2010	3	3,40	1,133	37	06/05/2011	2	2,19	1,095
38	08/03/2010	16	0,04	0,003	38	08/05/2011	4	0,00	0,000
39	24/03/2010	2	1,26	0,630	39	12/05/2011	3	0,60	0,201
40	26/03/2010	18	0,28	0,016	40	15/05/2011	2	0,00	0,000
41	13/04/2010	6	4,10	0,683	41	17/05/2011	2	1,20	0,602
42	19/04/2010	19	0,56	0,029	42	19/05/2011	6	0,00	0,000
43	08/05/2010	1	1,26	1,260	43	25/05/2011	6	2,57	0,428
44	09/05/2010	6	0,58	0,097	44	31/05/2011	4	0,00	0,000
45	15/05/2010	24	0,00	0,000	45	04/06/2011	2	0,45	0,223
46	08/06/2010	4	2,34	0,585	46	06/06/2011	2	3,39	1,695
47	12/06/2010	12	0,52	0,043	47	08/06/2011	34	0,00	0,000
48	24/06/2010	3	1,98	0,660	48	12/07/2011	1	0,17	0,172
49	27/06/2010	5	0,00	0,000	49	13/07/2011	19	0,00	0,000
50	02/07/2010	2	0,92	0,460	50	01/08/2011	1	0,06	0,060
51	04/07/2010	35	0,00	0,000	51	02/08/2011	10	0,00	0,000
52	08/08/2010	12	0,34	0,028	52	12/08/2011	1	0,67	0,673
53	20/08/2010	12	0,00	0,000	53	13/08/2011	4	0,00	0,000
54	01/09/2010	1	0,52	0,520	54	17/08/2011	5	0,11	0,022
55	02/09/2010	14	0,02	0,001	55	22/08/2011	11	0,00	0,000
56	16/09/2010	2	3,50	1,750	56	02/09/2011	2	0,12	0,060
57	18/09/2010	3	0,06	0,020	57	04/09/2011	27	0,00	0,000
58	21/09/2010	10	0,00	0,000					
Suma:		548	57,52		Suma:		365	40,47	

Los parámetros definidos para cada uno de los periodos de recarga son:

**TPER**, [T]: duración del periodo de recarga, son los presentados en la primera columna de **tabla XX**.

**DELTA**, [T]: duración del primer paso de tiempo en el periodo de recarga. Se han puesto pasos iniciales muy pequeños, entre 0,001 y 0,1 días, a consta de prolongar el tiempo de cálculo pero asegurando de esta manera que el sistema se muestra estable desde el comienzo de cada simulación.

**TMLT**: factor de incremento del paso de tiempo. Este factor multiplica el valor de la duración de cada paso cuando se está en una situación estable en que la solución de las ecuaciones converge adecuadamente. Se ha dado el valor de 1,5.

**DLTMX**, [T]: paso de tiempo máximo. Si el factor de incremento del paso de tiempo es mayor que 1, la duración del paso de tiempo se incrementa sucesivamente hasta alcanzar este valor que se mantiene constante hasta finalizar el periodo. Se ha fijado el valor de este parámetro en 0,1.

**DLTMIN**, [T]: paso de tiempo mínimo. La duración del paso de tiempo no se reducirá por debajo de este valor. Se ha fijado entre 0,001 y 0,1.

**TRED**: factor de reducción del paso de tiempo que se aplica cuando no se logra convergencia después de alcanzar el número máximo de iteraciones por paso de tiempo. El valor de TRED debe estar entre 0 y 1 (normalmente se usan valores entre 0.1 y 0.5). Si TRED es igual a 0 o 1, no se produce reducción de la duración del paso de tiempo. El valor se ha fijado entre 0,5 y 0,8.

**DSMAX**, [L]: **Maximum head change**. Se trata del máximo cambio permitido en el valor del potencial entre sucesivos pasos de tiempo. Se ha fijado en 1.0.

**STERR**, [L]: **Steady state head criterion**. El programa asume que se ha alcanzado el estado estacionario cuando el máximo cambio en el potencial entre sucesivos pasos de tiempo es menor de este valor. Se ha fijado en 0.0

**POND**, [L]: **Maximum height of ponding**. Puesto que no se ha observado encharcamiento durante el periodo de control, lo cual es previsible dadas las características climáticas y los materiales de la finca, este parámetro se ha fijado en 0.

En las tablas 7 y 8 se presentan los valores asignados a cada uno de los parámetros definidos anteriormente en el periodo de estabilización y en el periodo de simulación.

Tabla 7. Parámetros asignados a los periodos de recarga definidos para la simulación del periodo de estabilización entre abril, 2009 y octubre, 2010.

No.	Length	DELT	TMLT	DLTMX	DLTM...	TRED	DSMAX	STERR	Pond	Print	Evap	Plant
1	9	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	1	0,001	2	0,1	0,001	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	3	0,1	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	6	0,1	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	19	0,1	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	1	0,1	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	12	0,1	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	2	0,1	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	23	0,1	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	1	0,1	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	54	0,1	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	1	0,1	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	37	0,1	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	20	0,01	1,5	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	1	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	12	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	38	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19	1	0,1	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
20	20	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21	6	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
22	2	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
23	4	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
24	2	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25	5	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
26	2	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
27	4	0,1	1,2	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
28	25	0,1	1,2	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
29	1	0,1	1,2	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
30	6	0,1	1,2	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
31	2	0,1	1,2	0,1	0,1	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
32	4	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
33	6	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
34	3	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
35	1	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
36	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
37	3	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
38	16	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
39	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
40	18	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
41	6	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
42	19	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
43	1	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
44	6	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
45	24	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
46	4	0,1	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
47	12	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
48	3	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
49	5	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
50	2	0,1	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
51	35	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
52	12	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
53	12	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
54	1	0,1	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
55	14	0,1	1,5	0,1	0,1	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
56	2	0,1	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
57	3	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
58	10	0,01	1,5	0,1	0,01	0,5	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabla 8.. Parámetros asignados a los periodos de recarga definidos para la simulación del periodo de simulación entre octubre de 2010 y octubre de 2011.

No.	Length	DELT	TMLT	DLTMX	DLTM...	TRED	DSMAX	STERR	Pond	Print	Evap	Plant
1	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	1	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	3	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	6	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	16	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	3	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	7	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	4	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	9	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	6	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	10	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	9	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	6	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	6	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	1	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	8	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	3	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
20	13	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21	5	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
22	13	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
23	8	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
24	7	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25	7	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
26	4	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
27	6	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
28	4	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
29	8	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
30	5	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
31	1	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
32	15	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
33	7	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
34	3	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
35	5	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
36	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
37	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
38	4	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
39	3	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
40	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
41	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
42	6	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
43	6	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
44	4	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
45	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
46	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
47	34	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
48	1	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
49	19	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
50	1	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
51	10	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
52	1	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
53	4	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
54	5	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
55	11	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
56	2	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
57	27	0,01	1,5	0,1	0,01	0,8	1	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

### 3.4.6 Condiciones de contorno: salidas del agua del sistema

Para evaluar las salidas de agua del sistema se consideran dos procesos: la evaporación directa desde la superficie del suelo desnuda, y la transpiración mediada por la vegetación. Estos procesos se simulan como un ciclo recurrente constituido por etapas de evapotranspiración de igual duración. Los parámetros de evapotranspiración se definen al inicio de cada periodo y se asume que varían linealmente desde el inicio de un periodo hasta el inicio del siguiente.

