

# ACADEMIA DE CIENCIAS DE LA REGIÓN DE MURCIA

## EL AGUA COMO FUERZA MOTRIZ DE LAS PLANTAS

Discurso de Ingreso leído por el Académico Electo

**Ilmo. Sr. D. Juan José Alarcón Cabañero**

en el acto de la Sesión Solemne de su Toma de Posesión como  
Académico de Número, celebrado el día 3 de Diciembre de 2020 y

Discurso de contestación a cargo de la Académica de Número

**Ilma. Sra. Dña. Francisca Sevilla Valenzuela**



Academia  
asociada al  
Instituto de  
España







Academia de Ciencias de la Región de Murcia

## **EL AGUA COMO FUERZA MOTRIZ DE LAS PLANTAS**

Discurso de Ingreso leído por el Académico Electo

**Ilmo. Sr. D. Juan José Alarcón Cabañero**

en el acto de la Sesión Solemne de su Toma de Posesión  
como Académico de Número, celebrado el día 3 de  
Diciembre de 2020 y Discurso de contestación a cargo  
de la Académica de Número

**Ilma. Sra. Dña. Francisca Sevilla Valenzuela**

Murcia 2020





Este discurso se ha impreso con subvención de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, a quien agradecemos su ayuda.

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de la propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y ss. del Código Penal).

© Academia de Ciencias de la Región de Murcia, 2020

© Juan José Alarcón Cabañero

ISBN: 978-84-09-25474-3

Depósito Legal: MU 895-2020

Impresión: Compobell S.L., Murcia

# **El agua como fuerza motriz de las plantas**

**Discurso de Ingreso leído por el Académico Electo Ilmo. Sr.  
D. Juan José Alarcón Cabañero**



**Excelentísimo Sr. Presidente de la Academia de Ciencias de la Región de Murcia.**

**Ilustrísimo Secretario General**

**Ilustrísimos Académicos e Ilustrísimas Autoridades.**

**Queridos compañeros y amigos**

**Señoras y Señores.**

Recibir el reconocimiento a mi carrera investigadora por parte de los miembros de la Academia de Ciencias de la Región de Murcia es un gran privilegio, y poder compartir el título de académico de número con los grandes referentes de la Ciencia de la Región, es un gran honor para mí al que espero poder corresponder en su justa medida.

Mi agradecimiento, por tanto, a todos los miembros de la Academia por su apoyo y distinción, y mi recuerdo especial para un académico que nos dejó recientemente como es D. Félix Romojaro Almela, compañero y amigo del CEBAS, y miembro destacado de esta importante institución.

Hace aproximadamente un año, recibí con enorme entusiasmo e ilusión, la noticia de mi elección como candidato para ingresar en la Academia de Ciencias de la Región de Murcia, y desde ese momento fui consciente que la lectura de mi discurso de ingreso en esta Academia, supondría uno de los momentos más relevantes de mi carrera profesional.

Los acontecimientos vividos durante este difícil año han retrasado más de lo que a todos nos hubiese gustado esta ceremonia, pero finalmente, el momento ha llegado y me siento enormemente orgulloso de poder realizar este discurso de ingreso en el marco de las instalaciones de mi Universidad. Mi agradecimiento a todos los que habéis tenido oportunidad de acompañarme presencialmente en este Salón de Actos,

*El agua como fuerza motriz de las plantas*  
*Juan Jose Alarcón Cabañero*

y también mi agradecimiento para todos aquellos que por motivo de la pandemia estáis compartiendo este importante acto por medio de la transmisión en directo. Me siento igualmente acompañado por todos vosotros.

En un día tan importante para mí, son muchas las emociones que se vienen a la cabeza, pero sin duda alguna sobre todas esas emociones impera el sentimiento general de agradecimiento.

Agradecimiento a todos los académicos por haber pensado en mí para esta importante responsabilidad, a los miembros de la Academia del CEBAS, D. Antonio Cerdá Cerda; D. Carlos García Izquierdo; D. Francisco Tomás Barberá y muy especialmente a Dña. Francisca Sevilla Valenzuela por proponerme como candidato y realizar el discurso de contestación.

Agradecimiento hacia todos mis compañeros del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. He tenido la suerte de desarrollar toda mi carrera científica en un Centro que apuesta por la excelencia investigadora, y en donde el trabajo bien hecho suele ser recompensado. Lejos están aquellos días en los que me incorporé con una beca predoctoral a un Instituto del CSIC, que en aquellos momentos estaba en la Avenida de la Fama, y en donde tuve la oportunidad de empezar a trabajar con muchos de los que actualmente considero mis mejores amigos y colaboradores. Lejos queda también nuestro traslado al Campus Universitario de Espinardo en el año 2000, e incluso queda lejos también el momento en que tuve el inmenso honor de ser elegido Director por votación directa de mis compañeros en el año 2012. A lo largo de todo este tiempo he sentido siempre un apoyo continuo por parte de todo el personal del CEBAS, y a todos ellos les debo, sin duda, buena parte de este reconocimiento personal que hoy recibo.

Agradecimiento especial a mis compañeros del Departamento de Riego, en el que siempre he estado ligado, y con los que comparto líneas de trabajo y fuerte lazos de amistad. Permítanme mencionar a todos los investigadores que actualmente componen el personal científico de dicho Departamento (Dña. María del Carmen

Ruiz Sánchez; D. Juan Vera Muñoz; D. Emilio Nicolás Nicolás, Dña. María Fernanda Ortuño Gallud; D. Diego Intrigliolo Molina y D. Pedro Nortes Tortosa), a los que tendría que añadir el nombre de los técnicos y contratados, tanto predoctorales como posdoctorales, que conforman un grupo de investigación compuesto por más de 25 personas. Expresamente quiero citar en estos agradecimientos a nuestra Jefa de Departamento, Dña. María Jesús Sánchez Blanco, no sólo en calidad de su rango profesional e institucional sino principalmente en función de su calidad humana. Son muchas las confianzas compartidas, los buenos y malos ratos vividos y desde que me incorporé al CEBAS siempre he encontrado en ella a la mejor amiga y consejera.

Agradecimiento finalmente a todos mis amigos y familia por hacerme la vida más agradable y sencilla. A Carmen, por acompañarme siempre en mis decisiones y por quererme como soy, a mis hijos (Inés, Laura y Pablo), por ser la referencia principal de mi vida; y muy especialmente a mis padres (D. José Alarcón Tello y Dña. María del Carmen Cabañero Escudero), todo lo que soy y lo que tengo (que es mucho) se lo debo a ellos, a su humildad, a su sacrificio y a su amor verdadero. Ellos son los que me animaron a venir a Murcia, desde mi pueblo natal de La Roda, a comenzar una etapa fantástica de mi vida de la que afortunadamente todavía no he despertado.

## **Introducción**

Aunque la carrera científica suele responder a vocaciones tempranas, en mi caso no recuerdo haber sentido la llamada de la ciencia en un momento concreto; antes de llegar a Murcia para comenzar mis estudios universitarios era consciente de que me gustaba la fisiología y mis notas en biología eran buenas, por lo que entendí que la Carrera de Ciencias Biológicas podía ser interesante.

Hay quien dice que muchos de los investigadores de mi generación llegaron a la Biología por el tirón de los programas de Félix Rodríguez de la Fuente, y desde luego yo no lo descarto, pero también es verdad que una vez comencé la carrera universitaria me di cuenta que la biología era una ciencia compleja y rica, y que

disciplinas como la bioquímica, la microbiología, la genética o la fisiología podían llegar también a ser tan apasionantes como aquellos añorados y fantásticos guiones del “Hombre y la Tierra”.

Una vez finalizada la licenciatura tuve la oportunidad de incorporarme con una beca predoctoral en el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. En el antiguo edificio de la Fama, que muchos de ustedes seguro recuerdan, desarrollé mi tesis doctoral bajo la supervisión de los Doctores Arturo Torrecillas y María del Carmen Bolarín. Ambos investigadores pertenecían a dos Departamentos diferentes del CEBAS, lo que sin duda me ayudó a entender una pauta que ha marcado para siempre mi carrera investigadora, la necesidad de colaborar e interactuar entre grupos y disciplinas diferentes.

### **Importancia del Agua en las Plantas. Descripción de Potencial Hídrico.**

El estudio de las relaciones hídricas en las plantas ha sido la base de toda mi carrera científica, permítanme por tanto el realizar una breve introducción sobre la importancia del agua en el mundo vegetal.

Los vegetales presentan niveles de agua muy elevados. Se estima que aproximadamente el 90% del peso fresco de la mayoría de las plantas herbáceas es agua, mientras que en las plantas leñosas el agua supone más del 50% de su peso fresco total.

Prácticamente todos los procesos fisiológicos de la planta están directa o indirectamente relacionados con el estado hídrico de la misma (Bradford y Hsiao, 1982). Esto ocurre principalmente porque el agua es fundamental para el mantenimiento de la actividad fisiológica y los procesos de transporte a través de la membrana y además el agua también proporciona el medio para el transporte a larga distancia de nutrientes y compuestos reguladores del crecimiento de las plantas. El desarrollo de todos estos procesos requiere de una entrada continua de energía libre

que puede ser cuantificada por medio de un parámetro denominado potencial hídrico ( $\Psi$ ).

Dicho parámetro termodinámicamente representa el potencial del que dispone el agua para realizar trabajo, se expresa en unidades de presión, y en definitiva es el parámetro que nos permite conocer el estado hídrico de cualquier órgano de la planta. En principio, valores de potencial hídrico bajos se asocian a situaciones de déficit hídrico, mientras que valores de potencial hídrico altos se asocian con contenidos de agua elevados, aunque esto no siempre ocurre así ya que en las plantas el potencial hídrico constituye el efecto resultante de fuerzas de orígenes diversos.

### **Movimiento del agua en la planta. Sistema continuo Suelo-Planta-Atmósfera**

La importancia central del potencial hídrico en las relaciones hídricas de las plantas radica en que el gradiente de potencial entre los distintos puntos de un sistema vegetal representa la fuerza motriz para el movimiento del agua y, por tanto, permite determinar la dirección de dicho movimiento (Jones y Tardieu, 1998).

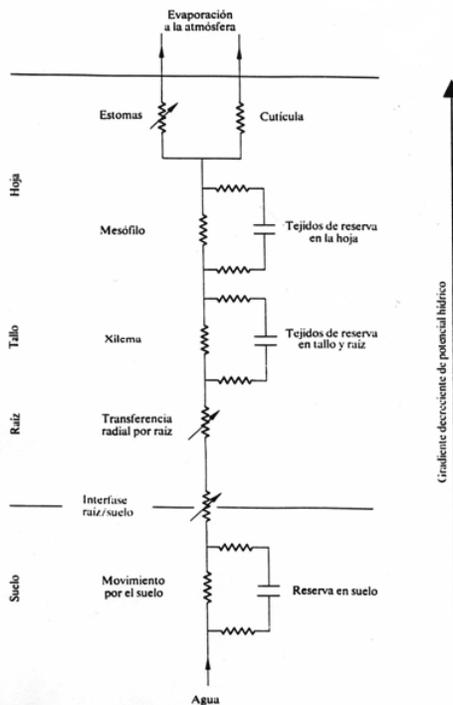
John Robert Philip en 1966 sugirió el concepto de continuo suelo-planta-atmósfera (CSPA) para explicar el movimiento de agua a través de las plantas. En este concepto se analiza el flujo de agua en los vegetales terrestres como un proceso dinámico a lo largo de una serie de compartimentos, en donde el agua normalmente se mueve desde la fuente existente en el suelo, hasta el sumidero final que sería la atmósfera.

El movimiento de agua en la planta es, por tanto, un proceso que transcurre a lo largo de una compleja red de pequeños vasos capilares que conforman el sistema hidráulico de la planta. Este sistema es similar en su concepción y funcionamiento al del flujo eléctrico a través de un sistema conductor (Figura 1), en donde el movimiento del agua a través del Continuo Suelo Planta Atmósfera se puede asociar a un conjunto de resistencias hidráulicas conectadas en serie o en paralelo, en donde la intensidad del flujo del agua, siguiendo la ley de Ohm, podría ser directamente

*El agua como fuerza motriz de las plantas*  
*Juan Jose Alarcón Cabañero*

proporcional a las diferencias en el potencial hídrico de las diferentes partes de la planta e inversamente proporcional a las resistencias hidráulicas que el flujo de agua encuentra en su camino a través de las membranas y paredes celulares del sistema radicular, del tallo o de la hoja.

A su vez esta analogía eléctrica puede conducir a sistemas de ecuaciones más complejos, en donde se pueden incorporar capacitancias que vendrían definidas por la capacidad del almacenamiento de agua en un determinado órgano.



