

# El agua

Febrero de 2008  
"2008 Año de la enseñanza de las ciencias"

## De la molécula a la biósfera

Editores: Alberto Daniel Golberg; Alicia Graciela Kin



### Ediciones

Instituto Nacional de  
Tecnología Agropecuaria



## PREFACIO

### *AGUA, ESPEJO DE LA VIDA*

Hace muchos años la Editorial Universitaria de Buenos Aires (EUDEBA) publicó un libro muy interesante, su título era: “Agua, Espejo de la Ciencia”, se trataba de un volumen pequeño y muy atrayente el cual, utilizando al agua como *leit motiv*, recorría todo el ancho escenario de la ciencia.

Es posible que haya sido aquella obra la que impactó mi subconsciente e impulsó a solicitarle a algunos colegas su colaboración para escribir “**El agua: de molécula a la biosfera**”, pero en este caso, y como reflejo de aquel buen libro, propongo una variante para caracterizar la presente obra con el siguiente lema: “Agua, espejo de la vida”. En efecto, la vida le debe un importante tributo a esta molécula sin par. Cada vez que se envía un vehículo espacial con el objetivo de investigar las posibilidades de vida en otros mundos, una de las evidencias más importantes que se busca (quizá la de mayor relevancia) es la posible presencia actual o pasada de agua. Tal vez un escritor de ciencia ficción pueda escribir sobre planetas donde el agua ha sido reemplazada por otro compuesto, pero pienso que nadie sería capaz de tratar una realidad biológica concreta, aún de otros planetas, que no estuviera relacionada con el agua.

Los seres vivos del planeta Tierra estamos compuestos en gran medida de agua, también representa el vehículo donde suceden todas las reacciones de la vida y por lo que cuentan los científicos que han tratado el origen de los seres vivos en la Tierra, fue la presencia del agua lo que permitió la existencia de los seres vivos, fue en el caldo primitivo donde probablemente se generaron las macromoléculas que con el andar del tiempo engendraron las entidades vivas más primitivas. El agua también propició la vida al filtrar inicialmente la radiación ultravioleta que llegaba a la superficie terrestre en mucha mayor proporción que en la actualidad porque al parecer por ese entonces la tierra carecía de la capa protectora de ozono.

“**El agua: de la molécula a la biosfera**” se propone realizar un “*tour d’horizon*” de la biología utilizando al agua como lazo de unión, analizando los diferentes procesos donde participa y relacionándola con las estructuras de la vida.

La obra se inicia con un capítulo sobre las características físico-químicas de esta molécula excepcional: la primera vez que escuché a un profesor comparar la molécula de agua con la del anhídrido carbónico o la del dióxido de azufre haciendo hincapié en la particularidad de que estas últimas eran compuestos gaseosos de peso molecular 44 y 64 respectivamente, mientras que el agua de tan solo 18, a temperatura y presión normal es un líquido, quedé maravillado. Esa asimetría de cargas eléctricas de la molécula que determina la realización del puente de hidrógeno constituye un hecho trascendental, la química cósmica generó un compuesto único.

En mis clases de Fisiología Vegetal, cuando me toca introducir el capítulo de relaciones hídricas, suelo decirle a los alumnos que todo el tema del agua en la planta está relacionado con el movimiento: Movimiento desde el espacio extracelular hacia el interior de la célula, entre célula y célula o en el interior, su flujo en el citosol y desde este hacia las vacuolas, el núcleo o las diferentes organelas. Un hecho que intrigó durante mucho tiempo a los investigadores fue la alta velocidad de pasaje del agua hacia el interior celular, la permeabilidad de la membrana de fosfolípidos con moléculas de proteína no permitía explicar esa velocidad, hasta que hace algo más de una década se descubrieron las acuaporinas, canales formados en las membranas celulares, por proteínas, por donde el agua puede moverse a mayor velocidad que atravesando la capa de fosfolípidos. También ocurre movimiento a grandes distancias, a través del continuum suelo-planta-atmósfera, en este caso la transpiración determina el paso hacia la atmósfera en

fase vapor de grandes cantidades de agua que la planta ha absorbido del suelo mediante el sistema radical.

Al tratarse el tema de las relaciones hídricas en las plantas de manera secuencial, podría iniciarse con el capítulo del agua en el suelo; precediendo al del agua en la planta, o bien incluirse al finalizar este capítulo. En nuestra obra hemos mantenido la secuencia de la mayoría de los libros de Fisiología Vegetal, abordando en primer lugar el agua en el suelo y a posteriori su movimiento por la planta.

Un capítulo estrechamente relacionado con el precedente lo constituye el de las alteraciones sufridas por las plantas cuando la cantidad de agua que reciben por las lluvias no alcanza a compensar las pérdidas producidas por la transpiración o la que se produce de manera directa a partir de la superficie del suelo por evaporación, este desbalance ocasiona disturbios metabólicos y fisiológicos que inciden de manera determinante sobre su crecimiento y producción.

Una de las formas más frecuentes de aportar el agua requerida para maximizar su productividad es mediante el riego. Sin embargo esta práctica, cuando no se la realiza con criterios de sustentabilidad ha sido responsable en muchas regiones del mundo de la salinización del suelo y en casos extremos del abandono de extensas áreas cultivadas.

Desde el punto de vista agronómico -enfoque que hemos querido conferirle a esta obra- nos pareció de suma importancia incluir un capítulo sobre el metabolismo del agua en mamíferos rumiantes y monogástricos.

En el capítulo del agua en el ecosistema se realiza la síntesis del funcionamiento de un sistema ecológico modelado de manera primordial por el agua: el humedal, donde el agua se presenta de manera sobreabundante y las plantas han debido adaptarse a través de su historia evolutiva de diferentes maneras.

El agua sigue en la naturaleza un ciclo que parece perfecto, en ese ciclo puede pasar del estado líquido al gaseoso y en muchas ocasiones adquirir el estado sólido, de los espejos de agua pasa a la atmósfera, en fase gaseosa, por evaporación y de la atmósfera nuevamente a los espejos de agua o a las superficies emergentes, en fase líquida -lluvias- o sólida -granizo o nieve-; las plantas la absorben del suelo y la devuelven, en una gran proporción, a la atmósfera en fase vapor mediante el proceso transpiratorio. El citado capítulo además de presentar los aspectos físicos relacionados con el ciclo del agua, trata también la problemática que atañe al agua, relacionada con el cambio climático global.

En todos los capítulos se ha tratado de dar a esta obra -en la medida de lo posible- un sesgo regional, utilizando ejemplos de investigaciones realizadas en nuestro país.

Es importante destacar que, aparte del interés que este libro puede suscitar por su originalidad al tratar el tema del agua como *leit motiv* de la biología, su interés puede aumentar si se tiene en cuenta que en estos últimos tiempos el concepto clásico que se tenía del agua dulce como recurso natural inagotable ha cambiado y en la actualidad se ha llegado a considerar que el agua dulce también puede llegar a agotarse ya sea por sobreuso y/o por contaminación. Lo sucedido con el acuífero Ogallala, constituye un buen ejemplo de lo que puede depararle el futuro a los recursos hídricos de no implementarse políticas tendientes a racionalizar su utilización; en efecto, el citado acuífero que abastece de agua a siete estados de los Estados Unidos, aportando el agua para regar de 32 millones de hectáreas, de acuerdo con las predicciones de los hidrólogos, habrá de agotarse en los próximos cuarenta años de continuar con el actual ritmo de utilización.

Para la realización de esta obra se han convocado a destacados especialistas pertenecientes a distintas Universidades Nacionales, al CONICET y al INTA; todos ellos de reconocida trayectoria en los temas tratados en los distintos capítulos.

*Alberto D. Golberg*  
*Alicia G. Kin*

La contribución académica de la obra “El agua: de la molécula a la biosfera” merece especial atención por parte de aquellos actores involucrados en el abordaje a la problemática del agua.

En sus diferentes escalas de percepción y con las complejidades propias de este objeto de estudio, los autores presentan con solvencia disciplinaria los distintos capítulos de este libro.

El desafío y la necesidad de aplicar un enfoque sistémico en estos sistemas complejos de organización biológica, de permanentes y múltiples interacciones, resulta clave para la interpretación y el entendimiento de estos procesos organizacionales.

Es imperativo que a este “*bien común y escaso*” se lo valore como unidad de organización y que se convierta en una fuente de permanente debate y en el desvelo en la elaboración de las políticas de estado.

El agua, sinónimo de vida y elemento indispensable para los procesos de regulación de los ecosistemas merece esta obra y muchas más.

*Ing. Agr. (Dr.) Enrique M. Viviani Rossi*  
Director de la EEA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas”

“El Agua: de la Molécula a la Biosfera” es una obra oportuna y necesaria, porque aborda la problemática del agua desde una perspectiva no común en las ciencias agrarias. Al atravesar diferentes niveles de complejidad y distintas escalas de espacio y tiempo, fluye desde los niveles de organización más simples hacia los más complejos.

Los capítulos iniciales ofrecen una recapitulación básica, quizás bastante explorada en la agronomía tradicional, que arranca con el rol del agua en la estabilidad estructural de las moléculas biológicas (Jonas), sus flujos en las células vegetales (Taleisnik), sus movimientos a través de la planta (Kin) y su dinámica y retención en el suelo y los cultivos (Buschiazzo, Aimar y Quiroga). Luego el libro se orienta, en sus capítulos intermedios, hacia aspectos eco-fisiológicos de la relación suelo-agua-planta-animal. Al abordar la fisiología del estrés hídrico (Golberg), la eco-fisiología de las plantas en condiciones de regadío (Cavagnaro), y la importancia del agua en la producción de animales domésticos (Stritzler y Rabotnikof), estos autores nos ayudan a entender conceptos esenciales y nos aportan algunos coeficientes técnicos que son alta utilidad potencial para administrar procesos productivos complejos. Los últimos

dos capítulos saltan directamente al nivel del ecosistema y al propio nivel global cuando el agua es integrada en un ciclo hidrológico que atraviesa distintos niveles y escalas geográficas y temporales. Se aborda con innegable solvencia el funcionamiento de los humedales del chaco argentino (Ginzburg y Adámoli), su rol regulador y su valor en la provisión de servicios ecológicos intangibles pero vitales. Asimismo, con ejemplos referidos a la provincia de Córdoba, el libro cierra con un atractivo capítulo sobre la variabilidad climática regional y su vinculación con el cambio climático (Seiler y Vinacur), mostrándonos cómo lo local conecta y retroalimenta con lo global.

Si bien se omite la hidrología de biomas muy importantes como los bosques, los pastizales, las áreas montañosas o las zonas costeras dedicados a la producción, la obra nos provee elementos y referencias bibliográficas que nos permiten complementar una búsqueda fructífera. Otro capítulo importante que seguramente encontrará lugar en ediciones ampliadas de este libro es de la dinámica del agua subterránea. Es éste un recurso de importancia mayúscula en la pampa argentina, que se puede convertir tanto en una bendición para los cultivos cuando subsidia a la planta en épocas de sequía, como en un demonio cuando su ascenso dispara anegamientos e inundaciones incontrolables, con secuelas de alto impacto social, económico y ambiental.

Una sorprendente mayoría de científicos ortodoxos consideran que, como ciencia madura que lo es, la Física ha alcanzado el “fin de la historia”. Que sus leyes y bases teóricas ya han sido establecidas, y que los nuevos conocimientos que se generen en adelante serán marginales y confirmatorios de lo que ya se sabe. Sin embargo, hay una nueva corriente de científicos que creen que no todo está dicho en esta poderosísima rama de la ciencia. Que la Física solo ha abordado una parte de la historia y que ha omitido un aspecto esencial: la noción de emergencia. La física de las propiedades emergentes abre un nuevo espacio de conocimiento que puede revolucionar la ciencia moderna. Según esta visión, grandes principios como la Ley de la Gravedad Universal de Newton, aplica bien a sistemas masivos, de gran escala espacial, pero pierde consistencia cuando se intenta aplicarla a niveles decrecientes de complejidad donde la masa, como factor modelador, pierde relevancia. Esto lleva a plantear que la Física tradicional no se ha ocupado de estudiar propiedades esenciales que emergen al saltar de un nivel a otro de complejidad. En cada salto aparecen interacciones que modifican las respuestas “indicadas” por leyes inmutables, y eso impone un límite al escalamiento lineal de procesos y mecanismos.

Sin embargo, esto no ha sido un secreto para el organicismo biológico, en particular para los ecólogos y todos aquellos que estudian sistemas complejos en el mundo de lo viviente. Las propiedades emergentes han sido causa de insomnio -¿y por qué no de pesadilla?- para muchos científicos de la biología, ya que sus resultados de laboratorio o de parcelas se tornaron inconsistentes cuando se intentó extrapolarlos a escalas mayores. Es cierto que todavía no se han encontrado reglas de escalamiento confiables en biología, sobre todo cuando se procura escalar información a niveles de paisaje y ecosistema. Pero sorprendentemente, algo que debió ocurrir tempranamente en la física, había ocurrido ya en la biología, una ciencia más nueva, en evolución, y todavía inmadura.

¿A qué viene el planteo de este dilema? A que esta obra que hoy tenemos en mano nos puede ayudar decisivamente a entender (aunque no resolver) que existen problemas de emergencia que se vinculan a distintos niveles y escalas biológicas. Una rápida lectura de los distintos capítulos nos permite reconocer que cada nivel o escala constituye, en sí mismo, un sistema del cual emergen propiedades singulares. Podemos entender la estructura molecular del agua y su rol en los organismos vivientes, pero este conocimiento no nos ayudará a entender cómo los humedales ofrecen una potente regulación de los flujos hídricos a escala de paisaje. Obviamente, desde el humedal tampoco podemos entender el rol molecular del agua en los seres vivientes. Las propiedades emergentes, sobre todo en elementos tan dinámicos como el agua, nos abren un espacio impensado para el progreso científico en distintos campos de la biología, y

esta es una contribución inicial que debemos festejar en esta obra. Hay que reconocerle el mérito de regalarnos una llave necesaria para abrir nuevas puertas al conocimiento.

*Ernesto F. Viglizzo*  
Coordinador Nacional del Área Estratégica  
de Gestión Ambiental del INTA

Water is a key compound in nature. It intervenes at a diversity of levels or organisation and is of prime importance for the future of agriculture and humanity. Also water is a very special molecule and the mechanisms and processes through which it is involved through the biosphere are really fascinating.

This book gives an interesting and original survey of the problematics of water. The authors have succeeded to translate their passion in their texts and this is quite nice and pleasant for the reader.

The presentation is rather complete going from the basic physical and chemical characters of the water molecule, to the more classical plant physiology approach found in textbooks on the subject. Nevertheless this book is not limited to plant physiology since there is a chapter of water in the soil and what is less usual a chapter on water in animals.

At the era of system and multidisciplinary approaches, works at different levels of integration and scales from molecular biology to whole plant physiology and beyond are more and more relevant. This book was written in that context and is therefore more than a classical textbook of plant physiology.

Information on animals (a chapter of its own) but also ecosystems (with the chapter on humid zones, marshes etc...) are given, the cycle of water (not so classic since revised in the context of climatic changes) is presented and all this is useful to the reader.

The book is written by a group of authors who have an implication on agronomy thus an attention given to agricultural issues in the choice of examples and in the manner to present the different topics.