Para cuantificar la evaporación en cada etapa del ciclo se consideran tres parámetros:

- PEVAL, [L]/[T]: evaporación potencial
- HA, [L]: Potencial de presión de la atmósfera
- SRES, 1/[L]: resistencia de la superficie

Para cuantificar la transpiración en cada etapa del ciclo se consideran cinco parámetros:

- PTVAL, [L]/[T]: transpiración potencial
- RD, [L]: profundidad máxima de raíces, marca el límite a partir del cual no se puede producir extracción de agua por la plantas.
- RA base, RA top, 1/[L<sup>2</sup>]: actividad de raíces en la regiones inferior (base) y superior (top) respectivamente. Se define como la longitud de raíces en un volumen dado de suelo dividido por dicho volumen. Los valores varían en función del tipo de planta y su estado de desarrollo, entre 0 y aproximadamente 3 cm<sup>-2</sup>.
- HROOT, [L]: potencial de presión en las raíces. Habitualmente se fija en el punto de marchitez permanente, definido como el potencial hídrico en el suelo al cual la planta se marchita y muere. Para la mayoría de las plantas, el punto de marchitez permanente equivale aproximadamente a – 150 m de agua y este es el valor que se ha tomado por defecto.

Los ciclos de evapotranspiración definidos se han hecho coincidir con el inicio de meses naturales. El ciclo de evapotranspiración para la simulación desde abril, 2009 hasta octubre, 2010 consta de 18 etapas y el de la simulación desde octubre, 2010 hasta octubre, 2011 consta de 12 etapas. Para cada una de las etapas se asignan los valores correspondientes a los parámetros PEVAL, PTVAL, HA, SRES, RA base y RA top acordes con las variables climatológicas y de desarrollo vegetal en cada mes considerado. Sin embargo los parámetros RD y HROOT tienen un valor fijo. En los siguientes apartados se detalla el proceso de asignación de valores a cada uno de los parámetros. En la tabla 9 se muestran los valores de los parámetros asignados en los ciclos de evapotranspiración.

Tabla 9. Ciclos de evapotranspiración en los periodos simulados.

Abril, 2009 - Octubre, 2010										
Nº Periodo	Evaporación				Transpiración					
	PEVAL (P)	PEVAL (T)	SRES	HA	PTVAL (P)	PTVAL (T)	RD	RA base	RA top	HROOT
1	0,065	0,027	0,000026	-815574	0,265	0,110	40	3,00	3,00	-15000
2	0,109	0,062	0,000039	-1140051	0,441	0,251	40	2,50	2,50	-15000
3	0,347	0,249	0,000036	-1302283	0,285	0,205	40	2,00	2,00	-15000
4	0,560	0,424	0,000046	-1667241	0,138	0,104	40	0,10	0,10	-15000
5	0,500	0,412	0,000050	-1371682	0,123	0,101	40	0,05	0,05	-15000
6	0,184	0,146	0,000075	-908480	0,226	0,179	40	0,50	0,50	-15000
7	0,082	0,070	0,000095	-719548	0,153	0,129	40	2,00	2,00	-15000
8	0,048	0,035	0,000057	-534817	0,073	0,053	40	1,00	1,00	-15000
9	0,045	0,020	0,0000050	-268049	0,015	0,007	40	0,00	0,00	-15000
10	0,055	0,023	0,0000065	-281102	0,019	0,008	40	0,00	0,00	-15000
11	0,060	0,028	0,0000079	-384781	0,040	0,019	40	0,50	0,50	-15000
12	0,067	0,031	0,0000017	-541360	0,125	0,057	40	2,00	2,00	-15000
13	0,063	0,037	0,000026	-599123	0,256	0,150	40	3,00	3,00	-15000
14	0,086	0,050	0,000039	-770565	0,349	0,202	40	2,50	2,50	-15000
15	0,275	0,216	0,000036	-844683	0,226	0,178	40	2,00	2,00	-15000
16	0,574	0,457	0,000046	-1336225	0,141	0,113	40	0,10	0,10	-15000
17	0,495	0,395	0,000050	-1239566	0,122	0,097	40	0,05	0,05	-15000
18	0,178	0,146	0,000075	-768059	0,218	0,179	40	0,50	0,50	-15000
Octubre, 2010 - Octubre, 2011										
Nº Periodo	Evaporación				Transpiración					
	PEVAL (P)	PEVAL (T)	SRES	HA	PTVAL (P)	PTVAL (T)	RD	RA base	RA top	HROOT
1	0,071	0,055	0,000095	-638891	0,132	0,102	40	2,00	2,00	-15000
2	0,040	0,026	0,000057	-416709	0,062	0,040	40	1,00	1,00	-15000
3	0,048	0,029	0,0000050	-316682	0,016	0,010	40	0,00	0,00	-15000
4	0,053	0,024	0,0000065	-268187	0,018	0,008	40	0,00	0,00	-15000
5	0,086	0,033	0,0000079	-412908	0,057	0,022	40	0,50	0,50	-15000
6	0,070	0,031	0,0000017	-438500	0,130	0,058	40	2,00	2,00	-15000
7	0,071	0,043	0,000026	-618403	0,288	0,173	40	3,00	3,00	-15000
8	0,086	0,060	0,000039	-659292	0,347	0,243	40	2,50	2,50	-15000
9	0,336	0,233	0,000036	-1132376	0,276	0,192	40	2,00	2,00	-15000
10	0,548	0,382	0,000046	-1549825	0,135	0,094	40	0,10	0,10	-15000
11	0,500	0,390	0,000050	-1432686	0,123	0,096	40	0,05	0,05	-15000
12	0,196	0,155	0,000075	-1305598	0,241	0,190	40	0,50	0,50	-15000

\* El método empleado en la estimación de la evapotranspiración potencial, distribuida en sus dos componentes PEVAL y PTVAL se indica mediante la inicial del método: Penman-Monteith (P) y Thornthwaite (T).

### Estimación de la evaporación potencial (PEVAL) y transpiración potencial (PTVAL)

El término evapotranspiración engloba los procesos de transferencia de agua a la atmósfera tanto por evaporación directa a partir del suelo como por la acción de las plantas a través de la transpiración. Este concepto ha sido vinculado a diferentes expresiones matemáticas que intenta expresar de forma sintética los procesos que influyen en esa transferencia de masa y energía. El concepto de evapotranspiración potencial fue definido de forma paralela en 1948 tanto por Thornthwaite como por Penman-Monteith. La evapotranspiración potencial recoge el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanentemente completa, de forma que representa el límite superior de la evapotranspiración real, es decir, la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración.

En estas simulaciones se han contrastado los resultados de dos métodos diferentes para el cálculo de la evapotranspiración potencial: Thornthwaite y Penman-Monteith. La ecuación de Thornthwaite introduce la influencia de la temperatura y la insolación, pero no considera el tipo de superficie. Penman-Monteith fue el primero en desarrollar un método combinado que consideraba tanto las fuentes de energía debidas a la radiación como el transporte turbulento del vapor de agua a partir de una superficie, pero tampoco tenía en cuenta el tipo de superficie. En la formulación de Penman-Monteith (Monteith, 1963) se distingue ya una resistencia del cultivo, denominada resistencia estomática, y una resistencia aerodinámica que corresponde a las condiciones aerodinámicas de la superficie para la transferencia del agua entre el aire y la superficie. La resistencia estomática es debida a la respuesta de los estomas, que son los orificios por donde sale el vapor de agua de las hojas de las plantas, y que responden a procesos fisiológicos como la regulación térmica y mantienen el flujo de agua en el interior de la planta, que es el único mecanismo de entrada de nutrientes del suelo a través de las raíces.