**Figura 1. Esquema de flujo de agua a través del Sistema Continuo Suelo-Planta-Atmósfera (Tyree *et al.*, 2000)**

## **El déficit hídrico en las plantas.**

El estado hídrico de un vegetal es, por tanto, el resultado del equilibrio dinámico entre la demanda de agua por la atmósfera y su disponibilidad en el suelo para las raíces. Cuando la demanda supera la disponibilidad, se habla de déficit o estrés hídrico. Hay toda una serie de factores que influyen en el balance hídrico vegetal y que por lo tanto determinan situaciones de déficit hídrico en las plantas, y a su vez hay toda una amplia variación de respuestas fisiológicas en las distintas especies y variedades vegetales que nos abren el camino para la búsqueda de plantas tolerantes a situaciones de estrés.

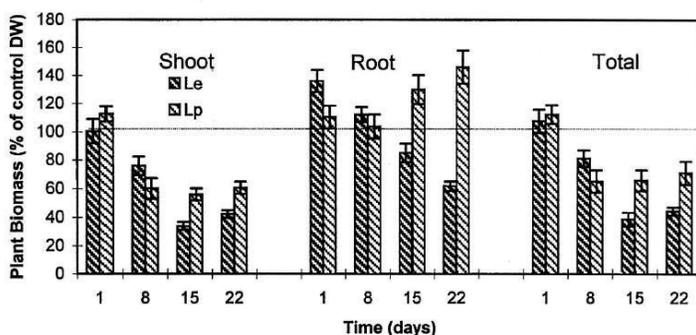
Buena parte de mi carrera científica se ha centrado en el estudio de los efectos que algunos estreses propios del Área Mediterránea, como son la escasez de agua y la salinidad, tienen sobre el comportamiento de las plantas, permítanme exponer algunos de estos efectos y la variabilidad de respuestas que ofrecen las plantas ante estas situaciones de estrés.

## **Efecto del déficit hídrico sobre el crecimiento y el desarrollo vegetativo**

Uno de los principales efectos del déficit hídrico sobre las plantas es la disminución del crecimiento de la parte aérea y el desarrollo vegetativo (Anyia y Herzog, 2004). Generalmente, cuando el agua no es un factor limitante, las plantas invierten una fracción importante de fotoasimilados en la expansión de tejidos fotosintéticos, maximizando la interceptación de luz y, como consecuencia, el crecimiento foliar (Fischer y Turner, 1978). Sin embargo, las condiciones de estrés hídrico pueden afectar el patrón de reparto de fotoasimilados en la planta, resultando una disminución de la fracción atribuida a las hojas en favor de otros órganos como las raíces (Maroco *et al.*, 2000).

Existen numerosos resultados que ponen de manifiesto que uno de los mecanismos adaptativos más comunes desarrollados por plantas tolerantes al déficit hídrico es la reducción del crecimiento de la parte aérea y el desarrollo de sistemas radiculares más

densos y robustos capaces de extraer el agua en sustratos de suelo más profundos. Trabajando con diferentes genotipos de tomate tolerantes y sensibles al déficit hídrico, comprobamos que el efecto acumulado del estrés hídrico a lo largo del tiempo reduce la biomasa vegetal de la parte aérea en ambos genotipos, pero incrementa significativamente el tamaño del sistema radicular en la especie más tolerante (Figura 2) (Sánchez-Blanco *et al.*, 1991; Alarcón *et al.*, 1993; Pérez-Alfocea *et al.*, 2000).



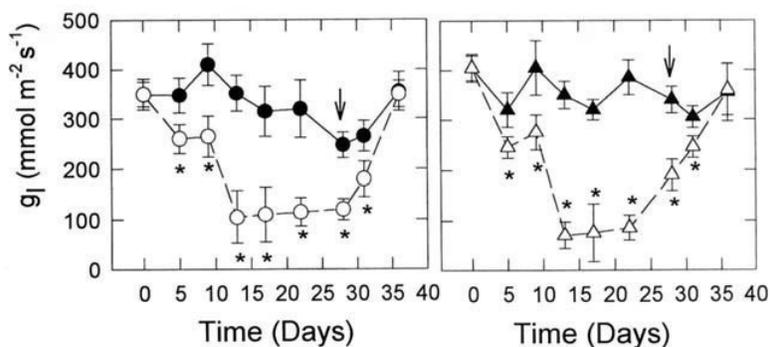
**Figura 2. Efectos acumulados del estrés sobre la biomasa de plantas de tomate tolerante (Lp) y sensible (Le) al déficit hídrico (Pérez Alfocea *et al.*, 2000)**

### **Efecto del déficit hídrico sobre la transpiración**

Otro de los efectos más conocidos provocados por el déficit hídrico es la reducción de las pérdidas de agua por transpiración. La abscisión o caída parcial de las hojas y la consecuente reducción de la superficie foliar de la planta representan uno de los mecanismos adaptativos de tolerancia a la sequía más importantes en las comunidades vegetales de las regiones áridas (Ferreter, 1984). El resultado final es una menor superficie evaporante que permitirá mantener la economía hídrica de la planta. Otras adaptaciones morfológicas de las hojas, como cambios de orientación, formación de hojas más pequeñas y enrollamiento o epinastia foliar, también suelen ser mecanismos vinculados con la respuesta adaptativa de las plantas al estrés hídrico

(Lafitte *et al.*, 2007). Nuestros estudios sobre almendro permitieron observar una importante reducción de la radiación interceptada en árboles sometidos a períodos de déficit hídrico severo, debido al enrollamiento y epinastia foliar y a la caída de hojas (Ruiz Sánchez *et al.*, 1993).

Pero además de la reducción de la superficie foliar, el cierre estomático es el principal proceso implicado en la limitación de las pérdidas de agua por transpiración. En estudios realizados sobre plantas hortícolas como tomate, y en cultivos leñosos como almendro, albaricoquero y limonero pudimos observar que por medio del cierre estomático controlado, la planta limita las pérdidas de agua por transpiración mientras que mantiene una cierta tasa de asimilación de carbono, lo que impide que el potencial hídrico foliar alcance valores demasiado bajos que afecten negativamente al sistema hidráulico de la planta (Figura 3) (Torrecillas *et al.*, 1996; Rodríguez *et al.*, 1997; Nicolás *et al.*, 2005; Ortuño *et al.*, 2006a).

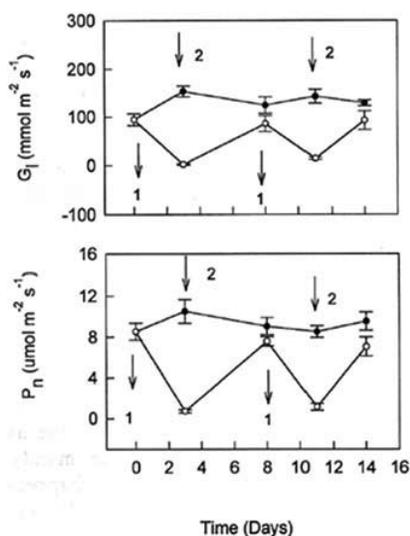


**Figura 3. Evolución estacional de la conductancia estomática en dos variedades de almendro (Garrigues y Ramillete) sometidos a dos tratamientos de riego distintas. Árboles bien regados (círculos cerrados), árboles con déficit hídrico (círculos abiertos). (Torrecillas *et al.*, 1996)**

### **Efecto del déficit hídrico sobre la fotosíntesis**

El estrés hídrico puede reducir significativamente también la tasa de asimilación neta y la productividad de los cultivos. Tanto en almendro (Rouhi *et al.*, 2007) como en

otras especies leñosas (Cifre *et al.*, 2005), se ha podido observar una estrecha correlación entre conductancia estomática y la tasa de fotosíntesis foliar. Debido a esta correlación, se ha admitido que la disminución de la fotosíntesis como consecuencia del estrés hídrico era mediada principalmente por el cierre estomático. Y efectivamente este puede ser el mecanismo principal de limitación de la fotosíntesis en situaciones de estrés moderado como el que observamos trabajando con algunas especies ornamentales como *Argyranthemum coronopifolium* (Figura 4) (De Herralde *et al.*, 1998).



**Figura 4. Efecto de dos ciclos de déficit hídrico y recuperación sobre conductancia estomática ( $G_i$ ) y fotosíntesis ( $P_n$ ) en plantas de *Argyranthemum coronopifolium* (De Herralde *et al.*, 1998).**

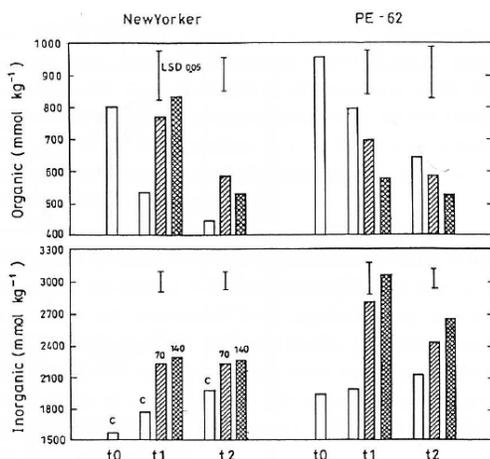
Sin embargo, en situaciones de estrés hídrico más severo la hipótesis de una limitación de tipo metabólica de la fotosíntesis adquiere hoy en día mayor fuerza (Flexas *et al.*, 2004). Se ha demostrado que el estrés hídrico puede afectar los procesos de fotofosforilación y síntesis de ATP (Tezara *et al.*, 1999), la regeneración de la ribulosa 1,5-bisfosfato (RuBP) (Giménez *et al.*, 1992) y la actividad de la Rubisco (Medrano *et al.*, 1997), y en nuestros estudios también comprobamos que

determinados tipos de estrés, como el producido por altas temperaturas, a pesar de generar una clara apertura estomática, también afectaba de forma importante al proceso del Ciclo de Calvin reduciendo la eficiencia fotosintética del Fotosistema II (Camejo *et al.*, 2004; 2005; 2010).

### **Efecto del déficit hídrico sobre el ajuste osmótico**

Otro efecto muy relevante del déficit hídrico es el desarrollo de procesos de ajuste osmótico, que consisten en una disminución del potencial hídrico en los tejidos vegetales como consecuencia de la osmorregulación. El ajuste osmótico se da en las plantas a través de la biosíntesis de osmolitos orgánicos de bajo peso molecular como azúcares, aminoácidos libres y sus derivados, y también se puede producir por la acumulación de iones (Cushman, 2001).

La osmorregulación a partir de la absorción de iones presentes en el medio es más rentable energéticamente que a partir de la síntesis de solutos orgánicos. Además, la acumulación de iones durante el ajuste osmótico ocurre principalmente en la vacuola, mientras que en el citoplasma se acumulan los solutos que no afectan negativamente a la funcionalidad de macromoléculas celulares (Blumwald *et al.*, 2000). Esto explicaría algunos de los mecanismos de tolerancia que presentan las plantas frente al estrés salino, basados en la capacidad para absorber iones desde el medio radicular y acumularlos en vacuolas celulares evitando posibles efectos tóxicos. Estudiando los procesos de osmorregulación en plantas con diferente tolerancia a la salinidad pudimos observar como los genotipos más tolerantes eran capaces de realizar procesos de ajuste osmótico utilizando los iones absorbidos del medio, mientras que las especies menos tolerantes, carecen de la posibilidad de absorber iones y si lo hacen no son capaces de aislarlos en las vacuolas por lo que sufren importantes efectos tóxicos (Figura 5) (Alarcón J.J., 1992; Alarcón *et al.*, 1994; Torrecillas *et al.*, 1995; Sánchez Blanco *et al.*, 1998; Alarcón *et al.*, 1999).



**Figura 5. Efectos del estrés salino sobre la acumulación diferencial de solutos orgánicos e inorgánicos en hojas de dos genotipos de tomate con diferente tolerancia a la salinidad. NewYorker (sensible), PE-62 (tolerante) (Alarcón *et al.*, 1994)**

### **Transmisión de señales en las plantas.**

Como ya he dicho anteriormente, durante buena parte de mi etapa predoctoral conseguimos caracterizar el comportamiento hídrico de las plantas ante situaciones de estrés, observando, por ejemplo, como las variedades de tomate más tolerantes al estrés salino eran capaces de realizar procesos de ajuste osmótico utilizando los iones salinos existentes en el medio, o como las variedades resistentes al déficit hídrico de almendro eran capaces de ajustar sus niveles de transpiración y pérdidas de agua sin que su capacidad fotosintética se viese sensiblemente afectada.

Pero en el marco de mi especialización hacía el conocimiento de las relaciones hídricas de las plantas, pude observar que en los inicios de los años noventa había un debate científico de máximo interés en torno al papel que juega el agua en los procesos de transmisión de información. Los mejores investigadores que abordaban este tipo de estudios se encontraban en Inglaterra y por ello solicité una beca postdoctoral para trabajar en el Horticulture Research International en Wellesbourne

(un pueblecito cercano a Birmingham y en el área de influencia de la prestigiosa Universidad de Warwick) y allí me incorporé durante dos años al equipo de trabajo dirigido por el Profesor de Investigación Mike Malone.