An originality is the fact that the authors are all from Argentina and that efforts were made to choose examples applying to their country or region of the world. This has also implications for the some of the references cited. Thus the reader will find in this book more than just a good presentation of what could also be found in different textbooks available in English. Moreover he will find all the information gathered in a single volume.

The presentation and the content of the different chapters may at first sight seem classic but recent advances like those in cell plant physiology and molecular physiology are not ignored (aquaporins etc...). Modern issues like sustainability of agricultural systems, ecological awareness, climatic changes etc... are also clearly taken into account in the text even if they are not the object of a special chapter on its own (except to some extent for climatic changes).

There is little overlapping or repetition throughout the different parts of the book. Each chapter begins with a useful table of contents. They have generally no summary (except one)

but it is true that the introduction and conclusion often give a good idea of what could have been put in a summary.

The book is clearly written and is pleasant to read by anybody who has a sufficient knowledge of Spanish. It should be useful and instructive to students (graduate but also to some extent even undergraduate), teachers and scientists whatever they are related to agronomy or not, if they have an interest for the problematics of water.

Water has indeed a strong strategic importance and at the time of globalisation of commerce it is the object of struggles for its possession and marketing. An increase of frequency in the occurrence of problems of water due to climatic changes is likely to occur not only through drought spells but also through excesses associated with hurricanes and storms. Water will be even more than ever an important issue for a large amount of people thus the interest of a book like this. I recommend its reading.

*J.F. Ledent*

Unidad de Ecofisiología y de Mejoramiento Vegetal  
(Unité d'Ecophysiologie et d'Amélioration végétale)  
AGRO/BAPA/ECAV (ex ECOP-GC). Université catholique de Louvain (UCL),  
Louvain-la-Neuve, Belgium.

## LOS AUTORES

**Jorge Adámoli:** Ingeniero Agrónomo, UBA. Realizó estudios de postgrado en la Universidad de Montpellier obteniendo su Diplome d'Études Approfondies. Es miembro de la Carrera de Investigador del CONICET (Investigador Independiente) y Profesor Asociado en la Cátedra de Ecología Regional, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA. Sus temas de investigación están relacionados con estructura y función de humedales y ordenamiento territorial. [jorge@bg.fcen.uba.ar](mailto:jorge@bg.fcen.uba.ar)

**Silvia Beatriz Aimar:** Licenciada en Geología de la UNLPam. Magister en Ciencias Agrarias, UNS. Jefe de Trabajos Prácticos en la Cátedra Edafología, Manejo, Conservación y Fertilidad de Suelos en la Facultad de Agronomía, y Profesora Adjunta de la Cátedra Edafología y Manejo en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNLPam. Temas de investigación: erosión eólica. [saimar@exactas.unlpam.edu.ar](mailto:saimar@exactas.unlpam.edu.ar)

**Daniel E. Buschiazzo:** Ingeniero Agrónomo graduado en la Facultad de Agronomía, UNS. Magister de la UNS. Doctorado en la Universidad de Hohenheim (Alemania). Es técnico investigador del INTA (Estación Experimental de Anguil). Profesor Titular en la Cátedra Edafología, Manejo y Fertilidad de Suelos en la Facultad de Agronomía, UNLPam. Realiza investigaciones fundamentalmente sobre efectos de la erosión eólica. [buschiazzo@agro.unlpam.edu.ar](mailto:buschiazzo@agro.unlpam.edu.ar)

**Juan Bruno Cavagnaro:** Ingeniero Agrónomo de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNCuyo. Obtuvo su Maestría en la Universidad de Davis-California, USA. Miembro del CONICET y Profesor Titular de Fisiología Vegetal en la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNCuyo. Líneas de investigación: ecofisiología de cultivos bajo riego y fisiología del estrés en pastizales naturales. [bcavagnaro@fca.uncu.edu.ar](mailto:bcavagnaro@fca.uncu.edu.ar)

**Rubén Ginzburg:** Licenciado en Cs. Biológicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA. Es integrante del Laboratorio de Ecología Regional de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA. Línea principal de trabajo: aspectos ecológicos de los sistemas agrícolas. [rubenginzburg@yahoo.com.ar](mailto:rubenginzburg@yahoo.com.ar)

**Alberto Daniel Golberg:** Ingeniero Agrónomo, graduado en la Facultad de Agronomía, UBA. Magister en Fisiología Vegetal de la UNLP. Doctorado en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica). Es técnico investigador del INTA (Estación Experimental de Anguil) y Profesor Titular en la Cátedra Fisiología Vegetal en la Facultad de Agronomía, UNLPam. Realiza investigaciones sobre estrés hídrico en plantas. [golberg@agro.unlpam.edu.ar](mailto:golberg@agro.unlpam.edu.ar)

**Olga A. Jonas:** Licenciada en Bioquímica, graduada en la UNS. Master en Formación en Docencia Universitaria de la Universidad de Barcelona (España). Profesora Asociada de Química II en la Facultad de Agronomía, UNLPam. Ha realizado trabajos de bioquímica del estrés, realiza investigaciones de caracterización de genotipos de gramíneas mediante su ADN. [jonas@agro.unlpam.edu.ar](mailto:jonas@agro.unlpam.edu.ar)

**Alicia Graciela Kin:** Ingeniera Agrónoma, graduada en la Facultad de Agronomía de la UNLPam. Doctorada en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica). Profesora Adjunta en la Cátedra Fisiología Vegetal en la Facultad de Agronomía, UNLPam. Temas de investigación: estrés abiótico y germinación de especies nativas. [kin@agro.unlpam.edu.ar](mailto:kin@agro.unlpam.edu.ar)

**Alberto Raúl Quiroga:** Ingeniero Agrónomo egresado de la Facultad de Agronomía, UNLPam. Master en Ciencias Agrarias y Doctorado en Agronomía en la UNS. Es técnico investigador en Manejo de Suelos en el INTA (Estación Experimental de Anguil) y Profesor Adjunto de Edafología en la Facultad de Agronomía, UNLPam. Participa en el dictado de cursos de postgrado en: Manejo de Suelos, Física de Suelos, Siembra Directa en la Facultad de Agronomía, UBA; Sistemas de producción ganadera (Facultad de Agronomía, UCCor). Coordinador de diversos proyectos. Sus investigaciones se relacionan con la tecnología de la siembra directa y sus efectos sobre el suelo. [quiroga@agro.unlpam.edu.ar](mailto:quiroga@agro.unlpam.edu.ar)

**Celia Mónica Rabotnikof:** Ingeniera Agrónoma, graduada en la Facultad de Agronomía, UBA y Master en Formación en Docencia Universitaria, de la Universidad de Barcelona (España). Actualmente es Profesora Adjunta en la Cátedra Sistemas de Producción Animal I (Rumiantes) y docente Cátedra de Nutrición Animal carrera de Agronomía, Facultad de Agronomía, UNLPam Líneas de investigación: evaluación de forrajeras para la Región Pampeana Semiárida y estudio de procesos, de uso y recuperación de especies nativas componentes del pastizal del bosque de caldén. [rabotnikof@agro.unlpam.edu.ar](mailto:rabotnikof@agro.unlpam.edu.ar)

**Roberto Seiler:** Ingeniero Agrónomo, del Instituto de Ciencias Agronómicas (hoy Facultad de Ciencias Agropecuarias), UNCor. Ph D. en Meteorología Agrícola y Biometeorología, University of Missouri - Columbia, MO, USA. Profesor Titular Efectivo de Agrometeorología. Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET. Líneas de investigación: efecto del cambio climático y variabilidad climática sobre la producción agropecuaria. Vulnerabilidad y adaptación de los productores agropecuarios al cambio y a la variabilidad climática. [rseiler@ayv.unrc.edu.ar](mailto:rseiler@ayv.unrc.edu.ar)

**Néstor Pedro Stritzler:** Ingeniero Agrónomo, Facultad de Agronomía, UBA. Doctor of Philosophy (Ph.D.), Royal Veterinary and Agricultural University. Copenhagen (Dinamarca). Actualmente es Asistente Regional de Investigación, Experimentación y Vinculación Tecnológica, Centro Regional La Pampa – San Luis, INTA y Profesor Titular en la Cátedra Nutrición Animal, Facultad de Agronomía, UNLPam. Líneas de investigación: evaluación cuali-cuantitativa de alimentos para rumiantes, suplementación de nutrientes. [NStritzler@lapampa.gov.ar](mailto:NStritzler@lapampa.gov.ar)

**Edith Taleisnik:** Realizó estudios de Biología en la UNCor y obtuvo su doctorado en la Universidad Ben Gurion (Israel). Es investigadora independiente del CONICET con sede en el Instituto de Fisiología Vegetal y Fitopatología del INTA y profesora en la Cátedra Fisiología Vegetal en la Facultad de Agronomía de la Universidad Católica de Córdoba. Su tema de investigación está relacionado con el efecto de la salinidad en las plantas. [etaleisnik@correo.inta.gov.ar](mailto:etaleisnik@correo.inta.gov.ar)

**Marta Graciela Vinocur:** Ingeniera Agrónoma, con orientación Zootecnia, Facultad de Agronomía. UBA. Master of Science in Crop and Soil Sciences, Michigan State University, College of Agriculture and Natural Resources, Department of Crop and Soil Sciences, East Lansing, Michigan, USA. Profesora Adjunta Agrometeorología, Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC. Línea de trabajo: efecto del cambio climático y variabilidad climática sobre la producción agropecuaria. Vulnerabilidad y adaptación de los productores agropecuarios al cambio y a la variabilidad climática. [mvinocur@ayv.unrc.edu.ar](mailto:mvinocur@ayv.unrc.edu.ar)

## INDICE

**x. Prefacio: Agua, espejo de la vida**

**xx. Los autores**

**1. La molécula de agua**

*(Olga A. Jonas)*

**2. Flujos de agua en células vegetales**

*(Edith Taleisnik)*

**3. El agua del suelo**

*(Daniel E. Buschiazzo, Silvia B Aimar & Alberto R. Quiroga)*

**4. Movimiento del agua a través de la planta**

*(Alicia G. Kin)*

**5. Las plantas frente a la limitación hídrica**

*(Alberto D. Golberg)*

**6. Ecofisiología de las plantas bajo riego**

*(J. Bruno Cavagnaro)*

**7. El agua en los animales domésticos de producción**

*(Néstor P. Stritzler & Celia M. Rabotnikof)*

**8. El agua y la influencia de los humedales en la estructura y funcionamiento del paisaje: el caso de la región chaqueña**

*(Rubén Ginzburg & Jorge Adámoli)*

**9. El ciclo del agua en la naturaleza y los impactos del cambio climático y de la variabilidad climática**

*(Roberto A. Seiler & Marta G. Vinocur)*

# ECOFISIOLOGIA DE LAS PLANTAS BAJO RIEGO

6

*Juan Bruno Cavagnaro*

1. Introducción
2. Definición y tipos de riego
3. Superficie regada a nivel mundial, continental y argentino
4. El agua recurso escaso. Eficiencias de riego
5. Evapotranspiración
6. Eficiencia de uso de agua del cultivo
7. Ecofisiología de plantas bajo riego
8. Periodos críticos de necesidad hídrica
  - 8.1. Hortalizas
  - 8.2. Frutales
9. Nuevos métodos de aplicación de restricción hídrica
10. Exceso de riego. Anegamiento. Efectos fisiológicos
11. Riego y salinidad
  - 11.1. Sales más comunes en la solución del suelo
  - 11.2. Efecto fisiológico del exceso de sales en las aguas de riego
    - 11.2.1. Disminución del potencial osmótico de la solución que rodea las raíces
    - 11.2.2. Requerimiento de lixiviación
    - 11.2.3. Efecto tóxico específico de iones
    - 11.2.4. Tolerancia de los cultivos a la salinidad
12. Bibliografía

## 1. Introducción

El agua es uno de los factores esenciales para el crecimiento de las plantas. La vegetación presente en una región determinada de la tierra está fuertemente ligada al clima de esa región. El contenido de agua (a nivel atmosférico y del suelo) junto con la temperatura son los factores más importantes que limitan el crecimiento de las plantas en las distintas regiones fitogeográficas del mundo. Obviamente, la distribución de las precipitaciones (lluvia y nieve) no es uniforme en el planeta. Tampoco son uniformes las pérdidas de agua desde el suelo a la atmósfera. El balance hídrico entre la precipitación (lluvias y/o nieve) y las pérdidas (evapotranspiración, drenaje, escorrentía) que ocurren en un lugar determinado, establecen situaciones de exceso, deficiencia o disponibilidad adecuada de agua para los vegetales que viven en ese lugar. Esta caracterización de exceso, deficiencia o buena disponibilidad, en realidad es bastante simplista, pues en la práctica estas condiciones no tienen límites estrictos y además pueden variar en el tiempo y tener consecuencias diferentes según las especies consideradas.

En muchos sistemas agropecuarios el agua es uno de los factores limitantes de la producción. En general, cuando se piensa en el agua como limitante de la producción, se piensa en la escasez de este recurso. Sin embargo, en otras circunstancias, el agua limita la producción, no por ser escasa sino por exceso.

El riego ha sido una práctica humana muy antigua. Desde la antigüedad el hombre ha practicado el riego para mejorar la producción de algunos cultivos o directamente para poder cultivar en áreas donde la agricultura sería imposible sin el riego.

Ha sido pues, una actividad que ha contribuido a aumentar los rendimientos y de esa forma a aliviar el hambre en extensas zonas del mundo. Estos beneficios del riego son cada vez más necesarios para satisfacer las demandas en calidad y cantidad de la creciente población humana. En contraposición con estas innegables ventajas del riego, debemos reconocer y reflexionar sobre los problemas de salinización que afectan al 50% de las tierras irrigadas del mundo y de la baja eficiencia de riego que muestran la mayoría de las zonas irrigadas.

El riego es la herramienta ideal para optimizar el aporte de agua a nivel de raíces. Si no existen otros factores limitantes, un nivel óptimo de agua garantiza un máximo crecimiento y producción de biomasa. Sin embargo, cabe preguntarse si esas condiciones son siempre las mejores desde el punto de vista agronómico. Probablemente, en muchos casos la máxima producción de biomasa producida por un cultivo se correlaciona directamente con el mayor rendimiento agronómico. Pero en otros casos esto no es así, pues en muchos cultivos la máxima biomasa implica problemas de falta de equilibrio entre el crecimiento y las estructuras reproductivas de las cuales depende el rendimiento; es decir, se establecen competencias entre los destinos vegetativos y reproductivos disminuyendo los rendimientos. Otra consecuencia del exceso de crecimiento vegetativo en la mayoría de los cultivos frutícolas, es la baja irradiación que incide sobre las zonas de diferenciación de las yemas frutíferas, lo cual se traduce en menor cantidad de frutos al año siguiente. Finalmente, en los últimos años se han desarrollado prácticas de restricción hídrica orientadas a mejorar la calidad organoléptica de los frutos obtenidos, comparados con los provenientes de plantas con riego más abundante.

Debido a los costos que se derivan de la construcción, mantenimiento y distribución del agua en sistemas bajo riego, los cultivos seleccionados para agricultura regadía son aquellos que tienen una alta rentabilidad por kilogramo de producto comercial cosechado, mayormente cultivos hortícolas y frutícolas.