Para este estudio se dispone, por un lado, de la serie completa de datos diarios de evapotranspiración potencial facilitados por la AEMET, calculados mediante el método de Penman-Monteith en su versión recomendada por la FAO (Allen et al., 2006) desde el 01/04/2009 hasta el 31/10/2011 en la estación meteorológica de Arganda Comunidad (indicador 3182E). A partir de los datos diarios se han calculado los valores medios mensuales de evapotranspiración potencial.

Por otro lado, se ha aplicado la fórmula de Thornthwaite para calcular la evapotranspiración potencial mensual a partir de la serie de temperaturas máximas y mínimas diarias registradas en la estación meteorológica de Arganda Comunidad (indicador 3182E). Los valores de temperaturas medias mensuales se introducen en la fórmula de Thornthwaite para calcular la evapotranspiración potencial teórica:

$$\varepsilon = 16 \times (10t/I)^a$$

donde:

$\varepsilon$ : evapotranspiración potencial media teórica, en mm/mes, que considera la duración del mes 30 días y 12 horas diarias de sol.

t: temperatura media del mes en °C.

I: índice de calor anual, es la suma de los doce índices de calor mensual (i) del año considerado, calculando el valor de i para cada mes según la fórmula:

$$i = (t/5)^{1,514} ; I = \sum i$$

a: exponente empírico calculado según la expresión:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$$

Para calcular la evapotranspiración potencial ajustada, que tiene en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol según la latitud del lugar, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$ETP = K \cdot \varepsilon ; K = N \cdot d/360$$

ETP: evapotranspiración potencial ajustada (en mm/mes).

K: factor de corrección.

N: número de días del mes.

d: horas reales de sol al día según la latitud del lugar.

*Tabla 10: Fracción de penetración de la radiación a través de la vegetación ( $\tau$ ) y valores de evapotranspiración potencial (ETP), evaporación potencial (PEVAL) y transpiración potencial (PTVAL) de acuerdo a los métodos de Penman-Monteith y de Thornthwaite.*

MES	$\tau$	1- $\tau$	Penman-Monteith			Thornthwaite		
			ETP (cm/d)	PEVAL (cm/d)	PTVAL (cm/d)	ETP (cm/d)	PEVAL (cm/d)	PTVAL (cm/d)
abril-09	0,20	0,80	0,330	0,065	0,265	0,137	0,027	0,110
mayo-09	0,20	0,80	0,549	0,109	0,441	0,313	0,062	0,251
junio-09	0,55	0,45	0,633	0,347	0,285	0,454	0,249	0,205
julio-09	0,80	0,20	0,698	0,560	0,138	0,528	0,424	0,104
agosto-09	0,80	0,20	0,623	0,500	0,123	0,514	0,412	0,101
septiembre-09	0,45	0,55	0,410	0,184	0,226	0,325	0,146	0,179
octubre-09	0,35	0,65	0,235	0,082	0,153	0,199	0,070	0,129
noviembre-09	0,40	0,60	0,122	0,048	0,073	0,088	0,035	0,053
diciembre-09	0,75	0,25	0,061	0,045	0,015	0,026	0,020	0,007
enero-10	0,75	0,25	0,074	0,055	0,019	0,030	0,023	0,008
febrero-10	0,60	0,40	0,100	0,060	0,040	0,046	0,028	0,019
marzo-10	0,35	0,65	0,192	0,067	0,125	0,088	0,031	0,057
abril-10	0,20	0,80	0,320	0,063	0,256	0,187	0,037	0,150
mayo-10	0,20	0,80	0,435	0,086	0,349	0,252	0,050	0,202
junio-10	0,55	0,45	0,501	0,275	0,226	0,394	0,216	0,178
julio-10	0,80	0,20	0,715	0,574	0,141	0,570	0,457	0,113
agosto-10	0,80	0,20	0,617	0,495	0,122	0,492	0,395	0,097
septiembre-10	0,45	0,55	0,396	0,178	0,218	0,325	0,146	0,179
octubre-10	0,35	0,65	0,203	0,071	0,132	0,158	0,055	0,102
noviembre-10	0,40	0,60	0,102	0,040	0,062	0,066	0,026	0,040
diciembre-10	0,75	0,25	0,064	0,048	0,016	0,039	0,029	0,010
enero-11	0,75	0,25	0,070	0,053	0,018	0,033	0,024	0,008
febrero-11	0,60	0,40	0,143	0,086	0,057	0,054	0,033	0,022
marzo-11	0,35	0,65	0,201	0,070	0,130	0,090	0,031	0,058
abril-11	0,20	0,80	0,359	0,071	0,288	0,216	0,043	0,173
mayo-11	0,20	0,80	0,433	0,086	0,347	0,303	0,060	0,243
junio-11	0,55	0,45	0,612	0,336	0,276	0,425	0,233	0,192
julio-11	0,80	0,20	0,683	0,548	0,135	0,476	0,382	0,094
agosto-11	0,80	0,20	0,624	0,500	0,123	0,486	0,390	0,096
septiembre-11	0,45	0,55	0,437	0,196	0,241	0,345	0,155	0,190

La entrada de datos de la aplicación VS2DTI obliga a distribuir el valor de evapotranspiración potencial (ETP) en sus dos componentes: evaporación potencial (PEVAL) y transpiración potencial (PTVAL). Para estimar la contribución de cada una ellas en el valor total de ETP se utiliza la aproximación de Campbell (1998), que define el parámetro  $\tau$  como la fracción la radiación incidente que alcanza la superficie del suelo y está disponible para evaporar agua desde el suelo. La fracción de la radiación incidente que es interceptada por la vegetación (1 -  $\tau$ ) sería la disponible para la transpiración.

Así:

$$PEVAL = \tau \times ETP$$

$$PTVAL = (1 - \tau) \times ETP$$

Para el cálculo de la penetración de la radiación incidente a través de la cobertura vegetal, la ecuación de Campbell se basa en dos índices relacionados con la orientación y el área de las hojas. Un valor típico de  $\tau$  para el caso de un terreno que queda razonablemente cubierto por la vegetación es 0,17 (es decir, el 17 % de la radiación incidente alcanza el suelo y un 83 % es interceptada por la vegetación).

De acuerdo con el desarrollo vegetal observado en la parcela experimental y el grado de cobertura que ésta representa, se han asignado valores de  $\tau$  entre 0,20 y 0,45 para los meses de primavera y otoño (0,20 en los meses de abril y mayo, cuando el desarrollo vegetal es máximo) valores de  $\tau$  entre 0,55 y 0,80 para los meses de verano e invierno, cuando las condiciones de temperatura y/o escasez de agua dificultan el desarrollo vegetal. En la tabla 10 se recogen los valores de  $\tau$  asignados a cada mes, así como los valores de ETP, PEVAL y PTVAL según Penman-Monteith y Thornthwaite resultantes. E la figura 18 se muestra la variación de los valores mensuales de ETP, PEVAL y PTVAL en todo el periodo simulado.