Permítanme, aunque ello suponga dejar brevemente el discurso científico que estoy desarrollando, el realizar un pequeño homenaje póstumo a este investigador con el que pude valorar la importancia del “saber por el saber”, sin más pretensiones aplicadas que entender y conocer, en este caso, el fundamento básico de la transmisión de información a través de las plantas, y utilizando para ello el ingenio de un investigador especial que entendía la ciencia más como un juego que como una profesión.

Volviendo nuevamente a la charla científica, y para introducir brevemente el motivo que me llevo a pasar dos años de mi vida en esta pequeña localidad cercana a Stratford upon Avon (la cuna de Shakespeare) les comentaré que a diferencia de lo que ocurre en el reino animal, las respuestas de las plantas ante los cambios ambientales no suelen ser tan rápidas y evidentes. Sin embargo, es claro que las plantas tienen capacidad de respuesta y para ello necesitan, al igual que los animales, sistemas perceptores de estímulos y sistemas de transmisión de información que permitan una respuesta global y coordinada.

La naturaleza de este sistema de transmisión todavía es desconocida, pero en nuestra opinión el flujo del agua en la planta podría desempeñar este papel, ya que dicho flujo permite un contacto rápido entre los diferentes órganos del vegetal. Por lo tanto, cuando nos planteamos el estudio de las necesidades hídricas de las plantas, no solamente debemos pensar en el agua como un elemento puramente estructural, sino que debemos pensar también en el papel que juega el agua desde un punto de vista dinámico como sistema de comunicación entre los diferentes tejidos y órganos vegetales.

## **Señales hidráulicas generadas ante un daño mecánico.**

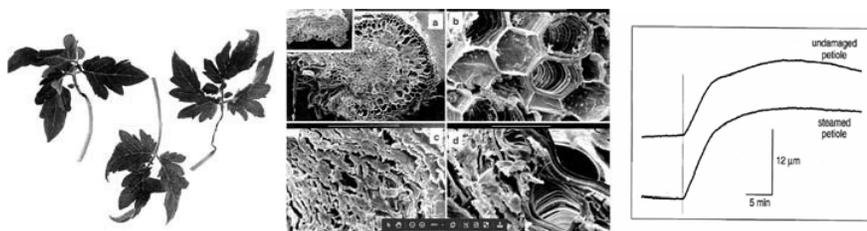
Uno de los fenómenos más estudiados dentro de esta área de trabajo es la respuesta de las plantas ante un daño mecánico localizado. Green y Ryan, 1973, trabajando con plantas de tomate, observaron que cuando una planta sufre un daño mecánico en una de sus hojas, lo que en la naturaleza suele ser producido por la acción de los insectos, en el resto de la planta se origina una inducción de inhibidores de proteinasas. Esto es interpretado por muchos autores (Orozco-Cárdenas *et al.* 1993) como un mecanismo de defensa, ya que los inhibidores de proteinasas afectan al sistema digestivo de los insectos y estos prefieren comer sobre una planta sana que sobre una planta que ya ha sido dañada.

Es evidente que se necesita algún tipo de agente que viaje a través de la planta y que permita la inducción de inhibidores de proteinasas en lugares distintos a donde el daño mecánico ha sido realizado. Este agente fué llamado por Ryan (1974), Proteinase Inhibitor Inducing Factor (PIIF).

Hay autores que opinan que este agente es una señal de tipo eléctrico. De hecho, Wildon *et al.*, 1992, observaron importantes cambios en los potenciales de acción de membrana a lo largo de una planta cuando esta sufría un determinado estrés. Hay otros autores que creen que dicho agente tiene naturaleza química. Pearce *et al.*, 1991, comprobaron que ciertos fragmentos pécticos producían la inducción de inhibidores de proteinasas cuando eran aplicados directamente sobre el material vegetal. Ambas teorías desde un punto de vista formal son lógicas y coherentes, pero tienen problemas para explicar algunos resultados experimentales que nosotros planteamos. Concretamente, en un trabajo que tuvimos la oportunidad de publicar en *Planta* en el año 1995, fué demostrado que este agente transmisor de señales puede atravesar zonas muertas de la planta, algo que no sería posible si su naturaleza fuese eléctrica o química.

Para generar zonas muertas en las plantas, lo que hicimos fue quemar peciolo de las hojas en donde posteriormente íbamos a estudiar la transmisión de señales. En la figura 6 podemos observar fotografías en las que se aprecian hojas con peciolo sanos y también otras con peciolo quemados. También podemos observar por medio del microscopio electrónico un corte transversal tanto de secciones de peciolo sanos como de quemados, viendo que la única estructura que mantenía su funcionalidad en estos últimos eran las traqueidas del xilema compuestas por células muertas.

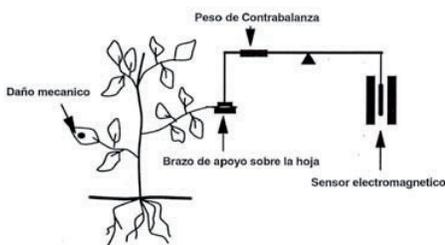
Nuestra teoría apostaba porque la señal capaz de generar inhibidores de proteinasas en lugares distantes de las plantas a donde se realizaba el daño mecánico, era un flujo de masa de agua que se mueve a través del xilema poniendo en contacto los diferentes órganos y tejidos (Malone *et al.*, 1994; Alarcón y Malone, 1995a). Esta teoría sí que es coherente con la transmisión de la señal a través de zonas muertas, ya que el xilema, como hemos dicho anteriormente, se mantiene funcional en este tipo de tejidos quemados, permitiendo el paso del agua y el engrosamiento de las hojas tanto en los peciolo quemados como en los que no lo estaban.



**Figura 6. Peciolo sanos y quemados en hojas de tomate. Imagen del mantenimiento funcional de las traqueidas del xilema en peciolo quemados. Similitud en la transmisión de señales hidráulicas observada en hojas con peciolo quemados y hojas de peciolo sanos. (Malone y Alarcón, 1995).**

## ¿Qué se entiende por señal hidráulica ?

Malone (1993) afirma que cualquier flujo de agua originado en la planta puede convertirse en una señal hidráulica capaz de transmitir información, por tanto las señales hidráulicas pueden transmitirse a través de la fase continua de agua en el apoplasto, pueden transmitirse también a través de las membranas celulares e incluso en el interior de cualquier célula hidratada. Sin embargo, solamente aquellos flujos de agua que se generan a través del xilema pueden moverse rápidamente y hacia puntos muy distantes, permitiendo de esta forma el desarrollo de respuestas fisiológicas coordinadas ante determinados cambios ambientales.



**Figura 7. Batería de transductores midiendo variaciones de grosor en hojas de tomate**  
**Esquema del uso de los transductores de grosor foliar para medir la transmisión de**  
**señales hidráulicas desde el lugar donde se produce el daño mecánico hasta hojas**  
**distantes de la planta.**

El movimiento de estos flujos de agua a través de las plantas requiere medidas de alta resolución de la cinética de las relaciones hídricas, algo que no es posible por medio de la aplicación de técnicas convencionales. Para medir la transmisión de señales hidráulicas utilizamos una herramienta novedosa denominada transductores de grosor foliar (Alarcón y Malone, 1994). Estos transductores están formados por un sistema de balanza con dos brazos diferentes, en uno de los brazos se encuentra un sensor de desplazamiento lateral, mientras que el otro brazo se encuentra apoyado sobre la hoja cuyo grosor queremos medir, de tal manera que cualquier variación de

grosor en la hoja (por mínima que sea) producirá un movimiento en el sensor que nosotros podremos registrar (Figura 7).

Utilizando esta técnica se demostró la transmisión de señales hidráulicas en un amplio rango de plantas y bajo diferentes condiciones ambientales ante situaciones de estrés por daño mecánico (Boari y Malone, 1993), con lo que quedaba claro que la transmisión de este tipo de señales no es algo exclusivo de una determinada variedad o especie, sino que es extensible a todo el reino vegetal.

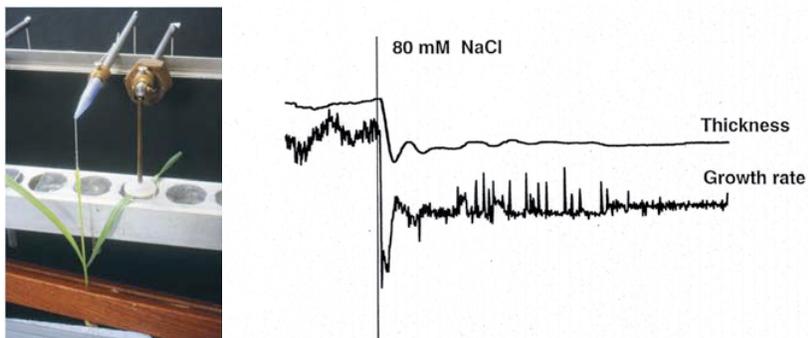
### **Señales hidráulicas generadas ante un déficit hídrico.**

Era evidente el papel que juegan las señales hidráulicas ante un daño mecánico localizado, pero ¿hasta qué punto estas señales participan en otro tipo de respuestas al estrés? En este sentido, tal y como ya hemos comentado anteriormente, uno de los procesos fisiológicos más estudiados en la respuesta de la plantas es el déficit hídrico. Las plantas suelen responder ante esta situación de déficit hídrico disminuyendo su conductancia estomática, su nivel de transpiración y lo que es más importante desde un punto de vista agrario, disminuyendo su crecimiento y producción. La mayor parte de estas respuestas se observan en la parte aérea del vegetal, aunque tienen su origen en la disminución del potencial hídrico en el suelo. Por lo tanto, es evidente que se debe de producir algún tipo de comunicación o señal entre la raíz y la parte aérea que permita responder a toda la planta ante un estímulo que sólo se percibe de forma directa a nivel radicular.

Durante muchos años se aceptó de forma general que cuando el potencial hídrico del suelo disminuye, la absorción de agua a nivel radicular es menor y por ello el potencial hídrico foliar también disminuye, siendo esta perturbación en el estado hídrico de la planta la causa por la que se originan todos los procesos a nivel de parte aérea que ya hemos descrito anteriormente (Kramer, 1969). Se trata por tanto de una teoría clásica, según la cual es el turgor foliar el que regula el crecimiento de la planta en suelos con un potencial hídrico bajo. Sin embargo, hasta comienzos de la década

de los noventa nadie había demostrado de forma evidente la correlación existente entre el comportamiento del turgor foliar y el crecimiento de las hojas.

Utilizando la técnica anteriormente descrita de los transductores de grosor foliar , debidamente ajustada para trabajar sobre trigo sometido a un shock osmótico, a diferencia de lo observado por otros autores, nosotros si pudimos confirmar una perfecta correlación en el comportamiento del turgor y el crecimiento foliar (Figura 8) (Alarcón y Malone, 1995b; 1995c). Ambos parámetros disminuían drásticamente por efecto de la aplicación de las sales en las raíces, y se recuperaban parcialmente alcanzando valores estacionarios aproximadamente dos horas después de la aplicación del estrés, por lo que llegamos a la conclusión de que las señales que se establecen entre la raíz y el tallo ante una situación de estrés hídrico o salino tienen una naturaleza fundamentalmente hidráulica.



**Figura 8. Uso de los transductores de grosor para medir simultáneamente el crecimiento y el turgor/grosor foliar en una planta de trigo sometida a shock osmótico (80 mM NaCl). La disminución de los valores en ambos parámetros a nivel foliar ante la aplicación de sales en la raíz demuestra la participación de señales hidráulicas en este tipo de estrés (Alarcón y Malone, 1995c).**

## **Mejora en la eficiencia del uso del agua en la agricultura de zonas áridas.**

Una vez finalizada mi etapa postdoctoral en Inglaterra me reincorporé nuevamente al Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura en Murcia, y no tardé mucho tiempo en darme cuenta que todos los estudios realizados para conocer el estado hídrico de las plantas tenían una aplicación práctica muy relevante.

A pesar de que en la tierra hay más de 1400 Km<sup>3</sup> de agua, la mayor parte de ella no es agua dulce, e incluso buena parte de la que lo es, se encuentra a gran profundidad en el subsuelo o formando parte de los glaciares y casquetes polares. Se trata por tanto de un recurso limitado a nivel mundial, y muy escaso en algunas zonas áridas o semiáridas como las propias del clima Mediterráneo.

Las perspectivas que nos ofrece el fenómeno de cambio climático, con situaciones de sequía cada vez más frecuentes; y el continuo crecimiento de la población mundial están produciendo una presión sin precedente para reducir la parte de agua dulce utilizada en la agricultura de regadío. En este contexto, muchos países dan prioridad a la asignación del agua al sector doméstico, y la agricultura está pasando a un segundo o tercer plano. Esto crea un conflicto que debería ser resuelto y aliviado buscando nuevas fórmulas y estrategias de agricultura y riego sostenible. Y en este sentido, desde un punto de vista agronómico, y teniendo en cuenta las características específicas de clima y producción que se dan en la Región de Murcia, dos son los aspectos que nos han interesado fundamentalmente a lo largo de estos últimos años en relación a la optimización del uso del agua en la agricultura, por una parte el desarrollo de estrategias de riego de precisión, con la inclusión de la planta como “sensor” de las necesidades hídricas del cultivo, y por otra parte la aplicación de estrategias de riego deficitario controlado que permitan ahorrar agua en los ecosistemas de regadío.