## 2. Definición y tipos de riego

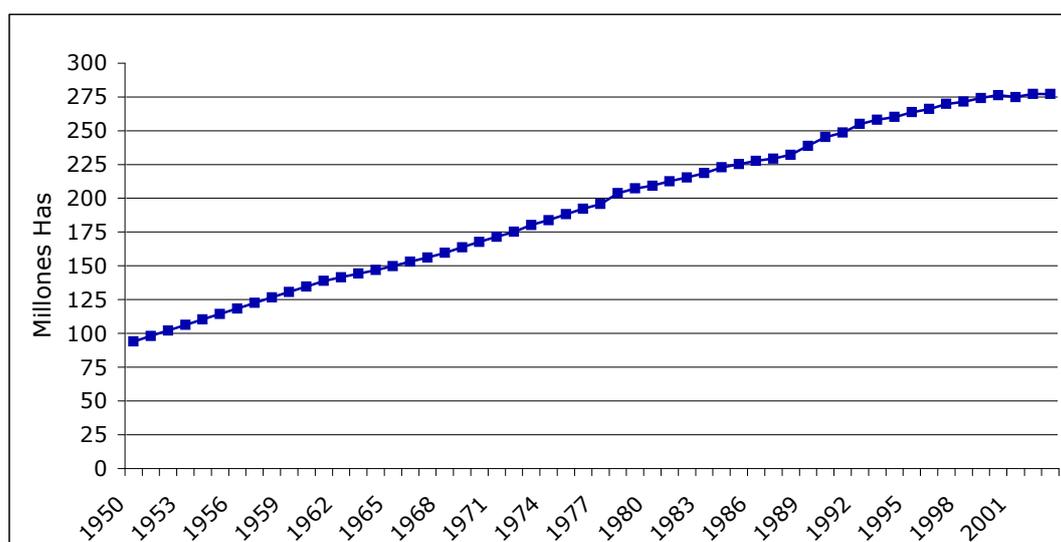
Israelsen & Hansen (1962) definieron el riego como la “aplicación artificial de agua a la tierra, con el fin de suministrar a las especies vegetales la humedad necesaria para su desarrollo”. Grassi (1998), remarca que el “riego es una actividad resultante de las acciones de los hombres”, es decir no debemos considerar riego el agua que llega a un lugar de menor altitud en forma circunstancial y no controlada. El concepto de riego también involucra las medidas que el hombre toma para obtener y derivar el agua de las fuentes y para evitar el exceso de agua, es decir las obras de drenaje cuando ellas son necesarias.

Se pueden distinguir tres tipos de riego: a) *integral*, b) *complementario* y c) *suplementario* (Grassi, 1998). Consideramos *riego integral*, cuando el aporte de la lluvia al proceso evapotranspiratorio es tan bajo que no son posibles los cultivos sin irrigación, es decir la agricultura no existiría sin el aporte de agua de riego; en este caso, el período de tiempo con déficit hídrico y la magnitud del mismo sólo permiten el crecimiento y la supervivencia de plantas adaptadas a esos ambientes, las cuales no son las consideradas en los cultivos tradicionales. El *riego es complementario*, cuando el aporte de la lluvia cubre entre un 30 y un 60% de las demandas evapotranspiratorias del cultivo; este déficit de agua requiere necesariamente complementar en mayor o menor medida el agua de lluvia para obtener rendimientos rentables en forma regular a través del tiempo. El *riego suplementario* implica casos en que la evapotranspiración es satisfecha por la lluvia y sólo se requiere regar para cubrir pequeñas irregularidades en algunos años y/o en ciertos momentos del cultivo, es decir en este tipo de riego la agricultura es posible sin esta práctica, pero la irrigación le aporta regularidad al sistema agrícola. En los dos primeros casos la obtención de rendimientos económicamente aceptables, justifican y requieren el desarrollo de sistemas de riego con su correspondiente infraestructura.

### 3. Superficie regada a nivel mundial, continental y argentino

No es fácil encontrar estadísticas modernas y precisas sobre las superficies irrigadas a distinto nivel. Los datos muchas veces son muy diferentes según la fuente consultada o el método utilizado para su estimación.

La superficie bajo riego en el mundo se estima actualmente en 277 millones de hectáreas (Fig. 1). Esta superficie, constituye un 16-17% del total cultivado del mundo. Sin embargo, la importancia de la agricultura bajo riego es destacable pues se calcula que ella provee casi el 40% de la producción del mundo (Grassi, 1998) lo que indica una producción por hectárea muy superior al resto de las tierras cultivadas. La superficie se ha triplicado desde el año 1950 a la fecha, aunque la tasa de aumento se ha reducido drásticamente en las últimas décadas. Del total de agua dulce utilizada por el hombre, casi un 70% se destina a la agricultura, un 20% a uso industrial y 10% a uso residencial. En el futuro se pronostica una disminución de la proporción destinada a riego agrícola y un aumento de los usos industriales y residenciales como consecuencia del crecimiento poblacional e industrial de la humanidad. Además, es importante remarcar que en varias regiones del mundo tanto los ríos como las napas que proveen agua para riego están sobreexplotadas (Mygatt, 2006). Por lo tanto, en las próximas décadas será necesario aumentar la producción de alimentos, con menor disponibilidad de agua para irrigación.



**Figura 1.** Superficie irrigada mundial desde 1950 a 2003. Elaborada a partir de datos de Wordlwatch Institute (2001) y FAOSTAT Statistics Database (apps.fao.org. 2006).

Tomando en cuenta los distintos continentes, la mayor superficie irrigada corresponde a Asia, con alrededor del 70% del total mundial, dedicada principalmente al cultivo del arroz, alimento básico para la población de ese continente.

Según Bertranou & Schulze (1993), Sudamérica posee una superficie irrigada muy reducida respecto a otros continentes, pues sólo se riegan 15 millones de hectáreas. Cinco países, México, Bra-

sil, Argentina, Chile y Perú suman 12.12 Mha (81% del continente), sobresaliendo México que posee 5.15 Mha.

En el caso de la Argentina, según la misma fuente anterior, la superficie regada en 1989, alcanzaba a 1.750.000 hectáreas. Del total irrigado en la Argentina se destacan la zona de Cuyo (Mendoza y San Juan con cerca de 500.000 has, y del Noroeste (Salta, Jujuy, Tucumán, Catamarca, Santiago del Estero y La Rioja) con una superficie levemente inferior a la de Cuyo. Cabe resaltar el aumento importante registrado en los últimos años en zonas de la pampa central donde el riego se usa fundamentalmente como complemento para momentos de escasez temporaria de agua. Si bien a nivel mundial, el aumento de la superficie irrigada es poco factible, en el caso de Argentina, las perspectivas son más favorables, sobre todo en algunas cuencas y ríos subutilizados actualmente. En esos casos, el uso del agua, no sólo para irrigación sino para generación de energía eléctrica debería aumentar en el futuro cercano. Esto no excluye, la urgente necesidad de efficientizar la utilización del agua para riego y otros usos en nuestro país.

#### 4. El agua recurso escaso. Eficiencias de riego

El valor del agua es un concepto intuitivo en la mayoría de las personas y sobre todo en los habitantes de regiones áridas y semiáridas del mundo. El agua es un elemento esencial para la vida tal como la conocemos. A este valor biológico se le agrega además, el valor económico y social que tiene para la humanidad. En los últimos años se ha tomado conciencia a nivel mundial que el agua dulce es un recurso escaso y que probablemente constituya uno de los elementos de conflicto de la humanidad en el futuro.

La importancia y el buen uso que debemos hacer del agua están sintetizados por Grassi (1966a) en una expresión del Dr Israelsen quien decía que “ningún hombre tiene derecho a gastar el agua que otro hombre necesita”. Nuestra legislación considera al agua como un bien público, que se concede para su uso urbano, agrícola o industrial. Es decir, el Estado no pierde la propiedad del agua y por lo tanto quien la usa, aún dentro de una propiedad privada, debe hacerlo con responsabilidad evitando el mal uso de la misma.

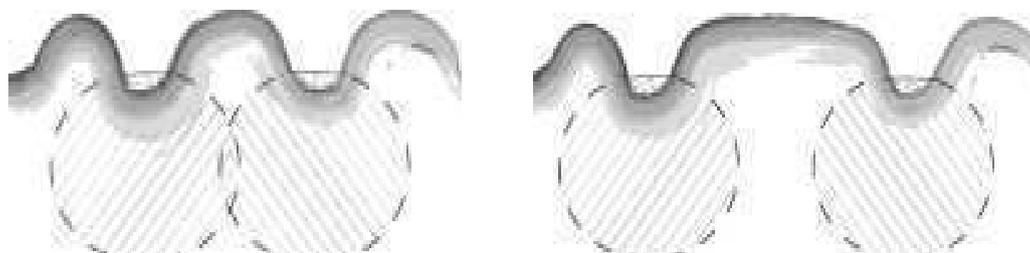
Una forma de economizar agua es *evitar las pérdidas* que ocurren en las distintas etapas que sigue el agua hasta su aplicación al cultivo. Estas pérdidas incluyen el agua que no ingresa a la planta es decir, la que se pierde por evaporación directa desde el suelo, por escorrentía y por percolación profunda (debajo de la zona explorada por las raíces). Las pérdidas se expresan en hidrología agrícola como una relación llamada eficiencia (Grassi, 1966b). De acuerdo con este autor debemos considerar: a) eficiencia en la conducción, b) eficiencia dentro de la parcela y c) eficiencia del sistema de riego.

*Eficiencia en la conducción:* incluye todas las pérdidas en la red de canales hasta llegar a la propiedad. Esta eficiencia expresa la relación entre el agua que llega a la propiedad y el agua derivada del río o del embalse. Los valores de eficiencia de conducción reportados por Grassi varían entre 15 y 55% dependiendo de los países evaluados y los autores citados.

*Eficiencia dentro de la propiedad:* incluye dos aspectos, b1) *pérdidas en el sistema de distribución interno*, referidas a las pérdidas por evaporación y percolación profunda en todas acequias y b2) *pérdidas en la parcela regada*, debidas al agua que escurre de la parcela y al agua que se pierde por percolación profunda.

*Eficiencia del sistema de riego:* en el cual debe considerarse: c1) *eficiencia de aplicación del agua*, en este caso, los sistemas de riego localizado (aspersión, microaspersión, goteo) tienen eficiencias de aplicación muy altas (aprox. 90%) comparadas con los sistemas de riego superficial (60%); c2)

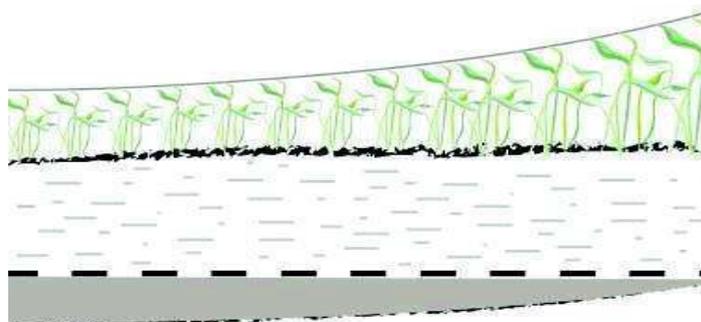
*eficiencia de uso consuntivo*: evalúa el volumen de agua realmente transpirado respecto al aplicado; c3) *eficiencia de almacenaje y distribución de agua*: toma en consideración la uniformidad en la distribución del agua en todos los sectores del perfil regado y la cantidad de agua almacenada en el suelo respecto a la zona radical.



**Figura 2.** Distribución del agua en el suelo con dos espaciamientos de surcos diferentes.

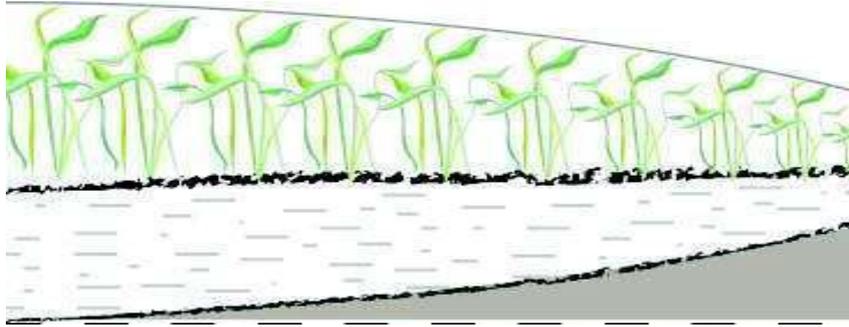
La Figura 2 muestra un esquema de la distribución del agua en el suelo en un sistema de riego por surcos con diferente distancia entre surcos. En el caso de la izquierda la distancia entre surcos permite un mojado del suelo en forma total y uniforme. En cambio, en el caso de la derecha, la distancia de los surcos es excesiva y en consecuencia, existen zonas que no son humedecidas por el riego, disminuyendo la uniformidad de mojado del suelo.

En otros casos, la falta de uniformidad en la zona humedecida por el riego se debe al tiempo de riego que se aplica en la melga o el surco. La Figura 3 esquematiza un caso en el cual para poder cubrir la zona radical del cultivo en el extremo de la melga, se debe extender el tiempo de riego, lo cual provoca un exceso de agua en la cabecera (zona sombreada por debajo de la profundidad explorada por raíces), con los consiguientes problemas de falta de aireación en esa zona, que pueden afectar el crecimiento del cultivo.



**Figura 3.** Esquema mostrando un mojado excesivo en la cabecera y adecuado en el pie.

Un caso opuesto al anterior se muestra en la Figura 4. En ella se esquematiza un mojado del suelo hasta la profundidad alcanzada por las raíces (línea punteada inferior) en la cabecera de la melga. Pero debido a un tiempo de riego insuficiente, el agua infiltrada en el extremo de la melga es insuficiente para mojar adecuadamente el perfil explorado por las raíces en este sector de riego. En consecuencia, las plantas del extremo tienen menor crecimiento que en la cabecera debido al déficit hídrico que sufren en cada riego.



**Figura 4.** Esquema mostrando un riego adecuado en la cabecera pero deficiente en el extremo de la melga.

Los sistemas de riego localizado (aspersión, goteo, microaspersión) sin duda aumentan en forma notable la eficiencia global del riego. Además, son irremplazables en ciertas condiciones donde la topografía hace muy riesgoso o imposible el riego superficial. Como contrapartida, requieren mayores inversiones para su implementación aunque en algunos casos, esa mayor erogación se compensa con ahorros en trabajos de nivelación.

Los interesados en medir las distintas eficiencias y en mejorarlas pueden consultar los numerosos tratados de hidrología agrícola escritos al respecto, entre los cuales mencionamos: Grassi (1966b; 1998), INTA (1966), De Santa Olalla Mañas & De Juan Valeros (1993), Chambouleyron (2005).

## 5. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) o pérdida de agua hacia la atmósfera incluye dos procesos: a) evaporación (E) de agua desde el suelo y b) transpiración (T) de la planta. Durante las primeras etapas de un cultivo anual, la proporción de agua perdida por E es muy superior al agua transpirada. A medida que el cultivo avanza en el ciclo, esta proporción se va invirtiendo y una vez que se logra la cobertura total, la T es el componente fundamental de la ET. Es importante remarcar que para la fisiología de la planta y para la productividad agrícola, sólo es importante el agua que pasa a través de ella, es decir el agua transpirada.