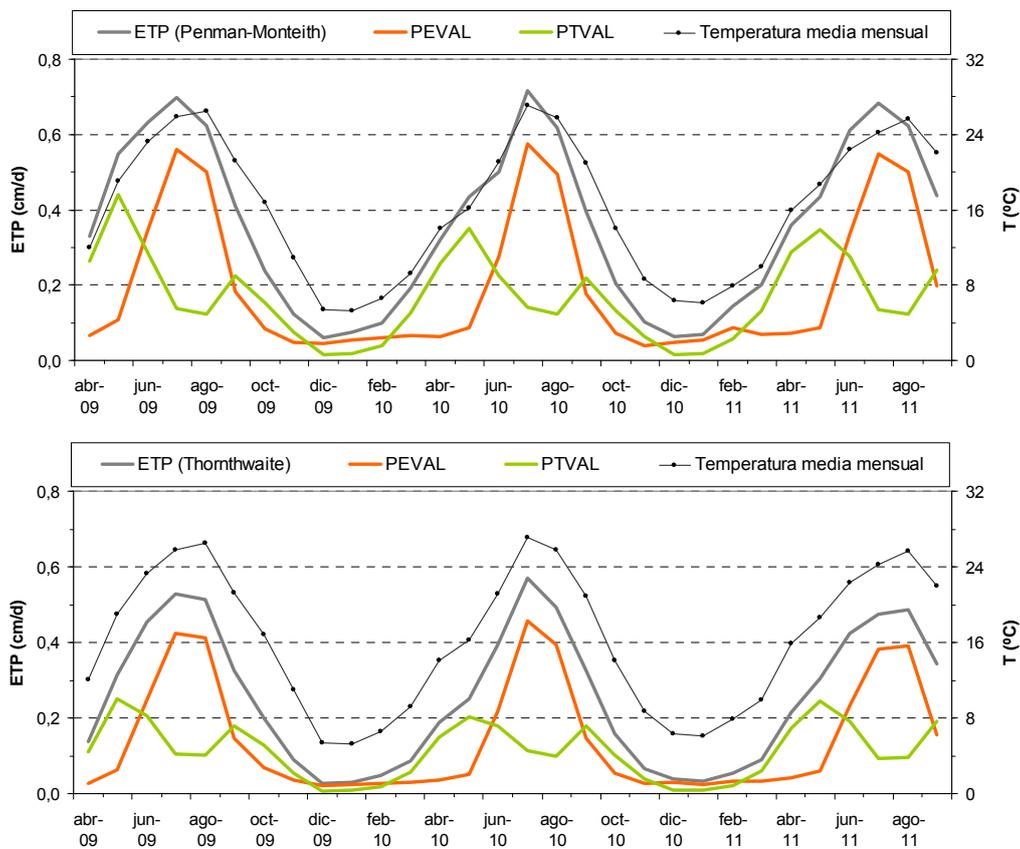


Figura 18. Variación de ETP, PEVAL y PTVAL a lo largo del periodo simulado.

## Potencial de presión de la atmósfera.

El valor del potencial de presión de la atmósfera (HA) depende entre otros factores de la humedad relativa y de la temperatura, representa el potencial con el que la atmósfera es capaz de extraer agua de una superficie libre. Para cada una de las etapas del ciclo de evapotranspiración este valor se calcula según al fórmula de Kelvin (en Lappala et al., 1987):

$$HA = \frac{R \cdot T \cdot \ln(h_a)}{M_w \cdot g} = 47,13 \cdot T \cdot \ln(h_a)$$

donde

HA: potencial de presión de la atmósfera (expresada en metros).

R: constante universal de los gases (8,314 J / mol °K).

T: temperatura en grados Kelvin.

$h_a$ : humedad relativa de la atmósfera (en tanto por uno).

$M_w$ : peso molecular del agua (0,018 Kg / mol).

g: aceleración de la gravedad (9,8 m / s<sup>2</sup>).

Agrupando los valores constantes:  $R / (M_w \cdot g) = 47,13 \text{ m} / \text{°K}$

En la tabla 11 se presentan los datos diarios de temperatura y humedad relativa facilitados por la AEMET para las estaciones meteorológicas meteorológicas próximas a la parcela experimental.

*Tabla 11. Disponibilidad de información acerca de temperatura y humedad en las estaciones próximas a la parcela experimental.*

Nombre	Identificador	Datos disponibles en el periodo de estudio	Notas
Madrid/Barajas	3129	01/04/2009 – 31/10/2011	Series completas T y H
Madrid/Torrejón	3175	01/04/2009 – 31/10/2011	Series completas T y H
Madrid/Getafe	3200	01/04/2009 – 31/10/2011	Series completas T y H
Aranjuez	3100B	01/04/2009 – 31/10/2011	Incompletas T y H
Arganda (Comunidad)	3182E	01/04/2009 – 30/07/2011	Interrupción del registro de T el 30/07/2011 No hay registro de H
Arganda del Rey	3182Y	01/04/2009 – 06/10/2010 08/07/2011 – 31/10/2011	Discontinuidad 274 días en T y H

La serie de temperaturas se ha construido a partir de los datos de la estación de Arganda (3182E) completada en el periodo que va desde el 01/08/2011 hasta el 31/10/2011 con los de la estación 3182Y. A partir de los datos diarios de T máxima y T mínima, se ha calculado T media diaria. La T media mensual se calcula como promedio de las T medias diarias del mes correspondiente.

La única estación con datos de humedad relativa es la de Arganda 3182Y, además en su registro faltan casi 9 meses en el periodo de interés. Para restituir la serie se han comparado los datos de esta estación con los de Barajas, Torrejón y Getafe, la mejor correlación se produce con la estación de Torrejón y por ello es la que se ha empleado para el cálculo de la humedad media mensual.

MES	H	T (°K)	HA (cm)
abr-09	0,54	285,0	-815574
may-09	0,44	292,0	-1140051
jun-09	0,39	296,3	-1302283
jul-09	0,31	298,8	-1667241
ago-09	0,38	299,5	-1371682
sep-09	0,52	294,2	-908480
oct-09	0,59	289,8	-719548
nov-09	0,67	284,0	-534817
dic-09	0,82	278,4	-268049
ene-10	0,81	278,3	-281102
feb-10	0,75	279,6	-384781
mar-10	0,67	282,2	-541360
abr-10	0,64	287,1	-599123
may-10	0,57	289,2	-770565
jun-10	0,54	294,1	-844683
jul-10	0,39	300,1	-1336225
ago-10	0,41	298,8	-1239566
sep-10	0,57	294,0	-768059
oct-10	0,62	287,1	-638891
nov-10	0,73	281,7	-416709
dic-10	0,79	279,4	-316682
ene-11	0,82	279,1	-268187
feb-11	0,73	280,9	-412908
mar-11	0,72	282,9	-438500
abr-11	0,64	288,9	-618403
may-11	0,62	291,7	-659292
jun-11	0,44	295,4	-1132376
jul-11	0,33	297,3	-1549825
ago-11	0,36	298,7	-1432686
sep-11	0,39	295,0	-1305598

Tabla 12. Valores de Humedad, temperatura y potencial de presión de la atmósfera (HA) calculados para el periodo abril 2009 septiembre 2011.