Nuestro objetivo fundamental con ambos tipos de aproximaciones es el aumentar la productividad del agua de riego con un manejo adecuado del mismo, ya que el reto que nos debemos plantear como sociedad avanzada y comprometida con el medio

ambiente no debe ser incrementar de manera insostenible nuestros sistemas de producción agrícola intensiva, sino compatibilizar la necesidad que tenemos de producir alimentos con un uso eficiente de los recursos hídricos disponibles, o dicho de otro modo, en las nuevas prácticas de riego actuales no basta con poner agua a los cultivos para que estos incrementen su producción respecto al secano, el riego debe ser programado y optimizado al máximo en función de la cantidad de agua que tenemos disponible.

### **Riego de Precisión. Uso de indicadores del estado hídrico en continuo.**

En esta línea de actuación a la que hemos hecho referencia, mediante el riego de precisión realizamos procesos de diagnóstico del estado hídrico de las planta que nos permiten ajustar la programación del riego a las necesidades reales del cultivo.

Para realizar este diagnóstico de precisión es necesario utilizar indicadores fiables del estado hídrico de las plantas como los que ya hemos definido previamente al hablar del potencial hídrico foliar o los niveles de conductancia estomática. Pero este tipo de parámetros tienen una limitación fundamental a la hora de ser utilizados como sensores de estrés hídrico para el manejo del riego. Las medidas de potencial hídrico foliar se llevan a cabo, principalmente, con cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965) o con psicrómetros de termopar (Brown, 1976), mientras que la conductancia requiere técnicas de porometría. Todos ellos son métodos que sólo permiten registros puntuales, normalmente destructivos y de muy difícil automatización.

Sin embargo, en la actualidad se están desarrollando nuevas tecnologías que permiten obtener registros continuos de la situación hídrica de la planta por medio de sistemas operativos perfectamente adaptables al manejo de la programación del riego. A continuación describiré algunos de estos métodos, cuyo uso se ha ido extendiendo en los últimos años, tanto para hacer valoraciones en continuo de estudios ecofisiológicos como para programar el riego en plantas cultivadas.

## **Medidas micromorfométricas del diámetro del tronco.**

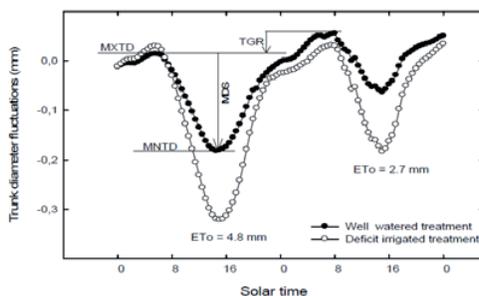
Una de las metodologías que permiten obtener registros continuos y automatizados de la situación hídrica de las plantas es la utilización de los transductores de grosor a nivel de tronco. Dicha técnica se fundamenta en los estudios realizados por Garnier y Berger, 1986, que observaron que las variaciones en el diámetro del tronco en un árbol están estrechamente relacionadas con el estrés hídrico de la planta.

Estos sistemas de medida están compuestos por un portasensor de aluminio que mantiene fija la estructura, una aguja encolada en el tronco que se mueve conforme varía el diámetro del mismo, y la bobina central o sensor propiamente dicho que está perfectamente fijado al portasensor (Figura 9). En este caso, es el movimiento de la aguja con respecto a la bobina lo que genera unas variaciones electromagnéticas registrables, que nos dan una idea de las variaciones sufridas en el grosor del tronco.

Las variaciones estacionales del diámetro del tronco dependen principalmente del proceso de crecimiento, pero a escala diaria también ocurren ciclos de contracción y expansión del diámetro del tronco principalmente a causa de los cambios de contenido de humedad de los tejidos de la planta. Según Irvine y Grace (1997), más del 90 % de las fluctuaciones diarias del diámetro del tronco tienen lugar en los tejidos del floema. Durante el día, cuando el potencial hídrico va disminuyendo, tiene lugar una difusión radial de agua de los tejidos de la corteza hacia el xilema, generando una reducción progresiva del diámetro. Durante la tarde, la absorción de agua por la planta supera las pérdidas por transpiración, por lo que se produce una recuperación del potencial hídrico del xilema y un aumento gradual del diámetro del tronco.

La magnitud de la contracción diaria representa una información valiosa sobre la intensidad del estrés. En la Figura 9 se puede apreciar las variaciones del diámetro del tronco de dos árboles sometidos a tratamientos de riego distintos. La línea de arriba corresponde al registro obtenido en un árbol sin déficit hídrico, mientras que la línea de abajo corresponde a un árbol estresado hídricamente o, dicho de otro

modo, mal regado. Se puede observar como la amplitud de contracción diaria del diámetro del tronco es ligeramente superior en las plantas estresadas que en las bien regadas, y esto se debe a que las plantas con déficit hídrico utilizan agua de sus reservas internas en los momentos de máxima demanda evaporativa, lo que provoca mayores contracciones diarias.



**Figura 9. Transductor de grosor instalado en tronco. Evolución diaria de las microvariaciones de grosor de tronco en dos árboles de albaricorno sometidos a regímenes de riego diferentes. Árboles bien regados (círculos cerrados), árboles estresados hídricamente (círculos abiertos). (Ortuño *et al.*, 2007)**

La máxima contracción diaria del diámetro del tronco (Huguet *et al.*, 1992) ha sido el parámetro más comúnmente utilizado como indicador de la intensidad de estrés hídrico en almendro (Nortes *et al.*, 2005), en ciruelo (Intrigliolo y Castel, 2005), en limonero (Ortuño *et al.*, 2004a; Ortuño *et al.*, 2004b; Ortuño *et al.*, 2006b; Garcia-Orellana *et al.*, 2007), en melocotonero (Conejero *et al.*, 2007) y en granado (Intrigliolo *et al.*, 2011). De forma que estas medidas han experimentado una notable expansión en el campo de la agricultura para programar el riego con un grado máximo de precisión.

### **Medidas de flujo de savia**

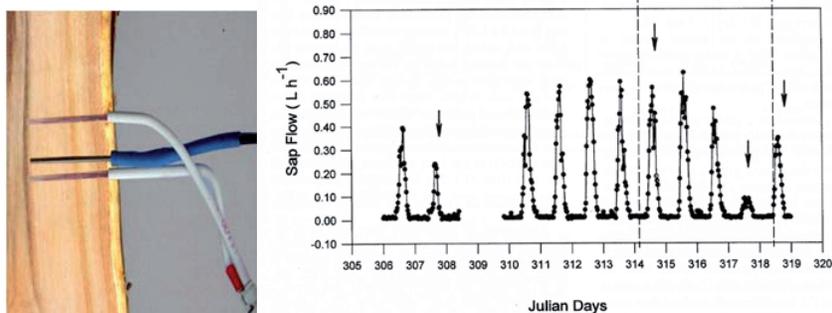
Otro indicador que está siendo muy utilizado actualmente para determinar el consumo de agua de los cultivos, especialmente en árboles frutales, es la medida del flujo de savia. Dicho indicador mide el flujo de agua que atraviesa el tronco de un

árbol de manera continua a lo largo del día, un parámetro que está directamente relacionado con el valor de la transpiración del árbol, y cuya cinética de cambio nos da una buena indicación de hasta qué punto el árbol está bien regado o no lo está.

Actualmente la técnica más empleada para medir el flujo de savia en las plantas es la basada en el método de compensación de pulso de calor, desarrollada por Green y Clothier en 1988, y que desde entonces ha ido optimizándose de forma continua a lo largo de estos últimos años.

En este caso los sensores de temperatura insertados en el tronco son los encargados de medir los cambios de temperatura que tienen lugar en el interior del árbol cuando se aplica un pulso de calentador resistivo, insertado también radialmente en el tronco (Figura 10). El tiempo transcurrido entre la emisión del pulso de calor y la recepción de este por un sensor dispuesto aguas abajo del flujo de savia permite calcular el tiempo invertido por la savia en recorrer esa distancia. Para distinguir entre el efecto de convección por movimiento de savia y el transporte de calor por conducción térmica se coloca también un sensor aguas arriba del calentador. El tiempo correspondiente al calor de pico del sensor aguas arriba comparado con el de aguas abajo permite compensar los efectos de la conducción térmica.

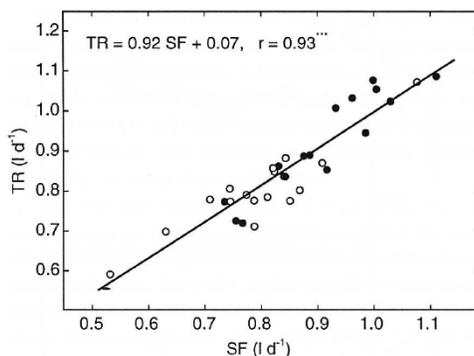
En la Figura 10, podemos observar como varía el flujo de savia a lo largo de un período de 15 días, en árboles de jóvenes de albaricoquero (Alarcón et al., 2000). Las diferentes oscilaciones que se pueden observar en la gráfica corresponden a variaciones existentes en el flujo de savia a lo largo del día, los valores de flujo alcanzan sus valores máximos al mediodía, cuando los niveles de transpiración son más elevados, y sus valores mínimos durante el período nocturno, cuando la transpiración apenas existe. La estrecha relación entre el flujo de savia y la transpiración, queda de manifiesto también en el hecho de que en los días nublados se produce una disminución importante en las medidas de flujo, disminución que responde sin duda alguna a un menor nivel de transpiración bajo esas condiciones climáticas.



**Figura 10. Inserción de sensores de temperatura y calentador en el interior del tronco para medir la velocidad del flujo de savia. Influencia de las variaciones ambientales diarias sobre los valores máximos de flujo de savia observados en árboles jóvenes de albaricoquero. (Alarcón *et al.*, 2000).**

Numerosos trabajos han demostrado la utilidad y robustez de estas medidas de flujo de savia (Alarcón *et al.*, 2000; Remorini y Massai, 2003; Ortuño *et al.*, 2005, 2006a; Fernández *et al.*, 2006a; 2006b), y la estrecha correlación de sus valores con las medidas de transpiración real observadas en plantas bajo diferentes condiciones climáticas y situaciones de estrés hídrico (Figura 11), lo que lo corrobora como un excelente parámetro para conocer las necesidades hídricas de los cultivos.

A lo largo de mi carrera investigadora, he tenido la oportunidad de demostrar que estos sensores poseen una mayor sensibilidad para diagnosticar el estrés hídrico que otros tipos de registros discontinuos en planta (Alarcón *et al.*, 2005). Utilizando este tipo de sensores hemos establecido los valores umbrales que permiten la programación del riego, ajustando la frecuencia y cuantía de los aportes hídricos en función de los requerimientos reales de agua en diversos tipos de cultivos leñosos (Ortuño *et al.*, 2007).



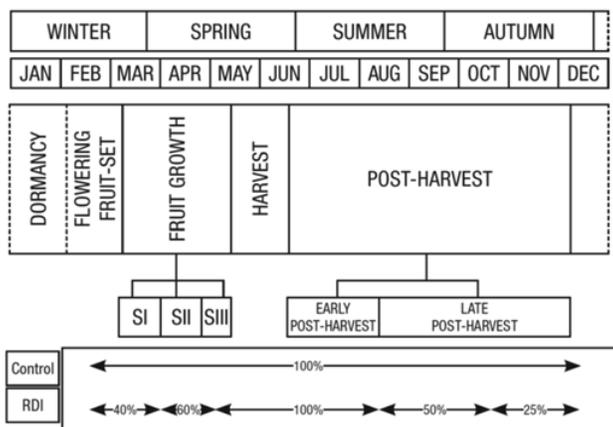
**Figura 11. Correlación entre los valores de flujo de savia y los niveles de transpiración en árboles jóvenes de limonero sometidos a diferentes regímenes de riego. Árboles bien regados (círculos cerrados), árboles estresados (círculos abiertos). (Ortuño *et al.*, 2005).**

### **Riego Deficitario Controlado.**

Otra de las aproximaciones en las que hemos trabajado para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura ha sido el desarrollo de estrategias de riego deficitario controlado (RDC).

El concepto de RDC fue propuesto por primera vez por Chalmers *et al.* (1981) con el objetivo de controlar el crecimiento en melocotonero. Para ello, aplicaron un estrés hídrico en el período de rápido crecimiento vegetativo, consiguiendo como resultado controlar el vigor del árbol sin afectar la producción ni calidad de la cosecha. Posteriormente, esta aproximación pasó a utilizarse como una estrategia propia de riego deficitario, basada en la reducción de los aportes hídricos en aquellos períodos fenológicos en los que un déficit hídrico controlado no afecta sensiblemente a la producción, mientras que se cubre plenamente la demanda de agua de la planta durante el resto del ciclo del cultivo (Figura 12).