Se denomina *Evapotranspiración potencial* (ET<sub>p</sub>) a la máxima tasa de pérdida de agua de un cultivo extenso que cubre totalmente el suelo, se encuentra en activo crecimiento y sin restricciones hídricas del suelo, bajo ciertas condiciones climáticas. La aclaración de extenso, incluye la necesidad de evitar la advección en los bordes, que puede influir en la determinación en ambientes áridos y semiáridos. La ET<sub>p</sub> de distintos cultivos, para una misma condición climática, varía entre un 10 y un 20% debido a diferencias en color, altura, características aerodinámicas y conductancia de la canopia (Loomis & Connor, 1992).

La *Evapotranspiración real o actual* (ET<sub>a</sub>) es la que se produce en esas condiciones ambientales, pero donde la cobertura puede no ser total y los niveles de humedad del suelo varían entre riego y riego. La ET<sub>a</sub> es menor que la ET<sub>p</sub> debido al contenido de agua del suelo, a la falta de cobertura total y a las características morfológicas y fisiológicas de cada cultivo.

Otro término, introducido por Doorenbos & Pruitt en 1974, muy usado en el estudio de la evapotranspiración es el de *Evapotranspiración de referencia* (ET<sub>o</sub>). La ET<sub>o</sub> es la pérdida de agua de una superficie extensa, cultivada con gramíneas perennes, de 8-10 cm. de altura que sombrea totalmente el

suelo y bien provisionada de agua, en determinada condición climática. La ETp de muchos cultivos supera a la ETo definida de esta manera. Sin embargo, la ET de referencia es muy usada como forma de unificar el concepto en base a un cultivo muy definido y más comparable para todos los casos.

La ETp puede ser determinada experimentalmente mediante parcelas de ensayo con cobertura total y riego no limitante donde se mide periódicamente el balance de agua del suelo o bien con lisímetros que son grandes recipientes rellenos de suelo donde se encuentra un cultivo con cobertura total y donde se pueden medir con exactitud, mediante pesada, el aporte de agua por riego y las pérdidas por evapotranspiración. También existen numerosas fórmulas desarrolladas para el cálculo de la ETo, las cuales toman en consideración diversas variables climatológicas. Estas fórmulas han sido desarrolladas en distintos lugares del mundo, con características climáticas diversas, por lo cual, cada interesado deberá seleccionar aquella que mejor se ajuste a las particulares condiciones de su cultivo. Una estimación muy difundida de la ETo se basa en la utilización de la evaporación producida en el tanque de evaporación standard que existe en las estaciones meteorológicas y relacionar ese valor con ETo mediante la aplicación de un coeficiente de tanque, es decir  $ETo = k \text{ tanque} \times E \text{ tanque}$ . En muchos casos la k tanque que se utiliza es 0.75.

La relación entre  $ETa / ETo$  permiten definir los llamados *coeficientes de cultivo* (kc), los cuales generalmente se calculan para determinadas fases fenológicas del mismo. Estos coeficientes tienen valores que van cambiando con el ciclo vegetativo; al comienzo del mismo son menores a la unidad y en algunos momentos pueden superar a la unidad. La ventaja de conocer los kc de un determinado cultivo, es que permite estimar la ETa a partir de la ETo ( $ETa = kc \times ETo$ ).

Para profundizar estos aspectos recomendamos remitirse a lo publicado en Grassi (1966 b); INTA, 1966; Loomis & Connor (1992); De Santa Olalla Mañas & De Juan Valeros (1993); Vallone & Nijensohn (2002); Chambouleyron (2005).

## 6. Eficiencia de uso de agua del cultivo

La Eficiencia de Uso de Agua de un cultivo (EUAc) se define como la producción de materia seca (MS) por unidad de agua utilizada por el cultivo. Esta respuesta del cultivo, de gran importancia agronómica y ecológica, puede expresarse de distintas formas según lo que colocamos en el numerador. Así, podemos tener la EUA de la biomasa total (EUAb) si en el numerador colocamos la biomasa total del cultivo o la EUA del rendimiento (EUAY) si colocamos la materia seca correspondiente al rendimiento del producto agrícola comercial (Loomis & Connor, 1992).

$$EUAY = \text{g de MS del producto comercial} / \text{g de agua utilizada por el cultivo}$$

A los fines de la agricultura bajo riego, es importante utilizar la biomasa del producto de valor comercial y no la biomasa total de la planta, pues en muchas especies cultivadas estas dos formas de expresión no guardan correlación. Sólo en algunos cultivos hortícolas de hoja, en especies forrajeras y forestales, la biomasa total es un buen indicador de la EUA. En cambio, en cultivos hortícolas donde el producto comercial está representado por frutos, tubérculos, bulbos o rizomas, muchas veces el desarrollo de una gran masa foliar tiene resultados perjudiciales en la producción de esos órganos. Lo mismo ocurre con las especies frutícolas, donde es importante lograr un equilibrio entre el crecimiento vegetativo y la carga frutal.

Este concepto de EUA y ha sido denominado Productividad del Agua por Fereres *et al.* (2003), ó Eficiencia Evapotranspiratoria (Et) por Vallone & Nijensohn (2002), aunque estos últimos autores definen en realidad la inversa de la EUA. Sin embargo, el término EUA es el más difundido en la literatura referida a Fisiología y Ecología Vegetal.

Cualquiera sea la denominación, es importante remarcar que el aumento de la EUA, ya sea porque aumenta el rendimiento del cultivo, porque disminuye el agua evapotranspirada, o por ambos aspectos simultáneamente, se traduce en un ahorro de agua por unidad de alimento producido y constituye una de las formas de luchar contra el desafío de producir más alimentos con una disponibilidad menor de agua de riego en el futuro.

El aumento del rendimiento, a igualdad de agua utilizada, depende de numerosos factores. La optimización de los aspectos de manejo, como fertilidad, riego, sanidad, clima adecuado, etc. seguramente mejorarán la EUA, pues aumentarán la MS producida por unidad de agua aplicada.

Desde el punto de vista del riego, para aumentar la eficiencia del uso del agua, se debe minimizar la proporción de agua evaporada desde el suelo, respecto a la transpirada. Un buen manejo del riego debería disminuir el humedecimiento de las capas superficiales del suelo, en las primeras etapas del cultivo. Una de las ventajas del riego por goteo, radica justamente en que el diseño del mismo permite disminuir el área mojada con lo cual se limita la proporción de agua evaporada y la presencia de malezas a la zona superficial humedecida por el gotero.

La EUA también depende de la elección de la especie a cultivar en un determinado ambiente. Recordemos que según el tipo fotosintético, las especies se pueden dividir en 3 grandes grupos: C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> y CAM. Las especies CAM poseen la mayor EUA (0.055-0.008), básicamente derivado de la baja ET de estas plantas, las cuales abren sus estomas durante la noche cuando la demanda evaporativa de la atmósfera es mucho menor que en el día. Sin embargo y a pesar de tener una alta EUA (baja ET), el rendimiento comercial de las plantas CAM es muy reducido respecto a las plantas C<sub>3</sub> ó C<sub>4</sub>. Es decir, tienen una baja producción de MS debido a que la cantidad de CO<sub>2</sub> necesario para la fotosíntesis durante las horas de luz se produce a partir del malato acumulado en la noche en las vacuolas. La cantidad de malato que se puede almacenar en las vacuolas de estas especies es limitado y por ende la provisión de CO<sub>2</sub> para la fotosíntesis. La EUA de las especies C<sub>4</sub> (0.0040-0.0028) es mayor que las C<sub>3</sub> (0.0022-0.0010). La diferencia en la EUA de las especies C<sub>4</sub> se debe a características bioquímicas, anatómicas, fisiológicas y ecológicas que se traducen en una mayor producción de MS por g de agua utilizada. Fundamentalmente la mayor capacidad de producir materia seca de las C<sub>4</sub>, se debe a que poseen un mecanismo concentrador de CO<sub>2</sub> a nivel de las células de la vaina de Kranz, que evita las pérdidas derivadas de la fotorespiración, sobre todo en ambientes cálidos y/o con déficit hídrico. En esas condiciones, a igualdad de agua consumida la producción de MS en las C<sub>4</sub> será superior a las C<sub>3</sub>.

En la Tabla siguiente (modificada de Kramer & Boyer, 1995) se muestra la EUA, promedio de siete años de cultivo, para especies C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub>.

**Tabla 1.** Eficiencia de uso del agua de especies C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub>.

ESPECIE	Alfalfa	Avena	Cebada	Trigo	Maíz	Alpiste	Sorgo
TIPO FOTOSINTETICO	Tipo C <sub>3</sub>				Tipo C <sub>4</sub>		
EUA (g agua/g MS)	0.0012	0.0019	0.0017	0.0021	0.0028	0.0037	0.0035

Además de las diferencias importantes debidas al tipo fotosintético, existen variaciones entre las especies, dentro de un mismo tipo fotosintético y aún diferencias varietales o ecotípicas dentro de una misma especie. Por ejemplo, en la gramínea forrajera nativa *Trichloris crinita*, se encontraron grandes diferencias en la EUA en 3 variedades, las cuales recibieron la misma cantidad de agua de riego, pero tuvieron variaciones del 80% en la producción de MS de la planta (Greco & Cavagnaro, 2002).

Al discutir el concepto de EUA es interesante tener en cuenta que no siempre una alta EUA se correlaciona con una máxima producción. En muchos casos, el cultivo en condiciones de baja disponibilidad hídrica (estrés moderado) disminuye los rendimientos comerciales, mientras que aumenta la EUA. Para ejemplificar este aspecto, consideraremos el trabajo de Abatte *et al.* (2004) quienes evaluaron la producción de trigo y la EUA del cultivo, en varios sitios de la Argentina, (diferentes condiciones climáticas) en ensayos con alta y baja disponibilidad hídrica en el suelo. En la mayoría de los ensayos la producción estuvo relacionada positivamente con la disponibilidad hídrica, es decir, a mayor disponibilidad de agua mayor rendimiento. En todos los casos la EUA estuvo inversamente relacionada con la disponibilidad de agua en el suelo. Esto es, la EUA fue mayor en los cultivos con limitación hídrica (menor producción). Los autores postulan que este aumento de la EUA estaría ligado al cierre estomático que se produciría al mediodía - cuando el déficit de presión de vapor es máximo - lo cual disminuye el agua utilizada por unidad de peso de MS. Abatte *et al.* (2004) también señalan que la variable climática que mejor se relaciona con la EUA es el déficit de presión de vapor.

## 7. Ecofisiología de plantas bajo riego

El riego es la forma de optimizar el aporte de agua a las raíces de las plantas de un cultivo, por lo tanto al describir la ecofisiología de plantas bajo riego, debemos tener en cuenta que en ese caso, las plantas se encuentran en condiciones óptimas para cumplir con sus funciones fisiológicas.

En el sistema suelo-planta-atmósfera, el agua se mueve a favor de un gradiente de potencial hídrico. El suelo es la parte del sistema con mayores potenciales hídricos y la atmósfera el extremo con valores más negativos de potencial agua.

Todos los procesos fisiológicos de la planta requieren una buena hidratación de los tejidos y órganos de la misma. Bajo condiciones de riego, la fotosíntesis se realizará sin ninguna limitación por el factor agua y si el resto de los factores que influyen sobre este proceso (intensidad lumínica, concentración de CO<sub>2</sub>, nutrimentos, temperatura, etc.) se encuentran dentro de los rangos óptimos, la capacidad de producir materia seca será máxima. Bajo esas condiciones, los estomas estarán abiertos durante las horas de luz (excepto en plantas CAM) favoreciendo el intercambio de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera hacia los cloroplastos y como contrapartida, tampoco estará afectada biológicamente la transpiración; por lo tanto, la EUA estará determinada por la capacidad de producir fotoasimilados. En plantas de tipo C<sub>3</sub>, algún efecto beneficioso de esta alta tasa transpiratoria podría ser la reducción de la temperatura del follaje, lo cual disminuye las pérdidas por fotorespiración que ocurren en este tipo de plantas.

Además, un adecuado estado hídrico es imprescindible para que los distintos órganos de la planta tengan una alta tasa de crecimiento (suponiendo que no existan otras limitantes) pues el crecimiento de cualquier órgano se produce como respuesta al potencial de turgencia ejercido sobre cada una de las células de ese tejido u órgano en crecimiento. Por esa razón hemos señalado previamente que el crecimiento es el proceso de la planta más sensible al déficit hídrico (ver capítulo 5). La sensibilidad del crecimiento al déficit hídrico es tan grande que aún en condiciones de capacidad de campo, en climas áridos y semiáridos, la tasa de crecimiento a ciertas horas del día puede ser nula o muy baja como consecuencia del desfasaje entre la transpiración y la absorción de agua. Esa es la razón por la cual las mayores tasas de crecimiento de la mayoría de las especies se registran al atardecer y durante la noche, cuando la planta se rehidrata y aumenta el potencial turgencia de los tejidos en crecimiento. Esta disminución de la turgencia que normalmente ocurre en las últimas horas de la mañana y parte de la tarde, puede producir un cierre temporario de estomas a medio día en algunas especies, mientras que en otras, la disminución del crecimiento puede ocurrir sin que se afecte la apertura estomática.

Una buena hidratación también produce mayor crecimiento de las raíces, que podrán explorar mayor volumen de suelo y de esa forma la planta tendrá mejores posibilidades de acceder a los nutrientes minerales presentes en la zona radical.

El agua tiene también la función de solubilizar los elementos minerales del suelo. Los elementos minerales esenciales para el crecimiento de los vegetales son absorbidos por las plantas al estado iónico, algunos como aniones y otros como cationes. El agua es el solvente en el cual los nutrientes llegan a nivel de las membranas celulares de las células de la raíz posibilitando la absorción de los mismos al interior del simplasto. Sin embargo, es importante remarcar que el ingreso de los nutrientes no sigue el mismo camino que el agua. Cada nutriente atraviesa la membrana celular por proteínas específicas - transportadores o canales - mientras que el agua lo hace también por proteínas específicas para entrada del agua llamadas acuaporinas (ver capítulo 2) y en menor medida, directamente a través de la capa lipídica. El movimiento de los nutrientes desde la raíz hacia las partes superiores de la planta se realiza fundamentalmente por arrastre en la corriente transpiratoria, por lo cual una transpiración elevada beneficia la distribución de los nutrientes desde el xilema de la raíz a los órganos aéreos que los requieren para cumplir con sus procesos vitales. El transporte de fotoasimilados, el cual ocurre por el floema, es otro de los procesos en los cuales el agua juega un papel muy importante. Al ingresar la sacarosa a nivel de los elementos del tubo criboso, en la zona de carga de fotoasimilados, disminuye el potencial osmótico y el potencial agua en esas células. Esto produce la entrada de agua, aumenta la presión hidrostática dentro de los tubos cribosos y provoca el flujo masal desde la zona de carga (cercana a las fuentes) hacia la zona de descarga en los destinos de la planta.

El mantenimiento del suelo con un contenido hídrico constante sólo es posible experimentalmente en condiciones muy especiales. Al menos en el caso del riego superficial, el contenido hídrico del suelo no permanece constante entre riego y riego, sino que por el contrario, sufre variaciones importantes. La magnitud de esas variaciones depende del límite inferior o umbral de agua disponible del suelo que el técnico se haya fijado para volver a regar el cultivo. La Figura adjunta muestra un ejemplo de las variaciones del potencial hídrico del suelo (en MPa), en función del tiempo, y en el cual se ha fijado un límite inferior de  $-0.75$  MPa para regar nuevamente el suelo.