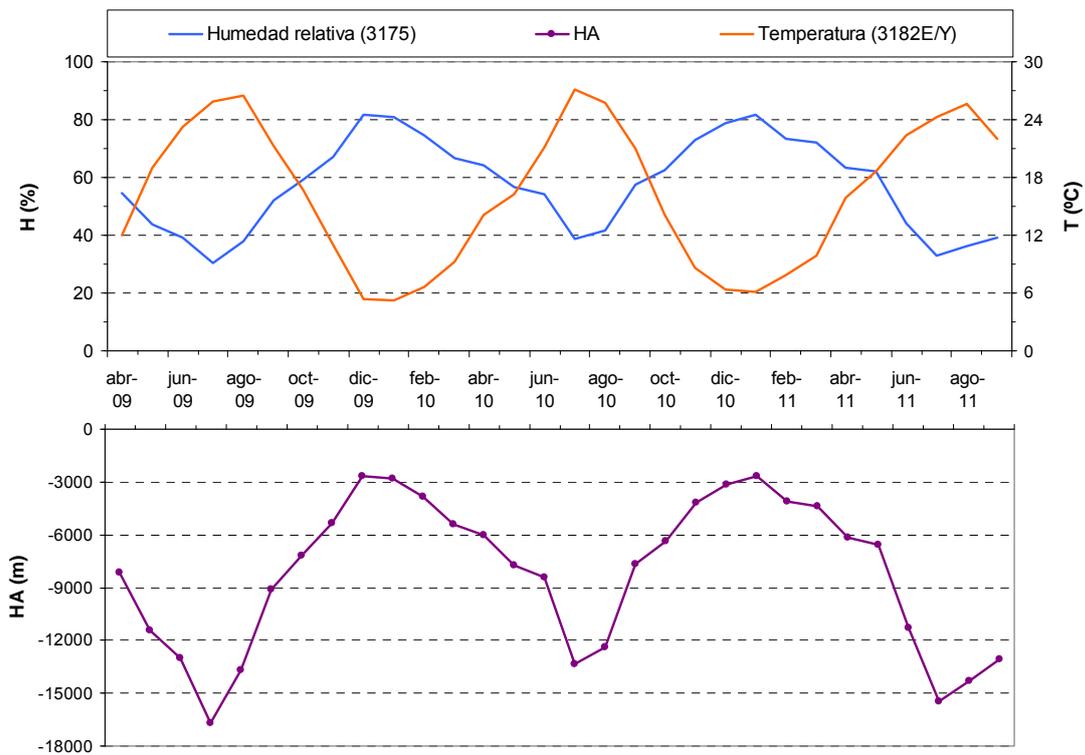


Figura 19. Evolución mensual de la humedad relativa, temperatura y potencial de presión de la atmósfera (HA) para el período de interés.

## Resistencia superficial (SRES)

El parámetro resistencia superficial (SRES) está relacionado con la resistencia a la difusión del vapor de agua en los poros del suelo. Kondo et al. (1990) proponen una ecuación empírica que relaciona esta función de resistencia con el contenido de humedad del suelo cerca de superficie ( $H_s$ ), de 0 a 2 cm, y con la humedad de saturación ( $H_{sat}$ ). Cuando  $H_s$  es elevada, los poros grandes y próximos a la superficie del suelo contienen agua y el vapor de agua se transporta fácilmente hasta la superficie del terreno, resultando valores bajos de resistencia. Por el contrario, para valores bajos de  $H_s$ , la distancia que debe recorrer el vapor de agua desde los poros hasta la superficie del suelo es mayor y además su transporte es más difícil ya que el agua se encuentra sólo en el interior de poros pequeños y menos accesibles, resultando así valores altos de resistencia.

La ecuación empleada para el cálculo de SRES en cada una de las etapas del ciclo de evaporación incluye los valores de los parámetros de Kondo et al. (1990) para suelo limoso. Se ha asumido una temperatura  $T = 303$  °K para corregir el factor preexponencial, que presenta una débil dependencia de la temperatura del suelo a través de la variación de la difusividad molecular del vapor de agua (Daamen et al., 1996):

$$SRES = 7,79 \times 10^6 (H_{sat} - H_s)^{10,0} \quad (s/m)$$

El valor descrito por Kondo et al. (1990) para el parámetro  $H_{sat}$  en suelo limoso es 0,490, y coincide con el valor de 0,5 determinado experimentalmente en la capa superficial del suelo en las parcelas de ensayo en Arganda del Rey. Como aproximación al contenido de humedad del suelo cerca de superficie ( $H_s$ ), se ha tomado la media mensual de los registros experimentales de humedad correspondientes a los sensores instalados a 30 cm (excepto para los meses de octubre y noviembre pues en ese periodo aún no habían estabilizado su registro, en este caso se ha tomado el valor de salida del modelo durante la simulación de estabilización). Los valores obtenidos para el parámetro SRES (Tabla 13) están dentro del rango de variación descrito en la bibliografía (Van de Griend, 1994).

*Tabla 13. Valores mensuales calculados para el parámetro SRES.*

MES	$H_s$ ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	$H_{sat} - H_s$ ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	SRES (s/m)	SRES (d/cm)
Octubre	0,10	0,40	817	0,000095
Noviembre	0,12	0,38	489	0,000095
Diciembre	0,20	0,30	43	0,0000050
Enero	0,26	0,24	6	0,0000065
Febrero	0,25	0,25	7	0,0000079
Marzo	0,23	0,27	15	0,0000017
Abril	0,15	0,35	227	0,000026
Mayo	0,13	0,37	336	0,000039
Junio	0,14	0,36	309	0,000036
Julio	0,13	0,37	395	0,000046
Agosto	0,13	0,38	428	0,000050
Septiembre	0,11	0,39	651	0,000075

### Actividad de raíces (RA top, RA base)

De acuerdo con Lappala (Lappala et al., 1987) los valores típicos de actividad de raíces, dependiendo de la época del año y desarrollo vegetativo oscila entre 0 y aproximadamente  $3 \text{ cm}^2$ ; los valores más altos se asignan a los meses de primavera y otoño, en los que se ha observado el mayor desarrollo vegetal en el área de estudio coincidiendo con las temperaturas moderadas y los valores de humedad en el suelo mas elevados. La escasa vegetación que se desarrolla en verano e invierno coincide con la escasez de precipitaciones, por tanto escasa humedad en el suelo y los valores de temperatura más extremos.

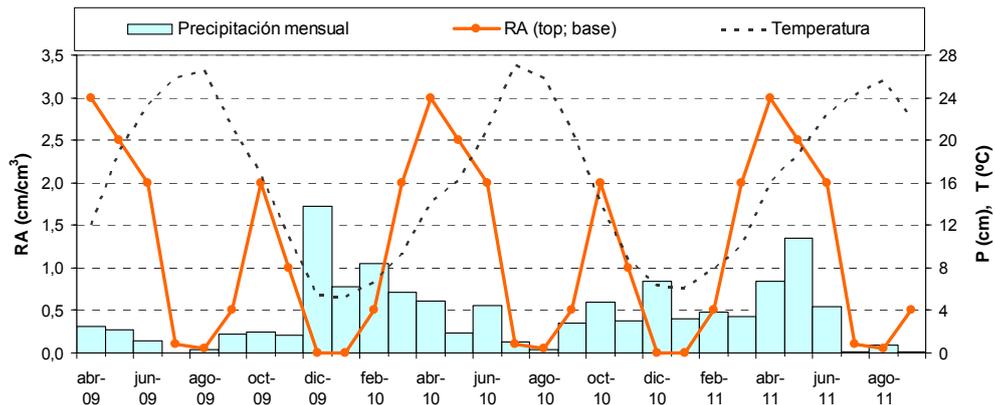


Figura 20. Comparación de la evolución de los valores de actividad de raíces (RA) con la precipitación y temperatura.

### Profundidad de raíces (RD)

La observación de los testigos obtenidos durante la toma de muestras inalteradas hasta 2 metros de profundidad ha permitido establecer como valor promedio de profundidad de raíces 40 cm en todas las etapas del ciclo de de evapotranspiración. Aunque pude haber raíces mas profundas estas han de ser muy escasas pues no se han observado en ninguno de los testigos y por tanto, siendo esenciales para el desarrollo de la escasa vegetación que soporta el verano, no han de contribuir significativamente a la extracción de agua del perfil.

### Potencial de presión en raíces (HROOT)

El valor del potencial de presión en raíces (HROOT) coincide con el valor del potencial del punto de marchitez permanente, se trata del potencial de succión a partir del cual las raíces de las plantas no pueden extraer agua del medio. Un valor aceptado para la vegetación de nuestro entorno es el de 15.000  $\text{cm}$  y es este el que se ha puesto en todas las etapas del ciclo de evapotranspiración.