**El agua como fuerza motriz de las plantas**  
**Juan Jose Alarcón Cabañero**



**Figura 12. Esquema de programación de riego deficitario controlado en función del momento fenológico en árboles de albaricoquero. Reducción de los aportes de agua durante el período de floración, el período de crecimiento rápido del fruto y la etapa final de postcosecha (Pérez Sarmiento *et al.*, 2010).**

Por medio de la aplicación de este tipo de estrategias de programación del riego deficitario controlado se han obtenido ahorros muy significativos de agua sin disminuir la calidad y producción de la cosecha en una gran cantidad de cultivos leñosos, como albaricoquero (Pérez Sarmiento *et al.*, 2010), peral (Naor *et al.*, 2006), limonero (Domingo *et al.*, 1996), olivo (Moriani *et al.*, 2003), melocotonero (Alcobendas *et al.*, 2012) y almendro (Girona *et al.*, 2005). En todos estos casos se han conseguido ahorros medios de agua en el riego cercanos al 30%, con reducciones mínimas de producción e incremento de la calidad de la cosecha (Buendía *et al.*, 2008; Alcobendas *et al.*, 2013).

No obstante, la aplicación del RDC no siempre ha dado los resultados deseados debido esencialmente a la falta de conocimientos e información necesaria para que la técnica sea viable. Entre los requerimientos previos, se puede destacar la necesidad de conocer con exactitud los periodos críticos del cultivo y la fase de transición entre crecimiento vegetativo y generativo, y la necesidad de disponer de una información

adecuada y precisa de la evolución del entorno y el diseño del sistema de riego (Sánchez-Blanco y Torrecillas, 1995).

### **Riego Deficitario basado en el humedecimiento parcial del sistema radical.**

Las aplicaciones de estas estrategias de riego deficitario están también estrechamente relacionadas con un conocimiento profundo de la fisiología de las plantas bajo condiciones de estrés, un ejemplo de ello serían las estrategias de riego deficitario basadas en el humedecimiento parcial del sistema radical.

Al utilizar esta práctica de riego, la mitad del sistema radicular se deja en proceso de desecación mientras que la otra se mantiene adecuadamente regada. La aplicación de esta técnica innovadora supone mantener una parte del sistema radical húmedo, con lo que se asegura un aporte hídrico suficiente para mantener la turgencia de la parte aérea, mientras que otra zona del sistema radical permanece seca, con lo que se activa un mecanismo de señales entre la raíz y la parte aérea que puede traducirse en un cierre parcial estomático (Dodd, 2005). Esta regulación estomática reduce las pérdidas de agua por transpiración con poco impacto sobre la fotosíntesis (Loveys *et al.*, 2004).

Dentro de los cultivos leñosos, la vid ha sido la especie modelo de estudio para realizar ensayos de riego por humedecimiento parcial del sistema radical, obteniéndose siempre unos resultados muy positivos ante la aplicación de esta técnica de riego (Dry *et al.*, 2000a; 2000b; Loveys *et al.*, 2000).

Sin embargo, los resultados no son tan concluyentes cuando la técnica se aplica sobre otras especies frutales como peral (Kang *et al.*; 2003), melocotonero (Goldhamer *et al.*, 2002) y olivo (Wahbi *et al.*, 2005).. En todas estas especies, aunque en general el humedecimiento parcial del sistema radicular mejoraba la productividad del agua en el riego, los resultados obtenidos no eran sensiblemente diferentes a los obtenidos

a cuando se aplicaba un riego deficitario homogéneamente distribuido a lo largo de todo el conjunto de las raíces.

En definitiva, la mayor parte de los autores concluyen que es necesario continuar con los trabajos de investigación para resolver las incógnitas existentes en torno a esta práctica de riego, ya que tal y como decíamos previamente, la naturaleza y funcionalidad de las señales que regulan las respuestas de las plantas ante condiciones de déficit hídrico todavía no han sido completamente elucidadas. Hay trabajos relacionados con la respuesta de la planta al déficit hídrico que consideran que las señales implicadas en los mecanismos de regulación son de tipo químico (Sobeih *et al.*, 2004); otros autores que indican que las señales que intervienen en el cierre estomático son de tipo hidráulico (Yao *et al.*, 2001), y por último, hay otros investigadores que abogan por una respuesta de la planta a la interacción de ambos tipos de señales (Tardieu y Davies, 1992).

## **Epílogo final**

Sirva esta discusión final sobre la naturaleza de los procesos de señalización en las plantas, y sus posibles aplicaciones prácticas a la hora de desarrollar estrategias específicas de riego, como un buen ejemplo de mi carrera científica, en la que, partiendo del estudio sobre el conocimiento fisiológico de “*el agua como fuerza motriz de las plantas*” hemos obtenido importantes resultados prácticos en el ámbito de la búsqueda de la mejora de la eficiencia del uso del agua en la agricultura.

Nuestros estudios sobre los mecanismos de tolerancia a la sequía, nos han permitido seleccionar y desarrollar nuevas variedades y genotipos de plantas capaces de crecer en ambientes áridos y salinos, en estrecha colaboración con mejoradores genéticos y biotecnólogos (Torrecillas *et al.*, 1995; Morales *et al.*, 2001; Alarcón *et al.*, 2002).

Nuestros estudios sobre la capacidad de absorción y toma de agua y nutrientes por las plantas, han permitido desarrollar nuevos sistemas de fertilización, basados en el uso de biofertilizantes ricos en materia orgánica, bacterias y micorrizas.

Permitiendo con ello el desarrollo de una agricultura sostenible (Fernández *et al.*, 2014; Nicolas *et al.*, 2015; Mostafa *et al.*, 2016).

Nuestros estudios sobre nuevos indicadores del estado hídrico de la planta, han sido de gran utilidad para desarrollar sistemas de automatización del riego basados en procesos de digitalización de la información obtenida tanto a nivel local como remoto, por medio de colaboraciones con investigadores del área de la telecomunicación, la teledetección y la inteligencia artificial (Gonzalez-Dugo *et al.*, 2013; Pedrero *et al.*, 2016; Romero-Trigueros *et al.*, 2017)

Nuestros estudios sobre los efectos de la salinidad sobre la respuesta fisiológica y productiva de las plantas, han ayudado a desarrollar estrategias de riego basadas en la reutilización de aguas residuales tratadas, colaborando estrechamente con departamentos dedicados al desarrollo de procesos de economía circular (Pedrero *et al.*, 2010; Alcón *et al.*, 2013; Nicolás *et al.*, 2016; Intriago *et al.*, 2018).

Finalmente, nuestros estudios sobre la mejora de la eficiencia en el uso del agua, nos han permitido establecer modelos y sistemas de ayuda a la toma de decisión que permiten ahorrar agua mediante el desarrollo de prácticas específicas de riego basadas en el desarrollo de la agricultura de precisión. Todo esto en cooperación con ingenieros agrónomos y representantes muy cualificados del sector primario (Miras-Avalos *et al.*, 2013; Lescouret *et al.* 2016; Valentín *et al.*, 2020)

Decía al principio de mi charla, y lo ratifico nuevamente, que la ciencia actualmente es fruto del esfuerzo multidisciplinar de distintos tipos de aproximaciones, en los que no cabe distinguir con claridad hasta donde llega la investigación básica y la aplicada. Así al menos es como ya lo entiendo, y como he tenido oportunidad de desarrollarla a lo largo de toda mi carrera investigadora.

Muchas gracias por su atención.

## **Bibliografía**

Alarcón JJ. 1992. Relaciones hídricas y ajuste osmótico en plantas de tomate cultivado y silvestre bajo estrés salino. Tesis Universidad de Murcia, 235 pp.

Alarcón JJ, Bolarín MC, Sánchez-Blanco MJ, Torrecillas A. 1994. Growth and osmotic adjustment of two tomato cultivars during and after saline stress. *Plant and Soil*, 166: 75-82.

Alarcón JJ, Domingo R, Green S, Sánchez-Blanco MJ, Rodríguez P, Torrecillas A. 2000. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees. *Plant and Soil*, 227: 77-85.

Alarcón JJ, Malone, M. 1994. Substantial hydraulic signals are triggered by leaf-biting insects in tomato. *Journal of Experimental Botany*, 45: 953-957

Alarcón JJ, Malone, M. 1995a. The influence of planta age on wound induction of proteinase inhibitors in tomato. *Physiologia Plantarum*, 95: 423-427.

Alarcón JJ, Malone M. 1995b. Effects of salinity on growth and water status of wheat leaves. *Journal of Experimental Botany*, 46: 29.

Alarcón JJ, Malone M. 1995c. Importance of the hydraulic signals in wound-induction of proteinase inhibitors in tomato. *Acta Horticulturae*, 412: 410-415.

Alarcón JJ, Morales MA, Torrecillas A, Sánchez-Blanco MJ. 1999. Growth, water relations and accumulation of organic and inorganic solutes in the halophyte *Limonium latifolium* cv. *Avignon* and its interspecific hybrid *Limonium caspia* x *Limonium latifolium* cv *Beltlaard* during salt stress. *Journal of Plant Physiology*, 154: 795-801

Alarcón JJ, Ortuño MF, Nicolás E, Torres R, Torrecillas A. 2005. Compensation heat-pulse measurements of sap flow for estimating transpiration in young lemon trees. *Biología plantarum*, 49: 527-532.

Alarcón JJ, Sánchez-Blanco MJ, Bolarín MC, Torrecillas A. 1993. Water relations and osmotic adjustment in *Lycopersicon esculentum* and *L. pennellii* during a short-term salt exposure and recovery. *Physiologia Plantarum*, 89: 441-447.

Alarcón JJ, Sánchez-Blanco MJ, Nicolás E, Egea J, Dicenta F. 2002. Effects of drought on shoot water relations in “Antoñeta” and “Marta” almonds grafted onto “Garrigues” seedlings and “GF677” rootstocks. *Acta Horticulturae*, 591: 345-349.

Alcobendas R, Miras-Avalos JM, Alarcón JJ, Pedrero F, Nicolas E. 2012. Combined effects of irrigation, crop load and fruit position on size, colour and

firmness of fruits in an extra-early cultivar of peach. *Scientia Horticulturae*,142: 128-135.

Alcobendas R, Mirás-Avalos JM, Alarcón JJ, Nicolás E. 2013. Effects of irrigation and fruit position on size, colour, firmness and sugar contents of fruits in a mid-late maturing peach cultivar. *Scientia Horticulturae*; 164: 340 - 347.

Alcon F, Ortega JM, Pedrero F, Alarcón JJ, De Miguel MD. 2013. Incorporating Non-market Benefits of Reclaimed Water into Cost-Benefit Analysis: A Case Study of Irrigated Mandarin Crops in southern Spain. *Water Resources Management*: 27 – 6: 1809 - 1820.

Anyia AO, Herzog H. 2004. Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought. *European Journal of Agronomy*: 20 (4): 327-339.

Boari F, Malone M. 1993. Wound-Induced hydraulic signals: survey of occurrence in a range of species. *Journal of Experimental Botany*: 44, 741–746

Bradford KJ, Hsiao TC. 1982. Physiological responses to moderate water stress. En: Lange, O. L., Nobel, P. S., Osmond, C. B. y Ziegler, H.(eds). *Encyclopedia of plant physiology*. New series. Springer-Verlag,Germany, p 263-324.

Brown.,W. 1976. New technique for measuring the water potential of detached leaf samples. *Agronomy Journal*, 68: 432-434.

Buendía RB, Allende A, Nicolás E, Alarcón JJ, Gil MI. 2008. Effect of regulated deficit irrigation and crop load on the antioxidant compounds of peaches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56: 3601-3608.

Blumwald E. 2000. Sodium transport and salt tolerance in plants. *Current Opinion in Cell Biology*, 12: 431-434.

Camejo D, Nicolás E, Alarcón JJ. 2004. Photosynthetic response to heat shock treatment of two tomato cultivars with different thermo-tolerance. *Acta Physiologiae Plantarum*, 26 (3 Supplement): 111.

Camejo D, Rodríguez P, Morales MA, Dell'Amico JM, Torrecillas A, Alarcón JJ. 2005. High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility. *Journal of Plant Physiology*, 162 (3): 281-289.

Camejo D, Torres W, Nicolás E, Alarcón JJ. 2010. Differential heat-induced changes in the CO<sub>2</sub> assimilation and electron transport in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 85(2): 137-143.