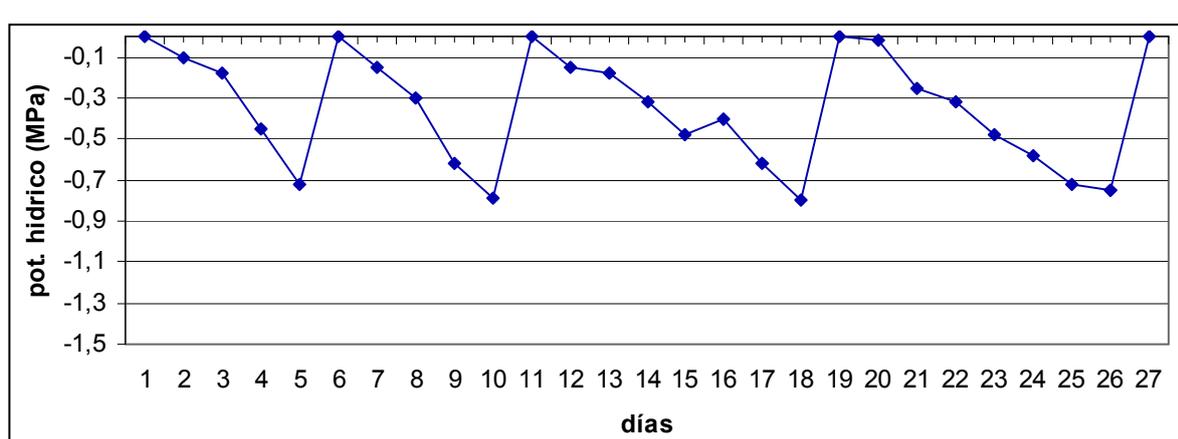
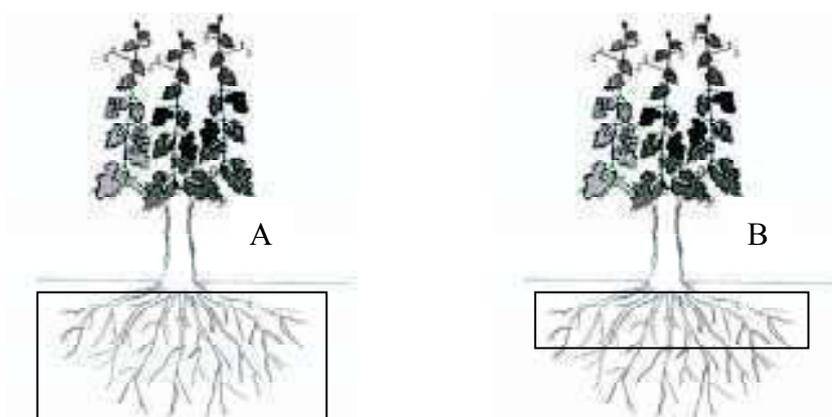


Figura 5. Variación del potencial hídrico en función del tiempo, con un umbral de riego fijado en  $-0.7$  MPa.

En ensayos con restricción hídrica es importante señalar algunos aspectos para evitar interpretaciones erróneas desde el punto de vista edáfico y fisiológico. Supongamos un cultivo hortícola cuyas raíces exploran hasta 60 cm. de profundidad de suelo y que por las caracterís-

ticas del mismo tiene una reserva de agua útil del perfil de 120 mm. Si nosotros reponemos el riego cuando se ha consumido el 100% del agua útil, deberíamos agregar 120 mm para que la totalidad del perfil con raíces vuelva a capacidad de campo, lo cual está representado en la Figura 6A adjunta (haciendo omisión de la posible necesidad del coeficiente de lixiviación de sales). Si en lugar de agregar esa lámina sólo agregamos 60 mm, lo que sucede en la práctica es que sólo la mitad superior del suelo retornará a capacidad de campo y el resto permanecerá en condiciones de marchitamiento permanente. Es decir, hay una zona de raíces con humedad óptima y otra zona en condiciones de extrema sequía (Caso B). Es un error considerar que todo el perfil explorado por las raíces tendrá un contenido hídrico intermedio. Hay trabajos que demuestran que la zona de raíces húmedas cede agua a la zona de raíces secas. Esas raíces de la zona seca, a su vez transfieren agua al suelo, especialmente de noche, pues el gradiente de potencial agua en esa región determina el movimiento de agua desde las raíces al suelo, como ha sido comprobado en ensayos de plantas con raíces divididas (Blum & Johnson, 1992).



**Figura 6.** La zona en el recuadro indica la profundidad de suelo mojado cuando se repone el 100% (A) y el 50% (B) del agua necesaria para cubrir la capacidad de campo de un suelo determinado.

## 8. Períodos críticos de necesidad hídrica

La posibilidad que nos brinda el riego de dar a la planta la cantidad de agua necesaria en el momento oportuno, pone a la agricultura bajo riego en condiciones de optimizar el uso del recurso agua. Para optimizar el uso es necesario conocer cuales son los requerimientos hídricos de los distintos cultivos en distintas etapas del ciclo vegetativo. Es decir, es necesario conocer o determinar los *períodos críticos de necesidad de agua*. Definimos período crítico de necesidad de agua, a la etapa fenológica del cultivo, donde un estrés hídrico moderado o severo, provoca una disminución significativa de los rendimientos. El conocimiento de estos períodos críticos, permiten al técnico manejar el riego economizar agua en otras etapas fenológicas de mayor tolerancia a cierto nivel de deficiencia hídrica. El conocimiento de los períodos críticos ha sido una inquietud en el mundo desde hace muchas décadas (Salter & Goode, 1967). Es necesario remarcar que el estrés hídrico afecta las plantas por su intensidad, duración y etapa del ciclo vegetativo en el cual actúa.

También es necesario remarcar que para un manejo racional de la restricción hídrica es necesario contar con los equipos y/o metodología adecuada que nos permita evaluar en forma correcta y confiable el estado hídrico de las plantas. Los técnicos y productores que aplican el método de riego deficitario controlado deben controlar los niveles de estrés en las plantas y deberían tener la capacidad tecnológica para regar el cultivo cuando se haya alcanzado el nivel de estrés prefijado.

### 8.1. Hortalizas

Restricciones hídricas aplicadas en distintos momentos del ciclo vegetativo de la papa (*Solanum tuberosum* L) produjeron una disminución significativa de los rendimientos de tubérculos cuando el estrés se aplicó en estolonización y comienzos del crecimiento del tubérculo. En cambio cuando la restricción se aplica durante la plantación del tubérculo madre se encontró una tendencia al aumento de los rendimientos. En el resto de las etapas fenológicas, el estrés disminuyó levemente los rendimientos (Lis *et al.*, 1964). Posteriormente se estudió el efecto del déficit hídrico aplicado en el momento de plantación, sobre la posibilidad de evitar el efecto del estrés hídrico en período crítico (estolonización y tuberización). Los resultados mostraron que es posible rusticar a las plantas mediante estrés en plantación, pues al aplicar luego una restricción hídrica en el período crítico, los rendimientos fueron iguales a los del testigo regado en forma normal durante todo el ciclo vegetativo, con un aporte de agua de sólo el 58% del agua recibida por el testigo (Cavagnaro *et al.*, 1971).

En cebolla (*Allium cepa*, L), estudios sobre requerimientos hídricos (Lis *et al.*, 1967; 1968a) demostraron que el período de bulbificación es un momento crítico, donde el estrés hídrico produce disminuciones significativas del rendimiento. En cambio, deficiencias hídricas moderadas en almácigo y postransplante no afectaron los rendimientos. Por el contrario, produjeron una tendencia a aumentar la producción aunque estos aumentos no fueron significativos. Tampoco afectó los rendimientos la suspensión del riego en la etapa final del crecimiento del bulbo. En resumen, podemos aplicar restricciones hídricas moderadas en las primeras etapas de crecimiento de follaje y hasta inicio de bulbificación, regar adecuadamente hasta que el bulbo alcance 70% de su tamaño final y restringir nuevamente los riegos al final.

El ajo (*Allium sativum*, L.) es un cultivo que requiere buenas condiciones de riego durante todo el ciclo vegetativo. La restricción hídrica en cualquier momento del ciclo afectó significativamente los rendimientos (Lis *et al.*, 1968b). En las variedades que emiten escape floral (tipo colorado) el estrés hídrico también afectó la emisión de estos órganos.

En el caso del pimiento (*Capsicum annun*, L) se puede realizar restricción hídrica sin efecto detrimental en los rendimientos desde el momento de envero de los frutos en adelante. En cambio, la etapa de crecimiento vegetativo y de diferenciación de yemas fructíferas constituyen dos momentos críticos de sensibilidad a la falta de agua (Lis *et al.*, 1969).

En lenteja se estudió el efecto de deficiencias hídricas aplicadas en estado juvenil, floración, cuajado y llenado de frutos comparado con un testigo sin restricción hídrica durante todo el ciclo vegetativo (Greco & Cavagnaro, 1991). La falta de agua en estado juvenil, floración y cuajado de frutos produjeron disminuciones significativas del crecimiento (entre 30 y 90% de disminución) fundamentalmente debido a un menor número de vainas por planta.

## 8.2. Frutales

En el caso de los frutales, por ser la mayoría de ellos plantas leñosas de ciclo plurianual, debemos tener en cuenta que la producción frutal generalmente incluye dos ciclos vegetativos. La inducción y diferenciación de las yemas fructíferas ocurre en el ciclo vegetativo “n-1”, luego entran en dormición, pasan el período invernal en ese estado y la floración, cuajado y crecimiento de frutos ocurre en el ciclo vegetativo “n”. Por lo tanto en ellos los efectos de manejo hídrico y de otros factores agronómicos deben ser considerados en un ciclo de dos ó más años. También puede generalizarse que en frutales de carozo y en vid la curva de crecimiento de los frutos tiene la forma típica de una doble sigmoide, es decir la podemos dividir en tres etapas: la etapa I que incluye la primera sigmoide, con un período de rápido crecimiento debido fundamentalmente a multiplicación celular y algo de alargamiento celular; la etapa II de crecimiento muy lento o casi nulo que en frutales de carozo coincide con el período de endurecimiento del carozo; el inicio de la fase II coincide con el inicio del cambio de color y ablandamiento del fruto y la etapa III en la cual se manifiesta una segunda sigmoide con un rápido crecimiento del fruto, debido fundamentalmente al agrandamiento celular.

En duraznero, la fase III de crecimiento del fruto es una etapa crítica de sensibilidad hídrica (Chalmers *et al.*, 1981; Li *et al.*, 1989). En durazneros de cosecha tardía el estrés hídrico (riego con 25% de la ET máxima) desde floración a endurecimiento de carozo, no tuvieron efecto significativo al final del ciclo, en longitud de brotes, ni en peso seco de frutos y sólo leve disminución (2-3 mm) sobre el diámetro de frutos. En variedades de cosecha temprana, habría un período de sensibilidad desde floración a fin de endurecimiento de carozo, mientras que la deficiencia hídrica poscosecha (25% de la ET máxima) tiene efectos beneficiosos sobre la producción del año siguiente, aunque aumentó el número de frutos dobles (Cuadernos Value, 1995; Ruiz Sánchez & Girona, 1995).

En ciruelo, los resultados obtenidos en USA mostraron que existe un período crítico de necesidad hídrica que va desde la fase final de endurecimiento del carozo hasta la fase final de crecimiento del fruto. El estrés en estos períodos afectó significativamente el tamaño del fruto. Los efectos al año siguiente, con riego normal en todas las etapas fenológicas, fueron contrarios a los obtenidos en el año del estrés. Es decir, existe un post-efecto de los tratamientos de estrés sobre la producción del año siguiente. En un trabajo reciente Shackel *et al.* (2000) estudiaron tres regímenes hídricos según el nivel al cual llegaba el potencial agua a mediodía y que ellos denominaron húmedo (potencial agua a mediodía mayor de -1.0 MPa), medio (potencial agua de aprox. -1.5 MPa) y seco (potencial agua aprox. a -2.0 MPa). El tratamiento seco tuvo una disminución significativa del peso fresco de frutos, pero no hubo diferencias cuando se consideraba el peso seco. El tratamiento seco ahorró un 40% del agua del tratamiento húmedo. En resumen, produjo igual peso seco de fruto por hectárea, con un ahorro de agua y además evitó el problema del “añerismo” o “vejería” es decir la alternancia de producciones altas y bajas que sucede en ciertos cultivares de frutales.

El almendro ha sido cultivado durante mucho tiempo en áreas de suelos pobres y deficientes de agua. Sin embargo para obtener producciones rentables debe cuidarse el manejo del riego. En almendro, desde brotación y hasta que el fruto alcanza su tamaño máximo, los frutos y brotes compiten por el agua, pues ambos son fuertes destinos en crecimiento. Este período debe ser considerado como la etapa crítica de necesidad hídrica. Una vez que los frutos alcanzan la madurez del carozo que en este caso es la cáscara de la almendra, se pueden efectuar restricciones hídricas moderadas a severas hasta cosecha con poco efecto sobre los rendimientos (Girona & Marsal, 1995). Es importante que en post cosecha el cultivo no tenga estrés y tenga un canopeo activo, pues de lo contrario se afecta la cosecha del año siguiente. En las condiciones de España estos autores mostraron que riegos durante todo el ciclo con 70% de la ETmax. produjeron disminuciones del 12% de los rendimientos por hectárea, pero un ahorro de agua del 65%.

Para manzano la curva de crecimiento corresponde a una sigmoide simple. La etapa de crecimiento rápido de fruto es la más sensible al déficit hídrico. En cambio, un déficit hídrico moderado en

la primera etapa de crecimiento del fruto, la cual coincide con rápido crecimiento de los brotes, no afecta el rendimiento. Además la restricción hídrica moderada en este período disminuye la incidencia de dos desórdenes fisiológicos, uno provocado por una deficiencia localizada de calcio (Bitter pit) y otro conocido como corazón acuoso.

En el caso de peral, las consideraciones generales coinciden con el manzano. La fase de mayor sensibilidad al déficit hídrico es la etapa de crecimiento rápido del fruto. En cambio restricciones hídricas del 25 y 45% de la ET máxima en inicio de crecimiento de brotes y etapa lenta crecimiento de frutos, produjeron aumento de los rendimientos a condición que durante el período crítico se regara con el 100% de ET máxima. La restricción hídrica en esos períodos produjo un ahorro de 2000 m<sup>3</sup>/ha y un aumento de la eficiencia de uso de agua de 22 kg de fruta por m<sup>3</sup> de agua utilizada, comparada con 12.5 kg de fruta/m<sup>3</sup> del tratamiento testigo.

La vid es un cultivo originario de zonas mediterráneas donde normalmente las precipitaciones producidas durante el invierno recargan el perfil del suelo y los cultivos vegetan durante la estación de crecimiento llegando al momento de cosecha con bajos contenidos hídricos en el suelo en muchas zonas vitícolas. La adaptación a estas condiciones ha determinado que la vid sea un cultivo relativamente tolerante a la falta de agua. La deficiencia hídrica que se produce al final del ciclo vegetativo provoca en numerosas ocasiones disminución del crecimiento vegetativo y de los rendimientos. Pero bajo condiciones de riego es posible brindar adecuadas condiciones hídricas en el suelo de manera de asegurar niveles de rendimiento estables a través de los años. Sin embargo, en las vides destinadas a vinificación y en especial aquellas destinadas a vinos tintos, se ha demostrado que la restricción hídrica en ciertos momentos del ciclo vegetativo es favorable para mejorar las condiciones de calidad de las uvas destinadas a la producción de vinos finos. En otros casos, la restricción hídrica se utiliza como herramienta para frenar el crecimiento de los brotes, evitando excesos de follaje que provocarían excesiva sombra en las yemas basales de las plantas lo cual es perjudicial para la diferenciación de yemas fructíferas para el año siguiente.