### 3.5 Resultado final y conclusiones

#### **Evolución de los sensores durante el periodo de estabilización (abril, 2009 – octubre, 2010).**

En la figura 21 se muestran los resultados obtenidos a lo largo del periodo de estabilización de los sensores. Se han representado tanto los datos obtenidos calculando los parámetros de evapotranspiración mediante el método de Thornwaite como empleando la formulación de Penman-Monteith, pues como se verá más adelante es el que proporciona resultados mas razonables durante el periodo de simulación, y permite ajustar mejor el balance de agua.

El análisis de las gráficas es complicada, además como se comento en apartados anteriores, los sensores superficiales, los situados a 30 cm de profundidad, dejaron de medir y tuvieron que ser sustituidos, esto se analizará con mas detalle en el siguiente apartado.

Como se puede observar, y en cierto modo era de esperar, al menos durante los primeros meses de simulación, ninguno de los sensores que funcionaron han proporcionado resultados útiles. En el primer mes aparece un fuerte pico que parece corresponder a la detección de las precipitaciones de febrero y marzo, aunque de forma exagerada y con un tiempo de respuesta muy breve, casi simultáneo en todos los sensores.

Resulta llamativo que los sensores situados a 60, 90 y 120 cm durante los meses de abril, mayo y junio continuasen mostrando una clara acumulación de agua en el suelo con un perfil de evolución muy similar en todos ellos y un descenso exageradamente brusco en el mes de junio. Parece como si el perfil se secase de repente en todo su espesor y no como es de esperar en un sistema poroso, con un decaimiento lento en el tiempo, más pronunciado en superficie en la zona en la que las raíces pueden extraer agua.

El sensor mas profundo, situado a 150 cm de profundidad se comporta de forma más lógica. El pico que se observa a los pocos días de su instalación no es mas que un artefacto normal como consecuencia de la alteración del terreno al instalarlo, (un pico similar se observa en los otros sensores), posteriormente la señal de humedad decae y se estabiliza, aunque en valores excesivamente bajos, ligeramente por encima del 0%. Esto no parece ser mas que un problema de calibración pues lo esperable a esa cota, muy lejos del sistema radicular superficial, son humedades estables y mas o menos bajas, dependiendo de la textura del material, pero no tanto.

Las lluvias de los meses de junio/julio parecen inducir en los sensores a 60, 90 y 120 una respuesta que se traslada hasta mediados del mes de septiembre, lo sorprendente es que lo hacen de forma casi simultánea y no de forma progresivamente amortiguada con la profundidad como era de esperar, incluso que no hubiese respuesta en los sensores profundos, como reflejan las curvas simuladas, debido a la elevada ETP de los meses veraniegos. Descartamos la presencia de caminos preferenciales para el flujo del agua a consecuencia de la instalación de los sensores pues estos han quedado siempre en la vertical de la parcela experimental y la excavación para su instalación se hizo en la dirección contraria a la que fueron instalados. Tampoco se han observado procesos de bioturbación intensa que si son frecuentes en otras zonas de la parcela, fundamentalmente debido a la acción de los conejos.

En resumen, el periodo de calibración de los sensores ha servido para asegurarse de que durante el periodo de simulación haya una influencia mínima de la alteración del terreno producida durante su instalación. Se ha observado un comportamiento anómalo en el sistema de control que consiste en

que durante el periodo de sequía parece que todo el perfil se deseca de forma brusca y prácticamente simultánea en un periodo de menos de un mes de duración. Esto no parece compatible con el comportamiento de sistemas porosos y será discutido mas adelante. Al final del periodo parece que todos los sensores activos tienden a estabilizar sus medidas y comienza el periodo de simulación propiamente dicho.

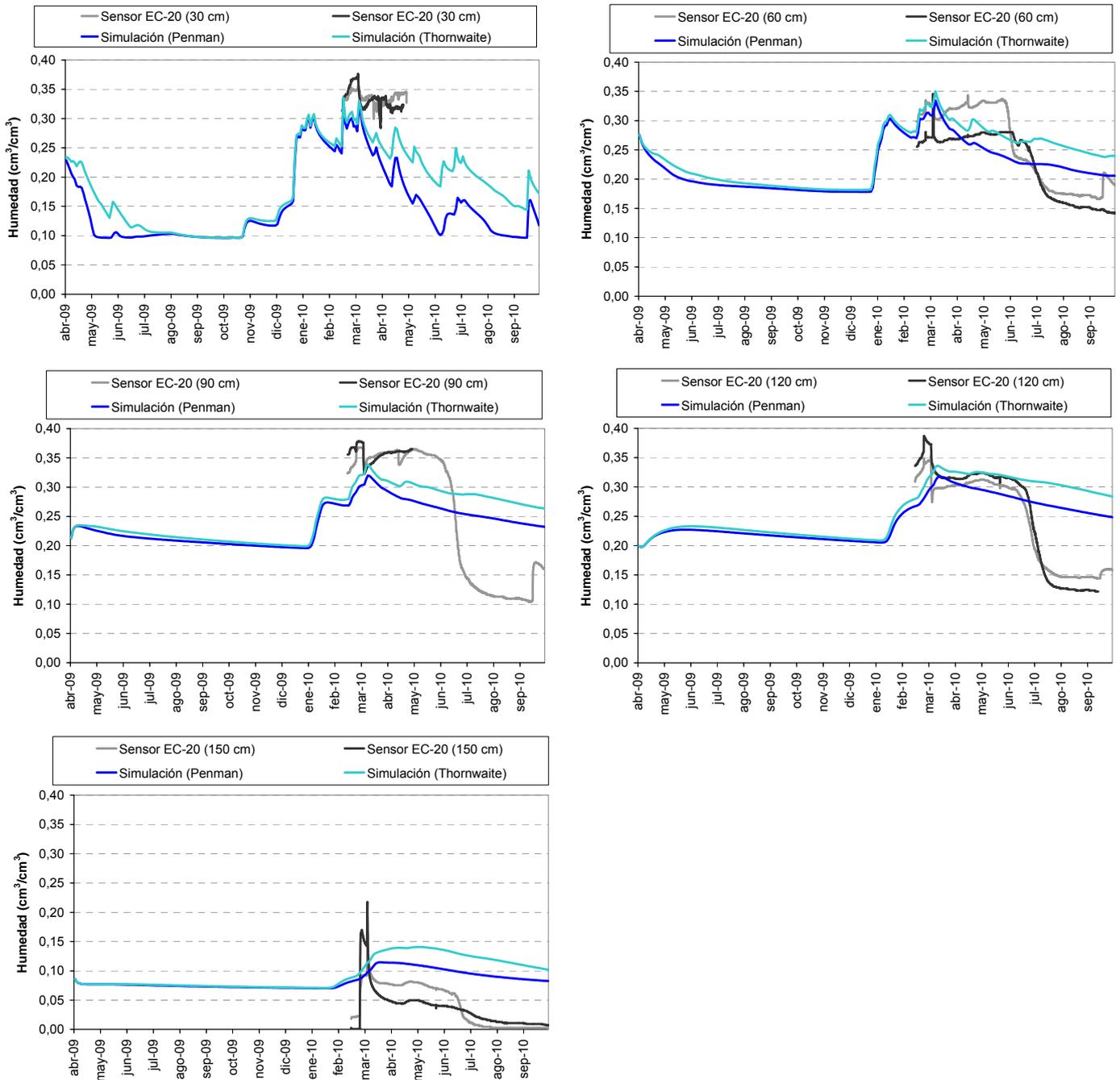


Figura 21. Presentación gráfica de la evolución de la señal de los sensores a 30, 60, 90, 120 y 150 cm durante el periodo de estabilización del sistema.