- Cifre J, Bota J, Escalona JM, Medrano H, Flexas J. 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.) An open gate to improve water-use efficiency? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 106 (2-3): 159-170.
- Chalmers DJ, Mitchell PD, Van Heek LAG. 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106: 307-312.
- Conejero W, Alarcón JJ, Garcia-Orellana Y, Nicolas E, Torrecillas A. 2007. Evaluation of sap flow and trunk diameter sensors for irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Tree Physiology*, 27: 1753-1759
- Cushman JC. 2001. Osmoregulation in Plants: Implications for Agriculture. *Integrative and Comparative Biology*, 41 (4): 758-769
- De Herralde F, Biel C, Savé R., Morales MA, Torrecillas A, Alarcón JJ, Sánchez-Blanco MJ. 1998. Effect of water and salt stresses on the growth, gas exchange and water relations in *Argyranthemum coronopifolium* plants. *Plant Science*, 139: 9-17.
- Dodd IC. 2005. Root-to-shoot signalling: Assessing the roles of 'up' in the up and down world of long-distance signalling in planta. *Plant and Soil*, 274 (1-2): 251-270.
- Domingo R, Ruiz-Sánchez MC, Sánchez-Blanco MJ, Torrecillas A. 1996. Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. *Irrigation Science*, 16 (3): 115-123.
- Dry PR, Loveys BR, Düring H. 2000. Partial drying of the rootzone of grape. I. Transient changes in shoot growth and gas exchange. *Vitis*, 39 (1): 3-7.
- Dry, P.R., Loveys, B.R. y Düring, H. 2000b. Partial drying of the rootzone of grape. II. Changes in the pattern of root development. *Vitis*, 39 (1): 9- 12.
- Flexas J, Bota J, Loreto F, Cornic G, Sharkey TD. 2004. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology*, 6 (3): 269-279.
- Fereres E. 1984. Variability in Adaptive-Mechanisms to Water Deficits in Annual and Perennial Crop Plants. *Bulletin de la Societe Botanique de France-Actualites Botaniques*, 131 (1): 17-32.
- Fernández JE, Díaz-Espejo A, Infante JM, Durán P, Palomo MJ, Chamorro V, Girón IF, Villagarcía, L. 2006a. Water relations and gas exchange in olive trees

under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant and Soil*, 284 (1-2): 273-291.

Fernández JE, Durán PJ, Palomo MJ, Díaz-Espejo A, Chamorro V, Girón IF. 2006b. Calibration of sap flow estimated by the compensation heat pulse method in olive, plum and orange trees: relationships with xylem anatomy. *Tree Physiology*, 26 (6): 719-728.

Fernandez F, Vicente-Sanchez J, Maestre-Valero JF, Bernabe AJ, Nicolas E, Pedrero F, Alarcón JJ. 2014. Physiological and growth responses of young tomato seedlings to drip-irrigation containing two low doses of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* sp. nova. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 89; 6, 679-685.

Fischer RA, Turner NC. 1978. Plant Productivity in Arid and Semi-Arid Zones. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 29: 277-317.

García-Orellana Y, Ruiz-Sánchez MC, Alarcón JJ, Conejero W, Ortuño MF, Nicolas E, Torrecillas A. 2007. Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management*, 89: 167-171

Garnier E, Berger A. 1986. Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. *Journal of Applied Ecology*, 23: 193-209.

Giménez C, Mitchell VJ, Lawlor DW. 1992. Regulation of photosynthesis rate of two sunflower hybrids under water stress. *Plant Physiology*, 98: 516-524.

Girona J, Mata M, Marsal J. 2005. Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond. *Agricultural Water Management*, 75 (2): 152-167.

Goldhamer DA, Salinas M, Crisosto C, Day KR, Soler M, Moriana A. 2002. Effects of regulated deficit irrigation and partial root zone drying on late harvest peach tree performance. *Acta Horticulturae*, 592: 343- 350.

González-Dugo V, Zarco-Tejada P, Nicolás E, Nortes PA, Alarcón JJ, Intrigliolo DS, Fereres E. 2013. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture*, 14: 660 - 678.

Green SR, Clothier BE. 1988. Water use of kiwifruit vines and Apple trees by the heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany*. 39: 115-123.

*El agua como fuerza motriz de las plantas*  
*Juan Jose Alarcón Cabañero*

Green TR, Ryan CA. 1973. Wound-induced proteinase inhibitor in tomato leaves. *Plant Physiology*, 51: 19–21

Huguet JG, Li SH, Lorendeau JY, Pelloux, G. 1992. Specific Micromorphometric reactions of fruit-trees to water-stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science*, 67 (5): 631-640.

Intriago JC, López-Gálvez F, Allende A, Vivaldi GA, Camposeo S, Nicolás E, Alarcón JJ, Pedrero F. 2018. Agricultural Reuse of Municipal Wastewater through an Integral Water Reclamation Management. *Journal of Environmental Management*, 213: 135-141.

Intrigliolo DS, Castel JR. 2005. Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water indicator in plum trees. *Tree Physiology*, 26: 303-311.

Intrigliolo DS, Puerto H, Bonet L, Nicolas E, Alarcón JJ, Bartual J. 2011. Usefulness of trunk diameter variations as continuous water stress indicators of pomegranate (*Punica granatum*) trees. *Agricultural Water Management*; 98: 1262-1468.

Irvine J, Grace, J 1997. Continuous measurement of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood. *Planta*, 202: 455-461.

Jones HG, Tardieu F. 1998. Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae*, 74 (1-2): 21-46.

Kang SZ, Hu X, Jerie P, Zhang JH. 2003. The effects of partial rootzone drying on root, trunk sap flow and water balance in an irrigated pear (*Pyrus communis* L.) orchard. *Journal of Hydrology*, 280 (1-4): 192-206.

Kramer PJ. 1969. *Plant and soil water relationships: a modern synthesis*. 482 pp

Lafitte HR, Guan YS, Yan S, Li ZK. 2007. Whole plant responses, key processes, and adaptation to drought stress: the case of rice. *Journal of Experimental Botany*, 58 (2): 169-175.

Lescourret F, Mirás-Avalos JM, Nicolás E, Vercambre G, Valsesia P, Alarcón JJ, Génard M. 2016. Potential of QualiTree, a virtual fruit tree, to study the management of fruit quality under biotic and abiotic constraints. *Acta Horticulturae*, 1130: 193-198.

Loveys BR, Dry PR, Stoll M, McCarthy MG. 2000. Using plant physiology to improve the water efficiency of horticultural crops. *Acta Horticulturae*, 537: 187-197.

- Loveys BR, Stoll M, Davies FS. 2004. Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploiting plant signalling in novel irrigation practice. En: Bacon, M. A. (ed). *Water Use Efficiency in Plant Biology*. Blackwell Publishing Ltd. Oxford, UK, p 113-138.
- Malone M. 1993. Hydraulic signals. *Phil. Trans. Roy. Soc. London Ser. B* 341, 33–39
- Malone, M, Alarcón JJ, Palumbo, L. 1994. A hydraulic interpretation of rapid long-distance wound signalling in the tomato. *Planta* 193: 181–185
- Malone M, Alarcón JJ. 1995. Only xylem-borne factors can account for systemic wound signalling in the tomato plant. *Planta*, 196: 740-746.
- Maroco JP, Pereira JS, Chaves, MM. 2000. Growth, photosynthesis and water-use efficiency of two C-4 Sahelian grasses subjected to water deficits. *Journal of Arid Environments*, 45 (2): 119-137.
- Medrano H, Parry MAJ, Socias X, Lawlor DW. 1997. Long term water stress inactivates Rubisco in subterranean clover. *Annals of Applied Biology*, 303: 491-501.
- Mirás-Avalos JM, Alcobendas R, Alarcón; JJ, Pedrero F, Valsesia P, Lescouret F, Nicolás E. 2013. Combined effects of water stress and fruit thinning on fruit and vegetative growth of a very early-maturing peach cultivar: assessment by means of a fruit tree model, QualiTree. *Irrigation Science*, 31: 1039 - 1051.
- Morales MA, Torrecillas A, Rodríguez P, Alarcón JJ. 2001. Effects of salinity on growth and leaf water relations of two genotypes of *Limonium sp.* *Acta Horticulturae*, 559: 419-423.
- Moriana A, Orgaz F, Pastor M, Fereres E. 2003. Yield responses of mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123 (3): 425-431.
- Mostafa MR, Mounzer O, Alarcón JJ, Abdelhamid M, Howladar S. 2016. Growth, heavy metal status and yield of salt-stressed wheat (*Triticum aestivum* L.) plants as affected by the integrated application of bio-, organic and inorganic nitrogen-fertilizers. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 89: 21-28.
- Naor A, Stern R, Flaishman M, Gal Y, Peres M. 2006. Effects of postharvest water stress on autumnal bloom and subsequent-season productivity in mid-season 'Spadona' pear. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 81 (3): 365-370.

Nicolás E, Alarcón JJ, Mounzer O, Pedrero F, Nortes P, Alcobendas R, Romero-Trigueros C, Bayona JM, Maestre-Valero JF. 2016. Long-term physiological and agronomic responses of mandarin trees to irrigation with saline reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 166: 1-8

Nicolás E, Maestre-Valero JF, Alarcón JJ, Pedrero, Vicente-Sánchez J, Bernabé A, Gómez-Montiel J, Hernández JA, Fernández; F. 2015. Effectiveness and persistence of arbuscular mycorrhizal fungi on the physiological and nutritional activity and on the yield of Crimson seedless grapevine. *Journal of Agricultural Science*. 2015, 153(6) 1084-1096.

Nortes PA, Pérez-Pastor, A, Egea G, Conejero W, Domingo, R. 2005. Comparison of changes in stem diameter and water potential values for detecting water stress in young almond trees. *Agricultural Water Management*, 77 (1-3): 296-307

Orozco-Cardenas M, McGurl B, Ryan C.A. 1993. Expression of an antisense prosystemin gene in tomato plants reduces resistance toward *Manduca sexta* larvae. *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)* 90, 8273–8276

Ortuño MF, Alarcón JJ, Nicolás E, Torrecillas A. 2004a. Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Science*, 167: 275-280.

Ortuño MF, Alarcón JJ, Nicolás E, Torrecillas A. 2004b. Comparison of continuously recorded plant-based water stress indicators for young lemon trees. *Plant and Soil*, 267: 263-270.

Ortuño MF, Alarcón JJ, Nicolás E, Torrecillas A. 2005. Sap flow and trunk diameter fluctuations of young lemon trees under water stress and rewatering. *Environmental and Experimental Botany*, 54 (2): 155- 162.

Ortuño MF, Alarcón JJ, Nicolás E, Torrecillas A. 2007. Water status indicators of lemon trees in response to flooding and recovery. *Biología Plantarum*, 51(2): 292-296

Ortuño MF, García-Orellana Y, Conejero W, Ruiz-Sánchez MC, Alarcón JJ, Torrecillas A. 2006a. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees-Structure and function*, 20: 1-8.

Ortuño MF, García-Orellana Y, Conejero W, Ruiz-Sánchez MC, Mounzer O, Alarcón JJ, Torrecillas A. 2006b. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil*, 279: 229-242.

Pearce G, Strydom D, Johnson S, Ryan CA. 1991. A polypeptide from tomato leaves induces wound-inducible PI proteins. *Science*, 253: 895–8

Pedrero F, Alarcón JJ, Abellán M; Perez-Cutillas P. 2016. Optimization of the use of reclaimed water through groundwater recharge, using a Geographic Information System. *Desalination and Water Treatment*. 2016, 57 (11): 4864-4877.

Pedrero F, Kalavrouziotis I, Alarcón JJ, Koukoulakis P, Asano T. 2010. Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture – Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*; 97: 1233-1241.

Pérez-Alfocea F, Balibrea ME, Alarcón JJ; Bolarín MC. 2000. Composition of xylem and phloem exudates in relation to the salt-tolerance of domestic and wild tomato species. *Journal of Plant Physiology*, 156: 367-374.

Pérez-Sarmiento F, Alcobendas R, Mounzer O, Alarcón JJ, Nicolás E. 2010. Effects of regulated deficit irrigation on physiology and fruit quality in apricot trees. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8 (S2): 86-94.

Philip JR. 1966. Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review Plant Physiology*, 17: 245-268

Remorini D, Massai R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science*, 22: 39-46.

Rodríguez P, Dell'Amico J, Morales D, Sánchez-Blanco MJ, Alarcón JJ. 1997. Effects of salinity on growth, shoot water relations and root hydraulic conductivity in tomato plants. *Journal of Agricultural Science*, 128: 439-444.

Romero-Trigueros C, Nortes PA, Alarcón JJ, Hunink JE, Parra, M, Contreras S, Droogers P, Nicolás E. 2017. Effects of saline reclaimed waters and deficit irrigation on *Citrus* physiology assessed by UAV remote sensing. *Agricultural Water Management*, 183: 60-69.

Rouhi V, Samson R, Lemeur R, Van Damme P. 2007. Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery. *Environmental and Experimental Botany*, 59: 117-129.

Ruiz-Sánchez MC, Sánchez-Blanco MJ, Planes J, Alarcón JJ, Torrecillas A. 1993. Seasonal changes in leaf water potential components in two almond cultivars. *Journal of Horticultural Science* (120):347-351

Ryan CA. 1974. Assay and biochemical properties of the proteinase inhibitor-inducing factor, a wound hormone. *Plant Physiology*, 54, 328–332

Sánchez-Blanco MJ, Bolarín MC, Alarcón JJ, Torrecillas A. 1991. Salinity effects on water relations in *Lycopersicon esculentum* and its wild salt-tolerant relative species *L. Pennellii*. *Physiologia Plantarum*, 1991, 83: 269-274.