Como en la mayoría de los cultivos, el manejo del riego en vid requiere conocer los períodos críticos de necesidad hídrica. Desde brotación a floración se producen las mayores tasas de crecimiento de brotes y en consecuencia es un período en que la expresión vegetativa depende del riego. Esta sensibilidad al estado hídrico del crecimiento vegetativo brinda la posibilidad de controlar el crecimiento del follaje, sin afectar los rendimientos. El período de floración y cuajado de frutos es extremadamente sensible a la falta de agua. Un estrés no controlado en esa etapa fenológica provoca abscisión excesiva de flores y frutos afectando significativamente los rendimientos. Luego del cuajado de frutos la restricción hídrica puede afectar el tamaño de la baya por disminución de la multiplicación celular del fruto, pero fundamentalmente por disminución del crecimiento del mismo (Vallone, 1998; Ojeda, 1999; Perez Peña, 2000).

En los últimos años se ha difundido entre los viticultores más tecnificados la aplicación de riegos restringidos, durante las etapas fenológicas correspondiente a pre-envero y envero (envero es el momento en que se produce el cambio de color en las bayas). Esta restricción hídrica tiene por finalidad producir un estrés hídrico moderado (Potencial agua pre-amanecer en hoja entre -0.3 a -0.6 MPa). El estrés hídrico en esas etapas fenológicas, produce bayas de menor tamaño, lo cual aumenta la relación superficie/volumen de las mismas. Como los antocianos y otros polifenoles de la baya se encuentran en el hollejo de las mismas, se favorece la extracción de esos compuestos que son los responsables de la calidad en los vinos tintos. Dichos compuestos fenólicos también participan en las características benéficas para la salud, atribuidas al consumo moderado de vino en la actualidad. Luego de la cosecha en zonas de riego de zonas templado-cálidas, es común realizar al menos un riego para favorecer la absorción de nutrientes aplicados pos-cosecha y mantener el follaje en crecimiento, lo cual favorecería la removilización de reservas y nutrimentos a troncos y raíces cuando las hojas comienzan el proceso de senescencia, previo a la caída otoñal de las mismas.

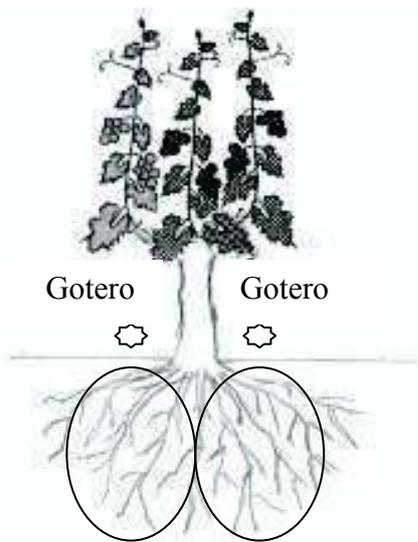
## 9. Nuevos métodos de aplicación de restricción hídrica

Ultimamente se han desarrollado ciertas técnicas de manejo del riego como el riego deficitario controlado (RDC) o el Secado Parcial de Raíces que tienen como objetivo general mantener rendimientos elevados con ahorro del volumen de riego aplicado al cultivo. Ambos métodos se basan en el conocimiento previo de los períodos críticos de cada cultivo. Es decir, ambas prácticas deben tener una base científica previa, apoyada en los resultados de ensayos en los cuales se han determinado los períodos críticos de necesidad hídrica de las distintas especies. Algunos de esos resultados han sido mencionados en el capítulo anterior.

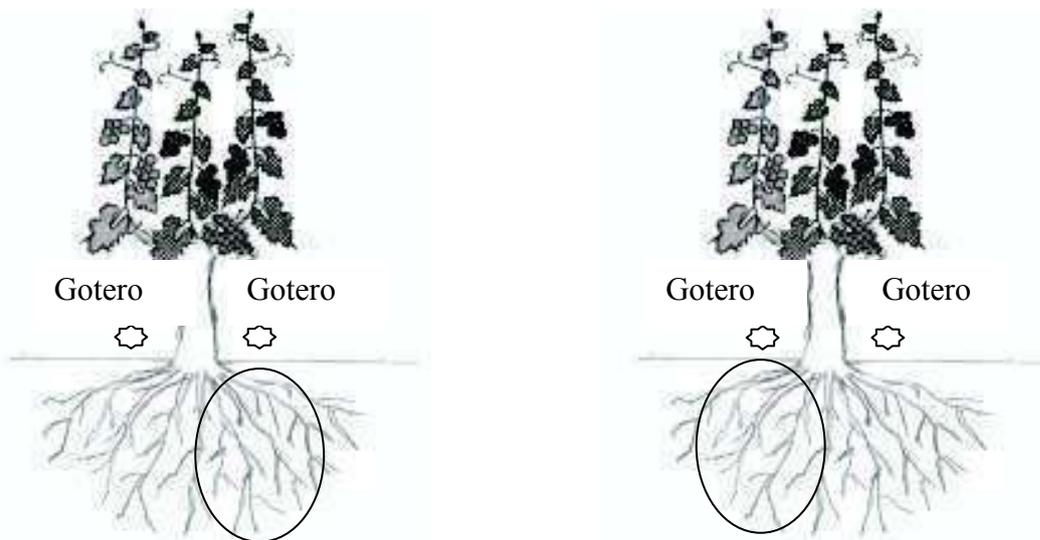
El RDC denominado en inglés Regulated Deficit Irrigation (RDI), se basa en el conocimiento de aquellas etapas del ciclo vegetativo donde una restricción hídrica limitada no afecta el rendimiento ni la calidad del producto comercial. El RDC, consiste en limitar el riego en esas etapas y mantener un riego del 100% en los períodos críticos de necesidad hídrica de ese cultivo (Mitchell *et al.*, 1984; 1986; Ferreyra *et al.*, 2001). En general lo que se hace es regar con una parte de la ET del cultivo en las etapas de baja sensibilidad de manera de economizar agua de riego, sin afectar los rendimientos. En el RDC, el porcentaje de agua restringido que se aplica en cada riego, es distribuido en toda la superficie del suelo explorado por las raíces, pero la profundidad a la cual llega ese riego, es sólo una proporción de la profundidad explorada por las raíces. De esta forma, luego de varios riegos restringidos existe una zona de raíces que se hidratan en cada riego y otra zona más profunda que cada vez tienen mayor deficiencia hídrica (ver Fig. 6). En muchos cultivos (vid, duraznero, ciruelos, etc.), el RDC, además de frenar el crecimiento vegetativo sin afectar el rendimiento, tiene por objeto mejorar la calidad organoléptica de los frutos.

Fisiológicamente se ha mostrado que en el caso de la zona de suelo seco, las raíces entregan agua al suelo, pues este último se encuentra con potenciales de agua inferiores a las raíces. Además, se ha comprobado que las raíces de la zona humedecida, compensan en parte la humedad de las raíces más secas mediante el aporte de agua, especialmente durante la noche (Blum & Johnson, 1992).

En un sistema de riego tradicional, se aporta agua a la totalidad de las raíces, en cada uno de los riegos (Fig. 7). En cambio, el Secado Parcial de Raíces o PRD por su denominación en inglés (Partial Rootzone Drying), se basa en regar en forma alternativa la mitad del sistema radical en un riego y luego la otra mitad al riego siguiente y así sucesivamente (Fig. 8). Los riegos a cada mitad del sistema radical se producen cada dos semanas aproximadamente para las condiciones de cultivo de la vid en Australia. De esta forma, la mitad del sistema radical se mantiene con un estrés creciente durante un tiempo y luego al próximo riego se repone el volumen de agua necesario para hidratar esa mitad hasta el total de la profundidad explorada por las raíces, mientras la regada anteriormente inicia el ciclo de desecación paulatina hasta el próximo riego. Con esta forma de riego se consume sólo el 50% del agua que correspondería para hidratar todo el sistema radical en todos los riegos (Dry *et al.*, 2000; Dry & Loveys, 1998; Loveys *et al.*, 1998).



**Figura 7.** Riego normal. En cada riego los goteros mojan ambos sectores de raíces.



**Figura 8.** Riego PRD. En el riego "n" se riega el sector de la derecha y luego de un tiempo, en el riego "n+1" se riega el otro sector y así se alternan sucesivamente.

Este sistema se desarrolló en Australia, donde ha sido aplicado a importantes áreas cultivadas con vid. El objetivo inicial fue controlar el exceso de crecimiento vegetativo y economizar agua de riego.

La implementación del PRD requiere un sistema de riego que permita una zona del suelo con raíces húmedas y otra con raíces en desecamiento simultáneamente. Los efectos principales del PRD son: aumentar la EUA hasta en un 50%, reducir el crecimiento vegetativo mientras el rendimiento y el tamaño de las bayas no se afectan. Esa disminución del crecimiento vegetativo, mejora la penetración de la luz a la zona de los racimos y consecuentemen-

te aumenta la calidad de las uvas. La parte húmeda y seca del sistema radical se alternan cada 10-20 días aproximadamente. Esta alternancia se basa en estudios previos que demostraron que los efectos del PRD no se podían mantener por largos tiempos si una de las mitades de raíces se mantenía siempre en sequía y la otra siempre regada. La aplicación del PRD provoca cambios hormonales a nivel de raíces y parte aérea (Stoll *et al.*, 2000). En las raíces que se encuentran en el período de desecamiento la concentración de ABA aumenta hasta 10 veces, aunque la concentración de esta hormona en las hojas sólo aumenta un 60% comparada con una planta testigo irrigada en ambos lados de las raíces. La conductancia estomática de las plantas con sistema PRD disminuyó significativamente comparada con los testigos regados en ambas mitades. Por otro lado, las plantas que tuvieron ambas mitades sometidas a déficit de agua, tuvieron similar conductancia estomática, pero la concentración de ABA en sus hojas era 5 veces mayor que las plantas regadas en ambos lados. El PRD produjo un aumento en la concentración de ABA y del pH en el xilema y ambos factores provocaron una disminución de la conductancia. Además, las plantas mostraron una reducción de citocininas endógenas (zeatina y ribósido de zeatina) de 50-70% en raíces, ápices de brotes y yemas lo cual contribuyó a una reducción del crecimiento del brote, mayor dominancia apical y menor crecimiento de brotes laterales. También se comprobó que durante la noche existe un flujo neto de agua desde las raíces húmedas a las secas (Blum & Johnson, 1992; Stoll *et al.*, 2000). Se concluyó que un efecto importante del PRD es la producción de señales químicas en las raíces en desecación que son transportados a las hojas donde producen una reducción de la conductancia estomática (Stoll *et al.*, 2000).

## 10. Exceso de riego. Anegamiento. Efectos fisiológicos

En capítulos anteriores se ha estudiado la respuesta de las plantas al déficit hídrico y sus adaptaciones al mismo. En la mayor parte de este capítulo nos hemos referido al comportamiento de las plantas con adecuado suministro hídrico o con riego deficitario controlado. Sin embargo en numerosas situaciones de cultivos bajo riego pueden aparecer problemas serios por exceso de riego y anegamiento de las raíces del cultivo.

Los casos de anegamiento ocurren en suelos con baja porosidad o con capas impermeables que impiden la percolación de exceso de agua a zonas más profundas que las exploradas por las raíces.

En condiciones normales, las raíces obtienen el oxígeno necesario para cumplir con sus funciones vitales directamente del suelo. El anegamiento produce una disminución importante y prolongada del oxígeno a nivel de raíces. Esta situación de hipoxia o anoxia provoca cambios importantes en el funcionamiento normal de las raíces y también de la parte aérea de la planta. Cuando las raíces están en reposo y las temperaturas son bajas (invierno), esta falta de oxígeno es poco perjudicial. En cambio, al aumentar la temperatura del suelo y comenzar la actividad radical, el poco oxígeno que hay en el suelo es rápidamente consumido por las propias raíces y los microorganismos del suelo provocando condiciones severas de estrés por falta de oxígeno.

En primer lugar, la falta de oxígeno disminuye la tasa respiratoria de la raíz. Esto se traduce en una abrupta baja en la formación de ATP. La disminución de ATP afecta la fosforilación de las acuaporinas (ver capítulo 2), que son las proteínas específicas a través de las

cuales ingresa la mayor parte del agua a las células de la raíz y de allí al xilema. Para que estas acuaporinas se encuentren funcionales requieren ser fosforiladas mediante el uso de ATP. Como las acuaporinas no se encuentran funcionales, el ingreso de agua a la planta se ve muy limitado, pues disminuye la conductividad hidráulica de la raíz. Paralelamente con esta dificultad para ingreso de agua a la raíz, la parte aérea de la planta continúa transpirando por lo cual, en poco tiempo, aparecen síntomas de marchitez y si esto se prolonga mucho tiempo pueden llevar a la muerte de la planta. En estos casos la planta se marchita, a pesar de tener agua a discreción en el suelo, por un desbalance entre la pérdida (transpiración) y la absorción. La falta de ATP a nivel raíces también afecta el ingreso de nutrimentos, pues la incorporación de ellos al interior de las células, normalmente requiere gasto de energía metabólica.

Como consecuencia de la disminución de oxígeno las células de la raíz fermentan en lugar de respirar aeróbicamente. Los productos de la fermentación, ácido láctico ó alcohol según el caso, reducen el pH del citoplasma, llevando a una acidosis citoplásmica que constituye el comienzo de la muerte celular. Si la situación se mantiene por un tiempo prolongado, se produce la muerte de las raíces, excepto en aquellas especies adaptadas a vivir en condiciones de anegamiento.

Las condiciones de hipoxia y anoxia también producen cambios en el contenido de ciertas hormonas vegetales. El etileno es una hormona que se produce en todos los órganos vivos. Por ser un gas, el etileno se mueve de un lugar a otro por difusión. La biosíntesis del etileno requiere la presencia de oxígeno para el pasaje del precursor inmediato, ACC (ácido 1 amino ciclopropano 1 carboxílico), a etileno. Cuando el ambiente radical se encuentra saturado de agua (sin O<sub>2</sub>), se producen efectos sobre la propia raíz y sobre el vástago. En la raíz, el etileno que ya se había formado y el poco que se forma en anoxia, prácticamente no difunde al exterior, pues la velocidad de difusión de este gas en agua es aproximadamente 10.000 veces más lenta que en el aire (Salisbury & Ross, 1994). El etileno en altas concentraciones es tóxico para las raíces. Por otro lado, en la parte aérea, se sintetiza mucho mayor cantidad de etileno que la normal debido a que el precursor inmediato del etileno migra desde las raíces a las hojas, dónde al existir suficiente O<sub>2</sub> se forma etileno. El exceso de etileno en la parte aérea produce epinastias en los pecíolos (curvatura de los mismos hacia abajo), acelera la clorosis de las hojas y posteriormente la abscisión de las mismas.