## Resultados del periodo de simulación, octubre, 2010 – octubre, 2011

En la figura 22 se presentan los resultados obtenidos en la simulación de la evolución de la humedad del suelo en el año hidrológico 2010-2011. Como el método empleado con mas frecuencia para el cálculo de la ETP es el de Thornwaite, debido principalmente a que los datos necesarios están disponibles en cualquier estación climatológica, se hizo un primer intento de ajustar el modelo a los valores de ETP calculados de esta forma. En todas las gráficas de la figura 22 se observa que empleando el método de Thornwaite siempre se produce un claro exceso de agua en todos los niveles controlados, exceso que se acentúa durante los meses de verano y es mas constante en profundidad.

Consideramos pues que Penman-Monteith es el método adecuado para el cálculo de la ETP y los comentarios que siguen se referirán únicamente a las gráficas calculadas mediante este método.

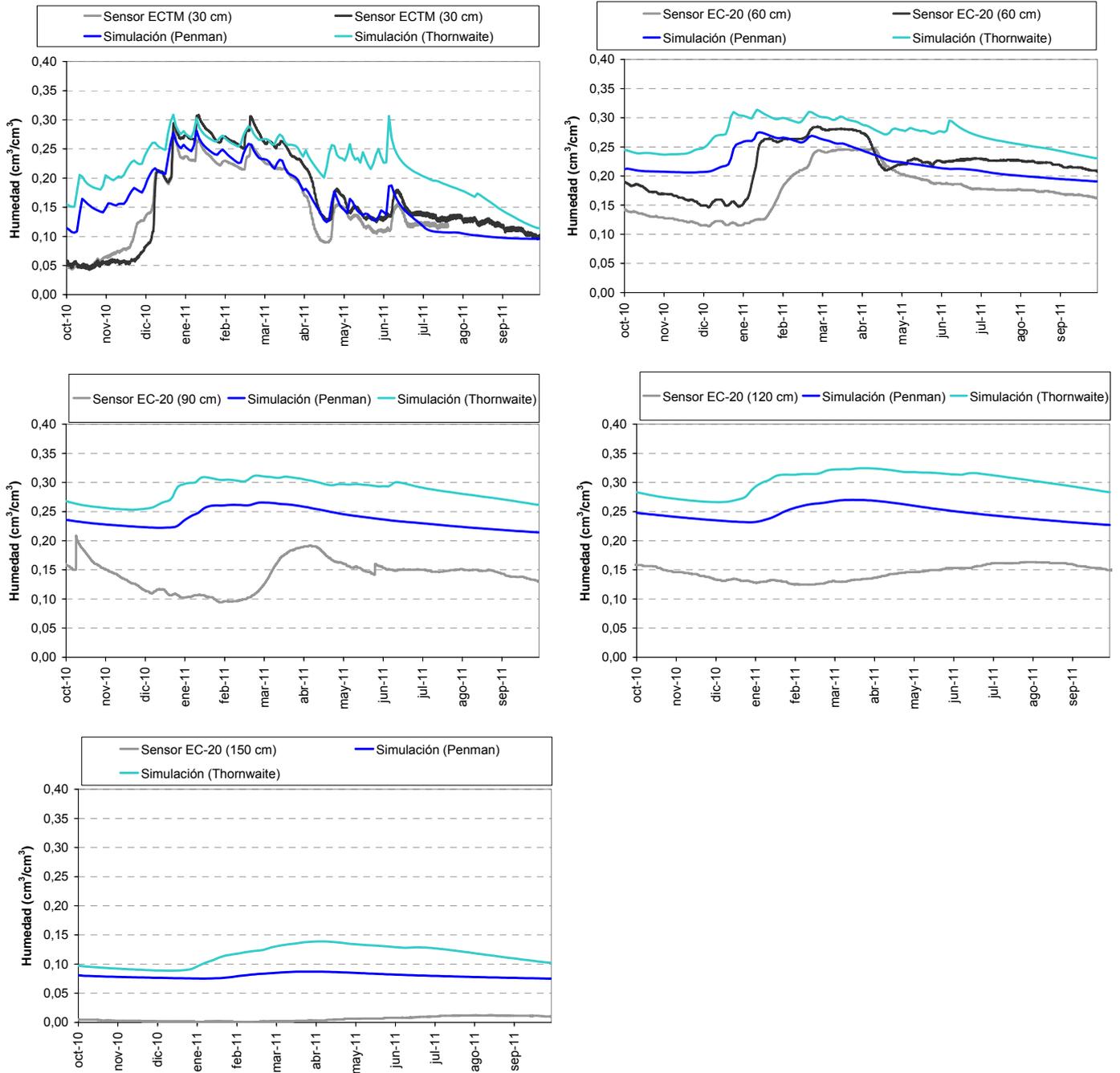
Como se puede ver en la gráfica correspondiente al sensor situado a 30 cm de profundidad, sensor que tuvo que ser reemplazado, el periodo de estabilización es muy corto, apenas dos meses, octubre y diciembre. A partir de diciembre el ajuste obtenido es muy bueno, tanto en la evolución del contenido en humedad, pendientes de las curvas de humectación desecado y tiempos de llegada del frente de humedad.

A 60 cm se han colocado dos sensores cuyo comportamiento es netamente diferente entre ellos. Claramente se observa que ya a 60 cm se produce una integración de la evolución de la humedad, se amortiguan hasta casi desaparecer los picos de lluvia y se observa un retardo entre el comienzo del periodo húmedo y la llegada del frente de humedad. El primer sensor, pintado con trazo gris claro, tiene el comportamiento esperable en un medio poroso, el retardo respecto a las lluvias es de aproximadamente dos meses, el ascenso hasta los niveles máximos es relativamente rápido, tarda aproximadamente un mes en producirse y el descenso de la humedad se produce de forma suave. El segundo sensor, pintado en trazo negro, muestra un proceso de desecación brusco, en menos de un mes, a lo largo de los meses de mayo y junio se recupera lentamente y por fin tiende a caer a los valores de sequía. En este sensor además el periodo de retardo dura aproximadamente la mitad de tiempo que en el primero y los valores de humedad están siempre por encima del mismo. La curva simulada es muy similar a la obtenida con el primer sensor, aunque la respuesta es aproximadamente un mes más temprana y siempre se observan, para puntos equivalentes, humedades entre un 2 y un 5% mas elevadas.

El sensor situado a 90 cm de profundidad muestra un tiempo de residencia de aproximadamente 4 meses, mientras que las curvas simuladas señalan a tiempo netamente inferiores, del orden de dos meses, además sorprendentemente durante el periodo de tiempo que va de mayo a marzo se produce una desecación neta del perfil, se pasa de valores de humedad del entorno al 20% a ligeramente por encima del 10%. La diferencia de humedad con la curva simulada varía entre el 5 y el 15%. Consideramos que tanto en este sensor como en los situados a 120 y 150 cm de profundidad es necesario revisar la calibración pues los valores mínimos parecen excesivamente bajos para el tipo de material monitorizado.

La discrepancia en el tiempo de residencia observado en el sensor situado a 120 cm vuelve a ser de aproximadamente dos meses referido al inicio del periodo de recuperación pero es de mas de cuatro meses para el paso del máximo de humedad, una discrepancia excesiva que no ha podido ser ajustada satisfactoriamente. Sin embargo los volúmenes de agua que son transferidos entre

compartimentos si parecen ser coherentes por lo que es de esperar que el balance total no presente errores considerables.



*Figura 22. Presentación gráfica de la evolución de la humedad a 30, 60, 90, 120 y 150 cm durante el periodo de simulación.*

En la última de las gráficas se representa la evolución de la humedad a 150 cm, como se puede observar de nuevo la mayor discrepancia está en el tiempo de residencia que es claramente subestimado en el modelo.