Sánchez-Blanco MJ, Morales MA, Torrecillas A, Alarcón JJ. 1998. Diurnal and seasonal osmotic potential changes in *Lotus creticus creticus* plants grown under saline stress. *Plant Science*, 136: 1-10.

Sánchez-Blanco MJ, Torrecillas, A. 1995. Aspectos relacionados con la utilización de estrategias de riego deficitario controlado en cultivos leñosos. En: *Riego Deficitario Controlado, Fundamentos y Aplicaciones*. Cuadernos VALUE 1. Mundi Prensa. España, p 43-63.

Scholander PF, Hammel HT, Bradstreet ED, Hemingsen EA. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148: 339-346.

Sobeih WY, Dodd IC, Bacon MA, Grierson D, Davies WJ. 2004. Long-distance signals regulating stomatal conductance and leaf growth in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants subjected to partial rootzone drying. *Journal of Experimental Botany*, 55 (407): 2353-2363.

Tardieu F, Davies WJ. 1992. Stomatal response to abscisic acid is a function of current plant water status. *Plant Physiology*, 98 (2): 540- 545.

Tezara W, Mitchell VJ, Driscoll SP, Lawlor DW. 1999. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. *Nature*, 401: 914-917.

Torrecillas A, Alarcón JJ, Domingo R., Planes J, Sánchez-Blanco MJ. 1996. Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars. *Plant Science*, 118: 135-143.

Torrecillas A, Guillaume C, Alarcón JJ, Ruiz-Sánchez MC. 1995. Water relations of two tomato species under water stress and recovery. *Plant Science*, 105: 169-176.

Tyree MT, Nardini A, Salleo S. 2000. Hydraulic architecture of whole plants and single leaves. In M. Labrecque (Ed.), *L'arbre the Tree* (pp. 215-221). Montreal, Canada: Isabelle Quentin Publisher.

Valentín F, Nortes PA, Dominguez A, Sanchez JM, Intrigliolo D, Alarcón JJ., López-Urrea R. 2020. Comparing evapotranspiration and yield performance of maize under sprinkler, superficial and subsurface drip irrigation in a semi-arid environment. *Irrigation Science*, 38: 105-115.

Wahbi S, Wakrim R, Aganchich B, Tahy H, Serraj R. 2005. Effects of partial rootzone drying (PRD) on adult olive tree (*Olea europaea*) in field conditions under

*El agua como fuerza motriz de las plantas*  
*Juan Jose Alarcón Cabañero*

and climate - I. Physiological and agronomic responses. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 106 (2-3): 289-301.

Wildon DC, Thain JF, Minchin PEH, Gubb IR, Reilly AJ, Skipper YD, Doherty HM, O'Donnell PJ, Bowles DJ. 1992. Electrical signalling and systemic proteinase inhibitor induction in the wounded plant. *Nature*, 360: 62–65

Yao C, Moreschet S, Aloni B. 2001. Water relations and hydraulic control of stomatal behaviour in bell pepper plant in partial soil drying. *Plant Cell and Environment*, 24 (2): 227-235.



**Discurso de Contestación a Cargo de  
la Académica de Número Ilma.  
Dra. Dña. Francisca Sevilla Valenzuela**

*“Si hay magia en este planeta, está contenida en el agua”.*

**Loran Eisely.**



**Excmo Sr. Presidente**

**Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades**

**Ilustrísimos Señores Académicos**

**Señoras y Señores**

**Queridos amigos**

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Sr Presidente y a todos los académicos compañeros de la Academia de Ciencias de la Región de Murcia, por haberme elegido y otorgarme el honor de dar este Discurso de Contestación al Discurso de Ingreso a esta Academia del Dr. Juan José Alarcón Cabañero, Profesor del Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, al que desde este momento le doy mi más cordial bienvenida en nombre de la Academia.

Para mí, realizar este Discurso de Contestación al que de forma tan brillante acaba de pronunciar nuestro nuevo Académico, es un honor y un placer, no solo por la relevancia de su aportación a la disciplina de su especialidad, lograda por el Dr Alarcón en sus más de 31 años de dedicación a la investigación científica, sino también porque se trata de un compañero y amigo, con el que he compartido años de trabajo en nuestra Institución, el CSIC, y alguna que otra responsabilidad investigadora. Es por ello, y por tratarse de un investigador con una excelente trayectoria científica fuera de todo juicio, por lo que hoy me siento tan satisfecha y cómoda ante ustedes para describirles su valía científica y personal.

El estudio de las relaciones hídricas de las plantas bajo condiciones de estrés ambiental propias del área mediterránea y la optimización del uso del agua en la agricultura, han sido desde sus inicios los objetivos fundamentales sobre los que se centra la investigación del Dr Alarcón (a partir de ahora Juanjo), y constituyen las líneas de investigación recurrentes que le han permitido a él y a sus colaboradores ser internacionalmente conocidos.

Estas líneas de investigación, que se han ido perfilando a lo largo del tiempo, tienen sus antecedentes en el Departamento de Riego y Salinidad ubicado en el antiguo edificio del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC). A este Departamento Juanjo se incorporó en el año 1988, tras finalizar los estudios de licenciatura en Ciencias Biológicas en la Universidad de Murcia, a la que se trasladó desde su tierra natal de La Roda (Albacete), como la mayoría de los estudiantes de Albacete en aquella época. Durante esta etapa conoció a Carmen, también albaceteña, que sería su compañera de estudios y más tarde, su mujer.

Tras finalizar su licenciatura, Juanjo obtuvo lo que en aquel entonces se llamaban Becas de Formación de Personal Investigador del MEC, para la realización de la Tesis Doctoral que inició en 1989, en el citado Departamento de Riego y Salinidad del CEBAS. La investigación doctoral se centró en las *“Relaciones Hídricas y Ajuste Osmótico en Plantas de Tomate Cultivado y Silvestre”* trabajo codirigido por la Dra. M<sup>a</sup> Carmen Bolarin y el Dr. Arturo Torrecillas, y defendido en el año 1992. Esta investigación fue un buen exponente de los mecanismos de resistencia a una condición de estrés por salinidad, poniendo de manifiesto una importante variabilidad inter específica en estos mecanismos dentro del género *Lycopersicum*, a la vez que se profundizaba en los efectos de las sales sobre las relaciones agua-planta.

En estos años la investigación que se desarrollaba en el Departamento, y concretamente en el grupo liderado por el excelente investigador y magnífica persona, el Dr. Antonio León Martínez-Campos, al que Juanjo pertenecía, trataba de dar respuesta a los problemas que la agricultura murciana planteaba en relación al aprovechamiento y calidad del agua, las respuestas de los cultivos al riego y los efectos del estrés hídrico y salino en las plantas. Este grupo de investigación, líder en actividades de formación sobre los fundamentos teóricos del riego y la transferencia al sector agrario, así como en la implantación del riego localizado en cultivos de elevada importancia y rentabilidad económica, estableció las bases científicas para la *“Elaboración de Estrategias de Riego Deficitario”*, línea de

investigación por entonces pionera en España. Este escenario fue determinante en la formación investigadora inicial de Juanjo y constituyó el núcleo principal sobre el que se sustentaría parte de la investigación actual del grupo que Juanjo dirige en el *Departamento de Riego*, denominado así desde el año 2004, cuya creación surge de una reestructuración interna del CEBAS-CSIC y en la que Juanjo participa en calidad de miembro fundador.

El interés de los resultados obtenidos en su Tesis le abrió las puertas para complementar su formación investigadora durante dos años (1993,1994) en el laboratorio de los Drs HJ Jones and Dr. M Malone en el prestigioso centro de investigación “Horticulture Research International“, Wellesbourne, Warwicks. (Inglaterra). Esta experiencia le resultó muy fructífera, tanto como científico, con la publicación de un número importante de trabajos en revistas de relevancia en las áreas de agricultura y fisiología vegetal, como personalmente, ya que en esta época Juanjo y Carmen fueron padres de su primera hija, Inés.

La investigación realizada durante esa fase de estancia postdoctoral en Inglaterra se centró en la importancia de las señales hidráulicas en la respuesta de las plantas ante el estrés mecánico, con la puesta a punto y el empleo de metodología puntera que incluía entre otros aspectos, sensores para la determinación del flujo de savia y de las variaciones de grosor en tallo y hoja. En esta misma época, Juanjo realiza una estancia breve en el Water Research Center (WRC), de El Cairo, en el laboratorio del Dr Abull Zeid especializado en el “*Manejo y aplicación de agua de baja calidad en la agricultura*” temática que posteriormente también desarrollará.

La experiencia adquirida en esta etapa postdoctoral fue crucial, complementó su formación inicial y le permitió su regreso a Murcia en 1995 como Investigador Contratado del CSIC, incorporando dichas técnicas punteras en los proyectos de investigación que estaban en marcha en el Departamento y marcando claramente el futuro de su investigación. Debido a su novedosa aportación investigadora, en 1997 obtuvo la plaza de Colaborador Científico (actualmente Científico Titular), primer

escalafón de la carrera investigadora en el CSIC. En 2007 Juanjo toma posesión de su cargo como Investigador Científico y posteriormente, en solo dos años, la calidad y capacidad de trabajo y liderazgo le permitieron su promoción a Profesor de Investigación, rango máximo de investigación en el CSIC.

### **Líneas Fundamentales de Investigación Desarrolladas**

Antes de referirme de forma más precisa a la investigación actual del grupo de trabajo que Juanjo dirige, deseo comentar que, junto a su interés en cuanto al avance de los conocimientos generados, esta investigación se encuentra perfectamente enmarcada en el ámbito del cambio climático.

En este sentido, señalar que la importancia del agua como recurso está totalmente ligada al comportamiento del sistema climático, debido a su elevada sensibilidad frente al mismo. Los efectos del cambio climático repercuten directamente en la disponibilidad y la calidad del agua, la generación de energía y la agricultura, entre otros importantes efectos.

Estos impactos son mayores en aquellas áreas geográficas áridas y/o semiáridas, abundantes en nuestra Comunidad, en nuestro País y cada vez con más progresión en Europa, citando solo áreas geográficas próximas. Por todo ello, una de las respuestas a estos hechos descansa en un uso y una gestión sostenible del agua, así como en la regeneración de la misma.

Pues bien, es en estos aspectos en los que se encuentra inmersa la excelente investigación que viene realizando Juanjo y su equipo de investigación, abordando objetivos como: La gestión y optimización del agua en agricultura en condiciones de sequía y salinidad mediante la aplicación de estrategias de riego deficitario controlado, complementada con el fomento de la reutilización del agua y la inclusión de la planta como “sensor” de las necesidades hídricas del cultivo.

Todo ello orientado no solo al ahorro de agua sino también al mantenimiento de la calidad de la planta y de la cosecha, a través del conocimiento de la respuesta fisiológica de diferentes cultivos a situaciones de estrés, del análisis de las relaciones hídricas, de la eficiencia fotosintética y adaptaciones bioquímicas, estas últimas incluyendo metabolismo antioxidante y perfil hormonal, entre otros procesos.

Su investigación contempla también el abordaje de objetivos tecnológicos, entre ellos el desarrollo de modelos que permiten la aplicación de sistemas de ayuda a la toma de decisión en la programación del riego.

Basados en estimaciones de la evo-transpiración y el uso de sensores de suelo y planta, junto a sensores remotos como drones y satélites, se han establecido unos valores umbrales para la aplicación del riego que permiten ajustar los niveles de agua aplicada a las necesidades reales de los cultivos.

También se han desarrollado modelos biotecnológicos que permiten simular un elevado número de escenarios, variando las condiciones de cultivo, la climatología, las prácticas de riego, poda, etc. con el fin de predecir la producción y calidad de la cosecha en función de los “inputs” de entrada, entre ellos los aportes hídricos, y estimar previamente la relación coste-beneficio al final de cada ciclo de cultivo. Estos aspectos se evalúan y validan con modelos mecanísticos empleados en cultivos leñosos, permitiendo entre otros aspectos, simular el balance de carbono y de la biomasa en diferentes localizaciones bajo escenarios de presencia o ausencia de estrés hídrico.

Actualmente es un hecho ampliamente reconocido que los automatismos en la agricultura redundan en una mayor calidad de vida, una producción más sistematizada y una reducción de costes para el sector agrícola. Los conocimientos adquiridos sobre la utilización de indicadores biológicos en la programación del riego deben integrarse en un manejo del riego automatizado de precisión, lo que constituirá en un futuro cercano la metodología empleada de forma convencional en las producciones agrarias de alto nivel de rendimiento y sostenibilidad. En este

contexto el grupo de investigación que Juanjo dirige está llevando a cabo un esfuerzo adicional de difusión y transferencia de los conocimientos adquiridos y resultados tecnológicos al sector productivo.