Algunas especies son especialmente sensibles al anegamiento, como arveja, cerezo y damasco entre otras. En cambio existen especies tolerantes a condiciones de hipoxia (arroz, la maleza del arroz *Digitaria californica*, las especies de manglares y de otros ambientes pantanosos). En algunas especies como maíz o tomate, el etileno que se acumula en altas concentraciones en la raíz, induce la síntesis de enzimas que hidrolizan paredes y membranas celulares, provocando la formación de grandes espacios libres de células o aerénquimas que facilitan el transporte del O<sub>2</sub> desde la parte aérea a las raíces, disminuyendo así, el efecto deprimental del anegamiento (Salisbury & Ross, 1994; Taiz & Zeiger, 1998).

## 11. Riego y salinidad

Como hemos mencionado anteriormente, el riego ha contribuido de manera indiscutible al mejoramiento de la producción agrícola. Sin embargo, un aspecto a cuidar en esta actividad es el aumento de la salinidad que puede ocurrir fácilmente cuando esta práctica se realiza en forma incorrecta. De hecho, la salinización de las áreas irrigadas es un problema común en todo el mundo al cual la mayoría de las naciones le presta atención por los daños y los costos que implica la contaminación salina de las tierras arables.

Debemos distinguir entre las áreas salinas naturales, comunes en muchas zonas áridas y las áreas salinas originadas por el mal manejo del riego. La salinidad derivada del riego puede originarse principalmente por dos causas: a) elevación de las napas freáticas cercanas a la superficie debido al exceso de riego en zonas más altas o en las áreas cercanas al área en cuestión y b) la acumulación paulatina de sales en las zonas superficiales exploradas por las raíces como consecuencia de la pérdida de agua hacia la atmósfera y la permanencia de esas sales en el suelo.

El primer aspecto a tener en cuenta es que todas las aguas para riego (excepto el agua de lluvia) contienen sales disueltas. Pero la concentración y composición de esos solutos es muy variable. Esas diferencias y las características de suelo y clima determinan la mayor o menor peligrosidad salina de las aguas utilizadas para riego.

Muchos problemas de salinidad tienen directa relación con la práctica del riego. En cada riego se incorpora al suelo agua y sales solubles. Por evaporación y transpiración el agua pasa a la atmósfera, pero las sales que estaban en solución se van acumulando y concentrando en el suelo. Este proceso repetido en cada riego, podría generar un aumento de sales muy perjudicial si no se tienen en cuenta los requerimientos de lixiviación de sales a las capas más profundas, tema sobre el cual, volveremos más adelante.

En la mayoría de los sistemas de riego, la calidad del agua es un tema importante, pues esa calidad afecta no sólo el rendimiento de los cultivos sino también las características del suelo irrigado.

La cantidad total de sales en el agua de riego o en la solución del suelo que rodea las raíces se conoce como *contenido total de sales*. Puede expresarse como partes por millón (ppm) o su equivalente mg/L o bien en miliequivalentes por litro (me/L).

Sin embargo, en el campo la forma más común de medir la cantidad de sales del agua de riego o de la solución del suelo es la *conductividad eléctrica* (CE), por ser una forma rápida, sencilla y práctica para determinar el contenido salino de las aguas de riego. El agua pura, sin sales, es muy mala conductora de la electricidad, pero a medida que aumenta el contenido de sales en solución aumenta la conductividad eléctrica de esa solución. En este capítulo utilizaremos CE para la CE del agua de riego y CEes para la CE del agua del suelo determinada en el extracto a saturación de ese suelo.

Es importante remarcar que para muchos suelos la concentración salina de la solución del suelo en capacidad de campo es el doble de la concentración salina en el extracto a saturación. Es decir, que si la CEes es, por ejemplo, igual a 3.000  $\mu\text{mhos/cm}$ , cuando haya percolado todo el agua gravitacional y el suelo se encuentre en capacidad de campo la CE a nivel de raíces será de 6.000  $\mu\text{mhos/cm}$ .

La CE se expresa como milimhos por cm (mmhos/cm); decisiemens por metro (dS/m) o bien micromhos por cm ( $\mu\text{mhos/cm}$ ) y microSiemens por cm ( $\mu\text{S/cm}$ ). Las equivalencias entre estas formas de expresión son:

$$1 \text{ mmhos/cm} = 1 \text{ dS/m}$$

$$1 \mu\text{mhos/cm} = 1 \mu\text{S/cm}$$

$$\text{Para transformar CE en potencial osmótico: kPa} = - 36 \times \text{CE en dS/m}$$

### 11.1. Sales más comunes en la solución del suelo

Las aguas de riego contienen distintas sales disueltas. Entre ellas las más comunes son: cloruro de sodio o sal de cocina (NaCl), sulfato de calcio o yeso ( $\text{CaSO}_4$ ), sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ), bicarbonato de sodio  $\text{NaHCO}_3$ , etc. Esas sales al ionizarse dan lugar a aniones y cationes que es la forma

en la cual los elementos entran a las células de la planta. Los cationes más comunes son  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ , y los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{BO}_3^{-3}$ .

La peligrosidad salina de los distintos aniones y cationes no es igual. El efecto de los mismos sobre los suelos y el agua de riego es bien diferente. El caso del sodio es de especial interés pues según el contenido de este catión en la solución salina del suelo podemos hablar de 1) *suelos salinos* caracterizados por tener una alta concentración de sales totales o una elevada CE; 2) *suelos sódicos* son aquellos que tienen un contenido muy alto de Na respecto a los otros iones lo cual provoca grandes problemas en la permeabilidad y estructura de esos suelos y 3) *suelos salino-sódicos* en los cuales se combinan los dos casos anteriores, es decir tienen alto contenido salino y alto contenido de sodio.

### *11.2. Efecto fisiológico del exceso de sales en las aguas de riego*

El exceso de sales en la solución del suelo, provoca diversos efectos perjudiciales sobre las plantas. La salinidad afecta aspectos metabólicos (disminución de fotosíntesis, de síntesis proteica) y disminuye el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos. En condiciones de salinidad severa produce detención del crecimiento de meristemas, necrosis de tejidos de hojas y finalmente la muerte de las plantas.

El daño a los cultivos por exceso de sales se produce por dos causas: 1) disminución del potencial osmótico de la solución que rodea las raíces y 2) efecto tóxico específico de ciertos iones presentes en esa solución.

#### *11.2.1. Disminución del potencial osmótico de la solución que rodea las raíces*

El agua pura, es decir, en ausencia de solutos, presenta el mayor potencial osmótico. A medida que aumenta la concentración de solutos en el agua dicho potencial se va haciendo cada vez más negativo hasta llegar a valores tan negativos que impiden el movimiento y entrada del agua a la planta. Como se ha visto en el capítulo sobre relación agua-suelo-planta-atmósfera, el agua se mueve a favor de un gradiente de potencial hídrico, desde lugares con mayor potencial hídrico a lugares con menor potencial. Es decir el agua se mueve desde el suelo a la planta cuando el potencial hídrico del primero es mayor que el de la planta. Recordemos también que el potencial hídrico es la sumatoria de varios componentes. En condiciones de suelos no salinos, el componente más importante del potencial hídrico es el potencial mátrico derivado del tamaño y proporción de las partículas que forman la fase sólida del suelo; en esos casos, el potencial osmótico del suelo es muy bajo. Pero en los suelos salinos, el componente osmótico del potencial hídrico adquiere valores tan altos que impiden el movimiento termodinámico del agua hacia la planta. En esas circunstancias, aunque el suelo se vea totalmente húmedo la planta no puede absorber agua y termina por deshidratarse. Desde el punto de vista fisiológico, la planta sufre una situación similar al estrés hídrico provocado por la falta de agua en el suelo, es decir el potencial hídrico del suelo es inferior al de la planta y el agua no se mueve hacia esta última sino que se pierde agua desde la planta hacia el suelo. A pesar de esta similitud existen algunas diferencias entre ambos tipos de estrés. La principal diferencia es que en el estrés salino, las raíces de las plantas están sumergidas en una solución hipertónica respecto a la solución celular. En cambio, en el estrés hídrico las células de la raíz no están rodeadas de solución hipertónica sino de suelo seco o aire seco. Esta diferencia determina que en el caso de estrés salino las células sufran plasmólisis (separación del citoplasma de la pared celular) mientras que en el caso del estrés hídrico no existe esa separación del citoplasma de la pared celular.

En los casos de estrés osmótico gradual, muchas especies vegetales tienen ciertos mecanismos de ajuste a esa situación adversa conocidos como ajuste osmótico. Estos mecanismos de ajuste son parciales es decir, les permite soportar hasta cierto nivel la disminución del potencial osmótico del suelo. Para ello, las plantas acumulan iones disueltos en la solución del suelo en su vacuola y de esa forma disminuyen el potencial hídrico de sus tejidos y el agua puede seguir entrando desde el suelo a la planta. Sin embargo, este mecanismo tiene un costo energético para la planta pues los solutos iónicos inorgánicos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) son incompatibles con las enzimas del citoplasma, por lo cual se ubican en un compartimento especial como la vacuola. Para contrabalancear el bajo potencial osmótico de la vacuola, las células deben sintetizar otros solutos orgánicos compatibles con el sistema enzimático del citoplasma (prolina, glicina-betaína, sorbitol, manitol, etc.) con el consiguiente costo de síntesis de esos compuestos. En resumen el ajuste osmótico es una respuesta fisiológica al estrés que le permite a la planta absorber agua y mantener la turgencia celular y el crecimiento ligado a esa turgencia.

Según la CE de las aguas para riego, el laboratorio de Riverside (U.S. Salinity Laboratory, 1954) establece las siguientes categorías de aguas para riego (Tabla 2):

**Tabla 2.** Categorías de aguas para riego según su CE (U.S. Salinity Laboratory, 1954).

C.E. a 25°C ( $\mu\text{mhos/cm}$ )	Peligrosidad salina	Comentarios
0-250	Baja	Puede ser usada para todos los cultivos y en todo tipo de suelo
250-750	Moderada	Puede ser usada en todos los cultivos, excepto los muy sensibles. Con suelos de baja permeabilidad, necesitará algún lavado
750-2250	Media	Recomendada para cultivos de tolerancia moderada a buena. Usar solo en suelos de buena a moderada permeabilidad. Requiere riegos de lavado regulares
2250-4000	Alta	Sólo para cultivos de buena tolerancia. Sólo en suelos de buena permeabilidad. Requiere lixiviación regular
más de 4000	Muy Alta	En general, inapropiadas para riego

Nijensohn (1966) plantea algunas observaciones críticas a esta clasificación, la cual sólo toma en consideración la CE sin evaluar el tipo de sales que intervienen. Al respecto, hace notar que a igualdad de CE, serán menos peligrosas las aguas que tengan una buena proporción de sales de limitada solubilidad, pues al concentrarse la solución del suelo parte de estas sales precipitarán, como sucede en aguas salinas ricas en sulfato de calcio de la región de Cuyo. Otro aspecto importante que plantea Nijensohn (1966) es la relación entre la CE del agua de riego (CE agua) y la CE del extracto a saturación (CEes) para ese agua, de la cual se deriva el concepto de *Factor Interpretativo de Concentración* (FIC), la cual se expone a continuación:

**Tabla 3.** Relación entre la CE del agua de riego (CE agua), la CE del extracto a saturación (CEes) y del Factor Interpretativo de Concentración (FIC) (Nijensohn, 1966).

C.E. agua a 25°C	C.E.es a 25°C	FIC = CEes /CE agua
------------------	---------------	---------------------

(μmhos/cm)	(μmhos/cm)	
0-250	2000	8
250-750	2000 a 4000	5.33
750-2250	4000 a 8000	3.55
2250-4000	8000 a 12000	3.00
más de 4000	12000 a 16000	2.66

### 11.2.2. Requerimiento de lixiviación

El requerimiento de lixiviación (RL) es el exceso (expresado como porcentaje) que debo agregar al agua de riego necesaria para cubrir la evapotranspiración, con el objeto de evitar la acumulación de sales en las capas superiores del suelo.

Una forma de evitar los problemas de salinización del suelo por el aporte repetido de sales que se incorporan en cada riego, y de disminuir la peligrosidad salina es utilizar un exceso de agua de riego. Este exceso de agua, al percolar hacia las capas de suelo más profundas lixiviana las sales de las zonas exploradas por las raíces. El agregado de un volumen de riego en exceso, absolutamente necesario para evitar la pérdida de calidad del suelo, trae como contrapartida, una disminución de la eficiencia de uso del agua tratada en otra parte de este capítulo.

Tal como lo plantea Nijensohn (1966), para mantener la zona explorada por las raíces en un nivel de salinidad determinado, no peligroso, la cantidad de sales que se agregan en cada riego debe ser igual a la cantidad de sales que se eliminan de esa zona por drenaje a capas más profundas. Esto puede ser expresado como:

$$V_r \cdot C_r - V_d \cdot C_d = 0$$

donde:

$V_r$  = Vol. de riego

$C_r$  = Concentración salina del agua de riego

$V_d$  = Vol. de drenaje

$C_d$  = Concentración salina del agua de drenaje

y por transposición de términos:

$$\frac{V_d}{V_r} = \frac{C_r}{C_d}$$

La relación  $V_d/V_r$  se denomina relación de lixiviación (RL). Los términos  $C_r$  y  $C_d$  pueden ser reemplazados por las respectivas C.E., es decir CE agua de riego y CE agua de drenaje ( $C_{Er}$  y  $C_{Ed}$  respectivamente) con lo cual tenemos que:

$$RL = C_{Er} / C_{Ed}$$

esta RL puede expresarse en % y en ese caso hablamos de:

$$\text{Requerimiento de Lixiviación} = RL (\%) = (C_{Er} / C_{Ed}) 100$$

El requerimiento de lixiviación nos dice el porcentaje de agua de riego adicional al necesario para cubrir la evapotranspiración que debo agregar en cada riego para mantener la peligrosidad salina en niveles aceptables.

En esta ecuación, el valor de  $CE_r$  está fijo, de acuerdo al agua de riego que se utiliza. En cambio, como agrónomos podemos establecer el valor de  $CE$  del agua de drenaje que consideramos adecuado para evitar la peligrosidad salina, según el cultivo y el tipo de suelo que manejamos. El valor de  $CE_d$  puede ser asimilado a la  $CE$  del extracto a saturación ( $CE_s$ ). Cuanto mayor sea el valor que le asignamos a la  $CE_s$  menor será el exceso de agua a agregar. En contraposición, si somos exigentes en fijar un valor menor de  $CE_s$  mayor será el volumen de agua que debo agregar para llegar a esa  $CE_s$ .

Además del RL aplicado en cada riego, en situaciones en que la peligrosidad salina es alta, conviene efectuar lavado de suelo durante la estación de reposo vegetativo (invierno) para evitar el problema de hipoxia a las raíces cuando esos lavados se prolongan varios días.