En la figura 23 se presenta el balance hídrico resultante del modelo en forma de valores diarios acumulados para todo el periodo de simulación, desde octubre de 2010 a octubre de 2011. En la tabla 14 se presentan los valores del balance de forma detallada.

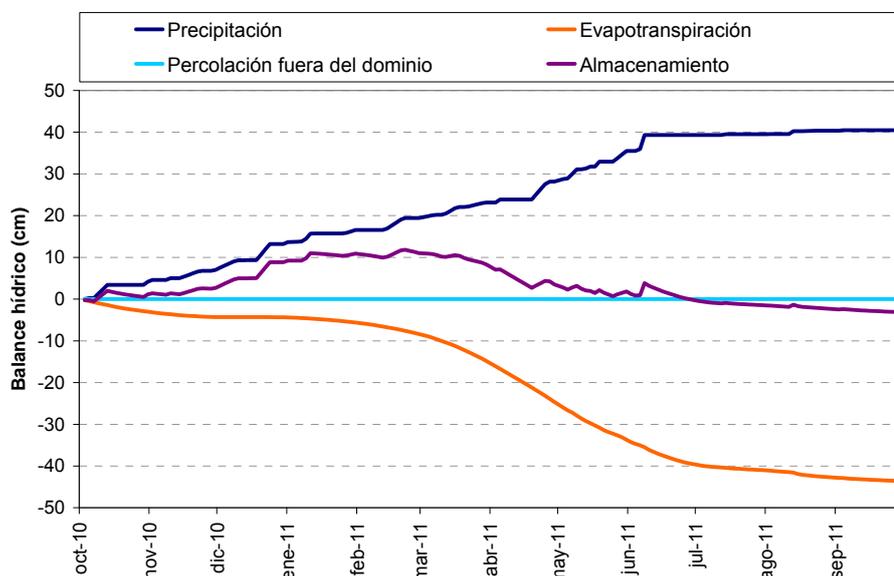


Figura 23: Balance hídrico (valores diarios acumulados) en el año hidrológico 2010/2011 según la simulación con valores de evapotranspiración potencial calculados mediante la ecuación de Penman-Monteith.

Tabla 14: Balance hídrico mensual para el año hidrológico 2010/2011 en las simulaciones con valores de evapotranspiración potencial calculados mediante la ecuación de Penman-Monteith (P) y de Thornthwaite (T).

MES	Precipitación (cm) (P,T)	Evapotranspiración (cm)		Percolación fuera del dominio (cm)		Almacenamiento (cm)	
		(P)	(T)	(P)	(T)	(P)	(T)
Octubre, 2010	4,19	-3,04	-2,38	0,00	0,00	1,15	1,81
Noviembre, 2010	2,84	-1,29	-0,98	0,00	0,00	1,54	1,86
Diciembre, 2010	6,17	-0,03	-0,04	0,00	0,00	6,14	6,13
Enero, 2011	3,35	-1,27	-0,54	0,00	0,00	2,08	2,81
Febrero, 2011	2,86	-2,75	-1,29	0,00	0,00	0,11	1,57
Marzo, 2011	3,74	-6,48	-3,67	0,00	0,00	-2,74	0,06
Abril, 2011	5,02	-9,77	-6,83	0,00	0,00	-4,75	-1,81
Mayo, 2011	7,32	-9,03	-7,86	0,00	0,00	-1,71	-0,54
Junio, 2011	3,84	-5,92	-6,22	0,00	0,00	-2,08	-2,38
Julio, 2011	0,17	-1,39	-3,54	0,00	0,00	-1,22	-3,37
Agosto, 2011	0,85	-1,79	-5,27	0,00	0,00	-0,94	-4,42
Septiembre, 2011	0,12	-0,87	-4,19	0,00	0,00	-0,75	-4,07
TOTAL año 2010-11	40,46	-43,63	-42,81	0,00	0,00	-3,16	-2,34

Como se puede observar (la convención de signos es: valores positivos entrada de agua al dominio simulado, o el almacenamiento en el mismo se incrementa) el balance de agua en el dominio es negativo, aproximadamente se pierden 3,16 cm de agua que salen por la condición de contorno superior en forma de evapotranspiración. Resulta por tanto llamativo que en un año como el representado, con lluvias ligeramente por debajo de la media, la recarga neta del acuífero en la zona simulada es nula y por tanto es de esperar que el impacto sobre el acuífero sea despreciable. A igualdad del resto de las variables climáticas y del desarrollo de la vegetación la precipitación debería superar los 43,62 cm para que hubiera exceso de agua en el suelo y flujo neto hacia el acuífero.

### **3.6 Conclusiones del modelo de zona no saturada**

Del análisis de los resultados del modelo en zona no saturada pueden extraerse las siguientes conclusiones principales:

- Únicamente es posible ajustar el modelo empleando como valores de evapotranspiración potencial los obtenidos al aplicar el método de Penman-Monteith para su cálculo. El método de Thornwaite limita, especialmente en los meses de primavera y verano el máximo de agua disponible para ser evacuada del suelo por evapotranspiración lo que termina reflejado como un exceso de agua en el sistema.
- A pesar de tratarse de un sistema aparentemente muy homogéneo se observa que en los horizontes (30 y 60 cm) en los que se han instalado sensores dobles la variabilidad en la respuesta a la lluvia es muy grande, especialmente en el sensor situado a 60 cm. La diferencia entre sensores es del orden de las diferencias entre los valores medidos y calculados.
- El ajuste obtenido en los sensores situados a 30 cm de profundidad es bueno, y permite prever con baja incertidumbre la evolución de humedad y tiempo de tránsito.
- Los resultados obtenidos a 60, 90 y 120 cm muestran una respuesta claramente adelantada de los valores simulados sobre los valores medidos que oscila entre 2 y 4 meses. La razón lógica a un comportamiento de este tipo es la existencia de caminos preferentes o porosidad secundaria que no se ha observado.
- Los valores de drenaje concuerdan con la evolución de humedad del sensor a 150 cm y muestran que únicamente en años de pluviometría superior a la media existe recarga eficaz y por tanto lixiviación de contaminantes hacia las aguas subterráneas.
- En el periodo simulado se observa una pérdida de almacenamiento muy pequeña, únicamente en años húmedos se almacena agua en el suelo.
- Los valores de humedad medidos en los sensores profundos (tipo EC20) se encuentran en todos los casos por debajo de los valores simulados, probablemente se deba a un problema de calibración que es necesario corregir.

## Referencias:

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje (cuaderno 56). FAO, Roma, 2006. Descarga en: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e06.htm>

Campbell, G.S. y Norman, J.M. An Introduction to Environmental Biophysics (2ª Ed.), Springer-Verlag, New York, 1998, 286p.

Daamen, C.C. y Simmonds L.P. Measurement of evaporation from bare soil and its estimation using surface resistance, *Water Resources Research*, 1996, 32, 1393–1402.

Kondo, J., Saigusa, N. y Sato, T. A parameterization of evaporation from bare soil surfaces, *J. Appl. Meteorol.*, 1990. 29, 385–389.

Lappala, E.G., Healy, R.W. y Weeks, E.P. Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media. U.S. Geological Survey, Denver (CO), 1987, 184 p.

Monteith, J.L. Gas exchange in plants communities. *Environmental control of plant growth* (L.T. Evans, ed.). Academic Press, New York, 1963, pp. 95-112.

Penman, H. L. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193, 120-145.

Thornthwaite, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 1948, 38 (1), 55-94.

Van de Griend, A. y Owe, M. Bare soil surface resistance to evaporation by vapor diffusion under semiarid conditions. *Water Resources Research*, 1994, 30, 181-188.