Otro importante objetivo de la investigación actual está centrado en el desarrollo de prácticas de riego sostenible y la reutilización en la agricultura de aguas residuales tratadas. Estos estudios implican la medida y evaluación de contaminantes de preocupación emergente (CECs) en el sistema suelo-planta. Para ello el grupo ha desarrollado un sistema de detección y cuantificación de CECs en matrices vegetales, suelos y sustratos agrícolas, basado en la utilización de espectrometría de masas de alta resolución.

En relación con ello, me viene a la mente un pequeño e ingenioso fragmento sobre la regeneración del agua, cuyo autor es el Dr. José Salas, que dice así:

***“Y ahora van a ser regeneradas - atronó una gran voz en la arqueta de salida del decantador secundario - sobresaltando a las aguas residuales recién tratadas. ¿Pero que hemos hecho nosotras para que nos regeneren? Se quejan al unísono las que iban al frente de la corriente (...)”***

Como Juanjo ha comentado brevemente en su discurso, estas tecnologías de reutilización de agua se están aplicando para optimizar nuevos prototipos de depuración capaces de actuar a modo de tratamiento terciario en Estaciones Depuradoras de Agua Residual (EDAR), asegurando efluentes de una elevada calidad agronómica.

Una de las características de la revolución biológica que nos ha tocado vivir es la casi inexistencia de un determinado lapso temporal entre el avance del conocimiento y el de sus aplicaciones. Pues bien, Juanjo y la investigación que realiza encarnan un magnífico ejemplo de esta idea. Su investigación reúne fundamentalmente dos características importantes, por un lado, está permitiendo un gran avance científico en su área, y por otro está desarrollando unas aplicaciones prácticas directas en la

producción agrícola y su calidad, así como en la gestión, ahorro y reutilización del agua, con importantes impactos económicos.

Estas aproximaciones le han servido de base para para el desarrollo de estudios internacionales muy relevantes, ya que su grupo ha compartido, y comparte, conocimientos con un elevado número de investigadores internacionales a través de proyectos de cooperación a los que a continuación me referiré.

Todo ello, ha derivado en unos resultados excelentes e innovadores que avalan su relevancia científica en el marco de su grupo de trabajo. Actualmente el Departamento de Riego está compuesto por más de 25 miembros y ha sido valorado con la máxima calificación (Tipo A) por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas

### **Calidad Científica del Dr. Alarcón**

Lo expuesto hasta ahora permite valorar la importancia de las aportaciones científicas de Juanjo en su investigación, pero atendiendo a lo establecido en los estatutos de nuestra Academia referentes a *“elegir personas con una cualificación relevante para su entrada en la misma”*, haré mención, aunque por brevedad no de forma exhaustiva, a otros méritos de Juanjo relacionados con su calidad científica que se unen a los ya descritos anteriormente.

El nuevo académico posee un índice H de 40 según la referencia de la Plataforma WEBSCIENCE Core; y de 49 si atendemos los índices de la Google Scholar Citations. Estos índices están avalados por 120 publicaciones en revistas científicas de primer orden indexadas; ha dirigido 8 Tesis Doctorales, dos de ellas Premio Extraordinario de Doctorado, numerosos trabajos fin de grado y masters (15), y ha sido tutor y supervisor del trabajo de más de 30 investigadores contratados en proyectos de investigación.

Tiene una amplia experiencia docente, participando de forma recurrente en el programa de doctorado “*Biotecnología y Biología del Estrés de Plantas*” de la Universidad de Murcia, y siendo Miembro de la Comisión Académica del Programa de Doctorado “*Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario*” desarrollado en la Universidad Politécnica de Cartagena. Mencionar también su colaboración en el Master Internacional de “*Aguas Residuales en Agricultura*” en la Universidad del Estado de Sao Paulo en Brasil.

Responsable de una gran cantidad de eventos dirigidos a la difusión de la cultura científica, ha participado en numerosos cursos de especialización, entre los que cabe destacar aquellos organizados por el *Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente* y por la *Fundación Biodiversidad*, o por diversas entidades como la *Iniciativa NICOSIA* de la *Dirección General de la Unión Europea* y el *Programa Iberoamericano de Formación Técnica Especializada*, organizado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo y llevado a cabo en el Centro que la AECID tiene en Santa Cruz de la Sierra en Bolivia.

Ha participado en unos 140 Congresos/Simposios Científicos, la mayoría de ellos Internacionales (111), con más de 50 Conferencias invitadas, y con una elevada participación como Miembro del Comité Organizador. Destacar su papel como máximo responsable de la organización del “*IWA Regional Conference of Water Reuse and Salinity Management*” que fue celebrado por primera vez en la Región de Murcia en 2018, y en el que participaron más de 250 ponentes procedentes de 20 países distintos

Investigador responsable de numerosos proyectos de investigación, tanto europeos como nacionales y regionales, habría que destacar su participación en el Comité de Dirección de un proyecto del programa CONSOLIDER INGENIO del MINECO (2006-2011), denominado “*Programa Integral de Ahorro y Mejora Productiva del Agua de Riego en la Horticultura Española*”, proyecto que contó con una financiación de 4.960.000 euros y que significó la creación de un consorcio en el que

participaban los grupos científicos nacionales más destacados en la gestión de agua en el sector agrícola.

A nivel internacional Juanjo ha asumido la responsabilidad de liderar Proyectos Europeos (posición hasta ahora poco frecuente en los grupos del CSIC), destacando su papel como coordinador de tres proyectos del VI y VII Programa Marco, concretamente los proyectos:

- Sustainable Orchard Irrigation for Improving Fruit Quality and Safety (IRRIQUAL). [www.irriqual.com](http://www.irriqual.com). European funding: 2.224.693 €. 2006-2009.
- Sustainable Use of Irrigation Water in the Mediterranean Region (SIRRIMED). [www.sirrimed.org](http://www.sirrimed.org). European funding: 2.999.078 €. 2010-2014.
- On-Line profesional irrigation scheduling expert system (OPIRIS) [www.opiris.eu](http://www.opiris.eu). European funding: 840.000 €. 2013- 2015.

En el marco de estos proyectos ha tenido oportunidad de colaborar con los mejores grupos de investigación en el área de la gestión del agua y el riego a nivel europeo, y también de realizar una importante labor de cooperación internacional con países del Arco-Mediterráneo (como pueden ser Marruecos, Túnez, Egipto, Jordania y Líbano) e Ibero-América (destacando Cuba, Bolivia y Brasil).

Ha sido investigador principal de otros 28 Proyectos competitivos de carácter Nacional e Internacional, y ha formado parte del equipo investigador de un importante número de proyectos (73) desarrollados en su departamento.

A nivel Regional, el grupo de investigación dirigido por Juanjo es **Grupo de Excelencia** elegido por la Fundación Séneca, lo que supone estar entre los 24 mejores grupos de investigación de la Región de Murcia.

En cuanto a la capacidad de **Transferencia de Tecnología**, referir que los resultados derivados de la actividad investigadora de Juanjo junto a su grupo, han tenido su

aplicación, como mencioné anteriormente, a través de numerosos proyectos con empresas y asociaciones agrarias. A modo de ejemplo, durante los últimos años el grupo de investigación ha mantenido contratos de investigación con empresas, del sector público y privado, como: SISTEMA AZUD, TIMAC AGRO, SYMBORG; RITEC; NOVEDADES AGRICOLAS; EMUASA, ESAMUR, CAJAMAR, COMUNIDAD DE REGANTES DE MIRAFLORES, ODIN, TRAGSA, entre otras muchas.

### **Experiencia en Gestión Científica**

Resaltar también su contribución a la Planificación y Gestión Científica, lo que merece un reconocimiento adicional a su compromiso y su vocación con y por la ciencia. Ha sido:

Coordinador del Grupo de “Agua y Agricultura” de la Plataforma Tecnológica Española del Agua.

Miembro del Comité de Asesoramiento de la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA-FAO), en calidad de responsable de la organización de Proyectos Internacionales en el área de “Agua, agricultura y salinidad”.

Representante español en el Comité del Programa de “Cooperación en Alimentación, agricultura y biotecnología” del VII Programa Marco de Investigación en la Comisión Europea

Y Director del Centro de Edafología y Biología Aplicación del Segura (CEBAS-CSIC) desde el año 2012 hasta el momento actual. Destacar que el CEBAS está considerado como un Instituto de máximo reconocimiento internacional en el ámbito de las ciencias agroalimentarias, y uno de los Centros del CSIC que más cantidad de recursos financieros es capaz de captar tanto de fondos de investigación competitivos como de contratos con el sector empresarial. Sin duda en este posicionamiento, no

solo el personal componente del CEBAS si no también la gestión y dedicación de sus directores tiene una participación y responsabilidad esencial.

En calidad de Director del CEBAS ha tenido el honor de recibir numerosos reconocimientos a nivel institucional, como el Premio Agro 2017 a la mejor investigación en el sector agrario otorgado por el periódico La Verdad de Murcia, o el Reconocimiento Especial a la colaboración científica del Departamento de Fisiología y Bioquímica Vegetal del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas de la Habana otorgado en Cuba en el año 2019.

### **Juan José Alarcón: Aspectos Biográficos**

A continuación, les comentaré algunas de sus más destacados aspectos biográficos que creo importantes para conocer y obtener una imagen más completa del nuevo Académico. Como indiqué al inicio de este Discurso, Juanjo nació en La Roda de Albacete, y allí pasó sus primeros 18 años de vida en un ambiente lleno de cariño y amistades de los que, según sus palabras, sólo tiene buenos recuerdos. En estos 18 años se forjaron las bases principales de su carácter tolerante, en donde el amor a la familia y la dedicación al trabajo son sus máximas prioridades. Esto, según refiere, lo aprendió de sus padres, que, con mucho sacrificio y dedicación, y partiendo de una Región como la de Castilla-La Mancha, en la que por aquel entonces no había Universidad, consiguieron que sus tres hijos tuviesen estudios universitarios. Juanjo es el mayor de los tres hermanos, y es el único que se ha dedicado al ámbito científico ya que sus hermanos optaron por el derecho.

Llegó a Murcia con 18 años para iniciar su carrera, y esta tierra, según sus palabras, lo acogió tan bien y le abrió tantas oportunidades, que hoy en día, como nos pasa a muchos de los que no nacimos en ella, se considera un murciano más. Bien es cierto que no olvida La Mancha (como debe ser) y que siempre que puede se escapa a su tierra en la que todavía tiene familia y guarda muy buenos amigos. Además, según él comenta “*como la Feria de Albacete no hay otra igual*”. Dicen que Albacete es tierra de toreros, y de ahí le debe venir la afición por el “Arte de Cuchares”.

La oportunidad más importante que Murcia le brindó fue conocer a Carmen, una manchega que también estudiaba Biología. Tuvieron que venir a Murcia para conocerse.

*“Carmen es profesora de Biología de Educación Secundaria, y tiene unos conocimientos generales sobre Biología mucho más amplios que yo. Cuando salimos a andar al monte con los amigos es Carmen la que identifica las especies vegetales, las rocas y los fenómenos geológicos”,* comenta Juanjo.

Carmen acompañó a Juanjo en el primer año de su estancia postdoctoral en Inglaterra hasta el nacimiento de su primera hija Inés. Según el mismo comenta, el segundo año de esta etapa postdoctoral se hizo más complicado desde un punto de vista personal *“por entonces no existía Ryanair, para desplazarse los fines de semana a bajo precio, y tampoco las opciones de hablar y verse a través de las diversas aplicaciones de Skype, Zoom, etc.”*.

Actualmente, de sus tres hijos murcianos, solo Pablo se ha inclinado por la biotecnología, mientras que Laura será una futura psicóloga e Inés, al igual que sus tíos, se inclinó por la carrera de Derecho. Les deseo que tengan mucha suerte para poder ejercer sus respectivas profesiones con la misma vocación y excelencia que lo hacen sus padres.

Para finalizar, comentarles, que para mí ha sido un orgullo el haber podido contribuir en este acto de acogida a nuestro nuevo Académico. Espero haber sido capaz de reflejar su brillante y extensa investigación y el gran interés e importancia de la misma. Creo sinceramente que su trabajo contribuye a dar una respuesta rotunda al peligro que representan los efectos del calentamiento global sobre los recursos hídricos.

El agua está unida a la vida de los seres vivos y como escribió **Leonardo Da Vinci**:

*“El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza”.*

*Discurso de Contestación*  
*Francisca Sevilla Valenzuela*

Somos privilegiados de tenerla a nuestro alcance, pero para que esto siga siendo posible es necesario hacer un uso y una gestión sostenible de este bien, algo en lo que Juanjo está contribuyendo como un actor destacado.

Tengo el total convencimiento de que la Academia de Ciencias de la Región de Murcia se verá reforzada por la entrada del nuevo Académico, Dr. Juan José Alarcón Cabañero, al que doy mi más sincera felicitación extensiva a toda su familia, y una cordial bienvenida, en mi nombre y en el de mis compañeros de esta Academia.

Muchas Gracias





Este trabajo ha sido publicado con el patrocinio de la  
Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