En cultivos regados por goteo es normal la acumulación de sales en las áreas más externas del bulbo húmedo y también en la superficie del suelo no mojada por el gotero. En esas circunstancias una lluvia abundante y torrencial en verano, puede provocar el arrastre de las sales superficiales y externas del bulbo a la zona interior del mismo (movimiento centrípeto de agua salinizada hacia las raíces). Este movimiento hacia las raíces suele causar severos daños a la planta por el brusco aumento de la salinidad a nivel de raíces, como ha sucedido en varias ocasiones. En esos casos, habría que regar por goteo de inmediato para crear un flujo de agua desde el centro del bulbo del gotero hacia el exterior del mismo, es decir un movimiento centrífugo que lixivien las sales en profundidad y hacia el exterior del bulbo. En regiones con lluvias que ocurren en invierno, durante el reposo vegetativo, esas lluvias producen un lavado y arrastre de las sales a niveles más profundos que los explorados por las raíces. En regiones con inviernos secos como es el caso de Cuyo, y cuando las condiciones de nivel y disponibilidad de agua lo permiten, se deben realizar riegos de lavado durante el invierno, aprovechando el reposo vegetativo de las raíces. Casos similares al del riego por goteo pueden ocurrir en cultivos regados por surcos o con bordos, en los cuales ocurre acumulación de sales en la parte alta de los mismos. Las precauciones y lavados tienen el mismo principio que con el riego por goteo.

### 11.2.3. Efecto tóxico específico de iones

Además del daño producido a las plantas por efecto osmótico, ciertos iones presentes en la solución del suelo muestran un efecto tóxico sobre las plantas. En realidad, cualquier ión puede resultar tóxico para las plantas cuando su concentración sobrepasa cierto nivel, lo que varía es el nivel crítico de cada ión. Esa concentración depende del ión, de las características físico-químicas del suelo y de la especie en cuestión.

El catión más estudiado por su efecto tóxico es el sodio ( $Na^+$ ). Las aguas con alto contenido de sodio son especialmente preocupantes, pues el sodio tiene efectos perjudiciales tanto para las plantas como para las condiciones físicas y físico-químicas del suelo. En este último sentido, el sodio actúa sobre los coloides del suelo, aumentando su dispersión y en consecuencia disminuyendo la permeabilidad o conductancia de esos suelos. Es interesante remarcar que el calcio y el magnesio ejercen una acción inversa al sodio, disminuyendo la acción perjudicial de este último cuando se encuentran en la solución del suelo.

Existe numerosos estudios sobre la peligrosidad sódica de las aguas de riego (Nijensohn, 1966). Uno de los más conocidos es el del US Salinity Laboratory (1974) en el cual las aguas de riego se clasifican por su peligrosidad salina y sódica. Respecto a la peligrosidad sódica se basa en la Relación de Absorción de Sodio (RAS). La RAS es el cociente entre los me/L del catión sodio, dividido

por la raíz cuadrada de la semisuma de los cationes calcio más potasio, también expresados en me/L. En base a los valores de RAS se establecen las siguientes categorías (Tabla 4):

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{1/2 (\text{Ca} + \text{Mg})}}$$

**Tabla 4.** Categorías de peligrosidad sódica de las aguas de riego en base a los valores de RAS.

RAS	Peligrosidad sódica
0 a 10	Baja
10 a 18	Media
18 a 26	Alta
más de 26	Muy Alta

En la célula vegetal la alta concentración de sodio, afecta la actividad de enzimas al actuar sobre las moléculas de agua que rodean a esas proteínas, lo cual produce cambios en la estructura cuaternaria de las mismas.

Además del sodio, otros dos iones que suelen causar perjuicios a los cultivos son el cloruro y el borato (Fipps, 1996). Ambos son nutrimentos esenciales para las plantas. Es decir, la deficiencia impide completar el ciclo biológico normal de un vegetal. Sin embargo, su exceso provoca efectos tóxicos. Al respecto es interesante recordar que el anión borato por ser un micronutriente especialmente peligroso, pues variaciones muy pequeñas en su contenido pueden producir efectos tóxicos.

#### 11.2.4. Tolerancia de los cultivos a la salinidad

No todos los cultivos son afectados en igual forma por la salinidad. Existen grandes diferencias en la tolerancia a la salinidad entre las distintas especies y aún dentro de una misma especie.

Desde el punto de vista agronómico la tolerancia a la salinidad de un cultivo, se mide como la disminución del rendimiento a una CE determinada, comparado con el rendimiento en condiciones no salinas (Maas & Hoffman, 1977).

Varios autores presentan listados con la tolerancia de los distintos cultivos a la salinidad. Por ejemplo Maas & Hoffman (1977) presentan una tabla con numerosos cultivos y para cada uno el valor crítico o umbral de CEes que inicia la disminución del rendimiento, el % de disminución del rendimiento por cada unidad de CEes (ambas CE expresadas como mmhos/cm) y una calificación del cultivo respecto a la tolerancia a salinidad como sensible, moderadamente sensible, moderadamente tolerante y tolerante. Grattan (2002) también muestra listados de tolerancia a salinidad de diversos cultivos. El trabajo de Fipps (1996) presenta varias tablas que incluyen límites de tolerancia a diversos nutrimentos y elementos minerales, tolerancia a salinidad de varios cultivos, tolerancia a cloruros, a sodio y a boro. Para profundizar el tema, se recomienda la lectura de los trabajos mencionados anteriormente.

La tabla siguiente, resumida a partir de los datos de Fipps (1996), muestra las diferencias de tolerancia a salinidad algunos cultivos, medida como rendimiento potencial en según la CEes del suelo.

**Tabla 5.** Tolerancia de algunos cultivos a distintos niveles de salinidad del suelo (CEes, mmhos/cm a 25 °C) (Fipps, 1996).

Cultivo	Rendimiento potencial según CEes		
	100%	75%	50%
Poroto	1.0	2.3	3.6
Lechuga	1.3	3.2	5.2
Maíz	1.7	3.8	5.9
Cebolla	1.2	2.8	4.3
Pimiento	1.5	3.3	5.1
Tomate	2.5	5.0	7.6
Papa	1.7	3.8	5.9
Arroz	3.0	5.1	7.2
Trigo	6.0	9.5	13.0
Cebada	8.0	13.0	18.0
Remolacha	7.0	11.0	15.0
Algodón	7.7	13.0	17.0
Vid	1.5	4.1	6.7
Almendro	1.5	2.8	4.1
Manzana, pera	1.7	3.3	4.8
Damasco	1.6	2.6	3.7
Durazno	1.7	2.9	4.1
Cítricos	1.7	3.3	4.8
Olivo	2.7	5.5	8.4
Palmera datilera	4.0	10.9	17.9
Alfalfa	2.0	5.4	8.8
Ryegras perenne	5.6	8.9	12.2
Sorgo	4.0	7.2	11.0

## 12. Bibliografía

- Abatte, P.E., J.L. Dardanelli, M.G. Cantarero, M. Maturano, R.J.M Melchiorre & E.E. Suero. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Sci.* 44:474-483.
- Bertranou, A. & E. Schulze. 1993. Guía para un programa del IIMI en América Latina. Instituto Internacional de Manejo de la Irrigación. Colombo. Sri Lanka.

- Blum, A. & J.W. Johnson. 1992. Transfer of water from roots into dry soil and the effect on wheat water relations and growth. *Plant Soil* 145:141-149.
- Cavagnaro, J.B., B.R. De Lis & R. Tizio. 1971. Drought hardening of the potato plant as an after effect of soil drought conditions at planting. *Potato Res.* 14:181-192.
- Chalmers, D.J., P.D. Mitchell & L. van Heek. 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106:307-312.
- Chambouleyron, J. 2005. Riego y drenaje. Técnicas para el desarrollo de una agricultura regadía sostenible. Edit. Univ. Nac. Cuyo. Mendoza. Argentina. Tomo I. 471 p., Tomo II 1026 pp.
- Cuadernos Value. 1995. Riego deficitario controlado. Mundiprensa. España. 188 p.
- De Santa Olalla Mañas, F.M. & J.A. De Juan Valeros. 1993. *Agronomía del riego*. Edic. Mundi-Prensa. Madrid. 732 p.
- Doorenbos, J. & W.O. Pruitt. 1974. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and drainage, paper n° 24. FAO Roma.
- Dry, P.R. & B.R. Loveys. 1998. Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. *Austr. J. Grape Wine Res.* 4:140-148.
- Dry, P.R., B.R. Loveys, M. Stoll, D. Steward & M.C. McCarthy. 2000. Partial rootzone drying – an update. *Aust. Grapegrower & Winemaking* 438a:35-39.
- Federes, E., D.A. Goldhamer & L.R. Parsons. 2003. Irrigation water management of horticultural crops. *HortScience* 38:1036-1042.
- Ferreya, R., G. Sellés G. & I. Sellés. 2001. Riego deficitario controlado en uvas de mesa. Estrategias de riego para enfrentar situaciones de escasez de agua en frutales. *Boletín INIA* n° 60. Chile. 44 p.
- Fipps, G. 1996. Irrigation water quality standards and salinity management strategies. *Texas Cooperative Extension B-1667*: 1-20.
- Girona, J. & J. Marsal. 1995. Estrategias de RDC en almendro. *En: Riego deficitario controlado*. M. Zapata & P. Segura (eds.). Cuadernos Value. Mundiprensa España. pp. 97-118.
- Grassi, C.J. 1966a. Economía del agua. *En: Riego y drenaje*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (ed). Bs. As. Argentina. pp. 335-347.
- Grassi, C.J. 1966b. Economía del agua. *En: Riego y drenaje*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (ed). Bs. As. Argentina. pp. 115-165.
- Grassi, C.J. 1998. *Fundamentos del riego*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Mérida. Venezuela. 392 p.
- Grattan, S.R. 2002. Irrigation water salinity and crop production. *Agriculture and Natural Resources Publication 8066*:1-9. Univ. of California, Davis.
- Greco, S.A. & J.B. Cavagnaro. 1991. Influence of drought at different growth stages on yield of lentils. *Lens* 18:27-29.
- Greco, S.A. & J.B. Cavagnaro. 2002. Effect of drought on biomass and allocation in three varieties of *Trichloris crinita* P. (Poaceae) a forage grass from the arid Monte region of Argentina. *Plant Ecol.* 164:125-135.
- INTA. 1966. *Riego y drenaje*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Bs. As. Argentina. 601 p.

- Israelsen, O.W. & V.E. Hansen. 1962. Irrigation principles and practices. Chapter 1. John Wiley and Sons, Inc. N.Y.
- Kramer, P.J. & J.S. Boyer. 1995. Water relations of plants and soils. Academic Press, N.York. 495 p.
- Li, S.H., S.G. Huget, P.G. Schoch & P. Orlando. 1989. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficits at various phenological stages of fruit development. *J. Hort. Sci.* 64:541-552.
- Lis, B.R. de, I. Ponce, J.B. Cavagnaro & R.M. Tizio. 1967. Studies of water requirements of horticultural crops. II. Influence of drought at different growth stages of onion. *Agron. J.* 59:573-576.
- Lis, B.R. de, J.B. Cavagnaro, R. Tizio & H. Morales. 1968a. Modificaciones morfo-fisiológicas en la planta de cebolla (*Allium cepa*, L.) en relación a sequía en período crítico de necesidad de agua. *Rev. Fac. Ciencias Agrarias* t. XIV (1-2):58-72.
- Lis, B.R. de, J.B. Cavagnaro & R. Tizio. 1968b. Estudios sobre requerimientos hídricos en especies hortícolas. III. Influencia de la sequía sobre la modalidad vegetativa y rendimiento del ajo (*Allium sativum* L.). RIA Serie 2. *Biología y Produc. Vegetal.* V(2):11-22.
- Lis, B.R. de, J.B. Cavagnaro, R. Tizio, A. Urbietta & H. Morales. 1969. Estudios sobre requerimientos hídricos en especies hortícolas. V. Influencia de períodos de sequía sobre la modalidad vegetativa y rendimiento del pimiento (*Capsicum annum* L.). RIA Serie 2. *Biología y Produc. Vegetal.* VI:145-153.
- Lis, B.R. de, I. Ponce & R. Tizio. 1964. Studies of water requirements of horticultural crops. I. Influence of drought at different growth stages of potato on the tuber's yield. *Agron. J.* 56:377-381.
- Loomis, R.S. & D.J. Connor. 1992. Crop ecology: productivity and management in agricultural systems. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 538 p.
- Loveys, B.R., M. Stoll, P.R. Dry & M.G. McCarthy. 1998. Partial rootzone drying stimulates stress responses in grapevine to improve water use efficiency while maintaining crop yield and quality. *Aust. Grapegrower & Winemaker* 414a:108-113.
- Maas, E.V. & G.J. Hoffman 1977. Crop salt tolerance – Current assessment. *J. Irrig. Drain. E-ASCE* 103, IR2:115-134.
- Mitchell, P.D., P.H. Jerie & D.J. Chalmers. 1984. The effects of regulated water deficit on pear tree growth, flowering, fruit growth and yield. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 109:604-606.
- Mitchell, P.D., D.J. Chalmers, P.H. Jerie & G. Burge. 1986. The use of initial withholding of irrigation and tree spacing to enhance the effect of regulated deficit irrigation. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 111:858-861.
- Mygatt, E. 2006. World's water resources face mounting pressure. *In*: Earth Policy Institute, [www.earth-policy.org](http://www.earth-policy.org).
- Nijensohn, L. 1966. Calidad de las aguas para riego. *En*: Riego y drenaje. (Ed.) INTA. Argentina. pp. 168-205.
- Ojeda, H. 1999. Influence de la contrainte hydrique sur la croissance du péricarpe et sur l' évolution des phénols des baies de raisin (*Vitis vinifera*, L) cv. Syrah. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agonomique de Montpellier, France.
- Perez Peña, J. 2000. Restricciones hídricas durante el desarrollo de la baya y su influencia en el crecimiento vegetativo, reproductivo, rendimiento y calidad enológica de la uva variedad Cabernet Sauvignon. Tesis de Maestría. Posgrado de Riego y Drenaje. Fac. Ciencias Agrarias. U.N.Cuyo.

- Ruiz Sanchez, M.C. & J. Girona. Investigaciones sobre riego deficitario controlado en melocotonero. *En: Riego deficitario controlado*. M. Zapata & P. Segura (eds). Cuadernos Value. Mundiprensa. España. pp. 67-95.
- Salisbury, F.B. & C.E. Ross. 1994. *Fisiología Vegetal*. Grupo Editorial de Iberoamérica SACV. Mexico. 759 p.
- Salter, P.J. & J.E. Goode 1967. Crop responses to water at different stages of growth. Commonwealth Agric. Bureaux. Bucks, England. 246 p.
- Shackel, K.A., B. Lampinen, S. Southwick, W. Olson, S. Sibbett, W. Krueger, J. Yeager & D. Goldhamer. 2000. Deficit irrigation in prunes: maintaining productivity with less water. *HortScience* 35:1063-1066.
- Stoll, M., B. Loveys & P. Dry. 2000. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigate grapevine. *J. Exp. Bot.* 51:1627-1634.
- Taiz, L. & E. Zeiger. 1998. *Plant Physiology* (2<sup>nd</sup>. edition). Sinauer Assoc. Inc. Publishers. Massachussets. 792 p.
- U.S. Salinity Laboratory. 1954. *Manual de diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. N° 60. 160 p.
- Vallone, R. & L. Nijensohn. 2002. *Guía de orientación para regantes de zonas áridas*. Univ. Nac. Cuyo. 151 p.
- Vallone, R.C. 1998. *Influencia del estado hídrico sobre desarrollo, rendimiento y calidad enológica en vid*. Tesis de Maestría. Postgrado de Riego y Drenaje. Fac. Ciencias Agrarias. U.N.Cuyo. 130 p.