

2. ANTECEDENTES

2.1. XEROJARDINERÍA

El término xerojardinería es una adaptación del término anglosajón “xeriscape”, procedente del griego “xeros” (seco) y del inglés “landscape” (paisaje, jardín). Fue en Colorado (Estados Unidos) donde un grupo del Departamento de Aguas de Denver, tras las fuertes sequías ocurridas en el Oeste de Estados Unidos, establecieron un programa de conservación de agua en jardinería, y acuñaron en 1981 el término “xeriscape” definiéndolo como “un espacio verde economizador de agua”. En este mismo año un grupo de profesionales de las “industrias verdes” formó un equipo cuya misión era crear un jardín demostrativo que sirviera para enseñar las posibilidades de esta técnica. Además desarrollaron un programa educativo para animar a la implicación particular y pública. En 1986, se creó el National Xeriscape Council, una organización no lucrativa con la función de difundir y establecer pautas básicas de aplicación de la xerojardinería. Las técnicas de xerojardinería se extendieron rápidamente por Estados Unidos habiéndose desarrollado a principios de los 90 en la mayoría de los estados y empezándose a divulgarse por otros países (Burés, 2000).

Aunque el término xerojardinería es muy reciente, la utilización de especies vegetales con bajo consumo hídrico no es una nueva técnica. De hecho, la mayoría de nuestros jardines históricos, admirados por su belleza, tienen mucho de xerojardines: poseen una gran cantidad y variedad de árboles y arbustos y pocas praderas, y utilizan, en general, especies poco exigentes en cuanto a riego (López Lillo, 1993).

2.1.1. LA XEROJARDINERÍA EN ESPAÑA

La situación climática de nuestro país, unido al exagerado consumo de agua, hace necesario que se desarrolle una nueva cultura del agua que minimice el consumo en cada uno de los sectores implicados (doméstico, agrario, industrial, etc.). Aunque el valor del consumo de agua en España para el riego de jardines y parques públicos está estimado en un 1.5 % del consumo total del agua, este porcentaje, no deja de ser

importante; sobre todo si tenemos en cuenta que el 60 % de la superficie del territorio español es xerofítico (Kunkel, 1998).

La xerojardinería demuestra ser una solución con buenos resultados y de fácil aplicación en la gestión eficiente del consumo de agua. Se impone, por tanto, una pronta implantación de estas técnicas, ya que hasta la fecha son poco incipientes debido al gran número de dificultades que se deben de afrontar (Vicente, 1999). Entre estas dificultades se encuentra la falta de sensibilidad ecológica y la consecuente falta de concienciación respecto al ahorro de agua, tanto en la población como por parte de la administración, principal encargado de dar ejemplo. Además, el bajo coste del agua unido a la percepción de encarecimiento de cualquier innovación, hace que no se encuentre justificado implantar el xerojardín para ahorrar agua. A esto se añade el escaso conocimiento de la xerojardinería de la que existe poca bibliografía y escaso apoyo técnico para su práctica.

El mayor impulso a la xerojardinería podría venir de su implantación en jardines públicos, principal muestra de las tendencias en jardinería, esto implicaría mayor competencia técnica de los responsables de urbanismo por requerir más conocimientos así como una mayor definición en sus proyectos, traduciéndose en obras de jardinería más complejas, pero de mayor calidad paisajística, mayor periodo de vida y menor mantenimiento.

En los últimos años, existe una marcada tendencia a realizar proyectos de jardinería y paisajismo en zonas semiáridas que respondan a diseños sostenibles, donde los criterios de biodiversidad, de uso de especies ornamentales adaptadas a ese medioambiente, y de ahorro de recursos hídricos, horas de mantenimiento y otros inputs, son esenciales (Franco et al., 2005). Para este fin, los aspectos a los que se debe prestar especial atención son la elección apropiada del material vegetal, los métodos de producción y precondicionamiento en vivero para obtener plántula que tolere adecuadamente el trasplante y las primeras fases de crecimiento tras él, y los protocolos de mantenimiento postrasplante para minimizar intervenciones y estreses sobre la planta (Iles, 2003).

En cuanto a la elección apropiada de material vegetal, en los últimos años se está dando un incremento en el uso de plantas autóctonas mediterráneas con fines ornamentales, debido a su capacidad de adaptarse a condiciones ambientales adversas y

a su menor consumo de agua, siendo capaces de sobrevivir durante largos períodos de tiempo con baja disponibilidad hídrica, una vez establecidas (Burrés, 1993).

2.2. PLANTAS AUTÓCTONAS MEDITERRÁNEAS CON VALOR ORNAMENTAL

Planta autóctona es aquella especie, subespecie o variedad que crece de forma natural en una determinada región sin intervención del hombre. Son, por tanto, aquellas propias de cada lugar, que, lógicamente, fueron las primeras utilizadas en los comienzos de la jardinería. Se distinguen de ellas las plantas exóticas que son aquellas procedentes de otros lugares.

Se puede hablar de plantas autóctonas mediterráneas como una serie de especies vegetales que, aunque provenientes de zonas geográficas diversas, sus características vegetativas les han permitido desenvolverse bien en nuestras zonas, estando su cultivo ampliamente difundido en las provincias bañadas por el Mediterráneo.

Las “plantas mediterráneas” son consideradas como plantas más tolerantes a plagas y enfermedades, estando especialmente adaptadas a condiciones de veranos secos y en ciertos casos a salinidad, un problema común en la Región Mediterránea (Caballero and Cid, 1993). Las estrictas condiciones de la Región Mediterránea, como veranos cálidos e inviernos templados, una irregular distribución de las precipitaciones, unido a fuertes degradaciones edáficas provocadas por causas naturales o antrópicas, que generan problemas de erosión y pérdidas de suelo, hacen que una adecuada elección de las especies autóctonas para revegetación sea de primordial interés (Naveh, 1987). Las plantas autóctonas pueden contener genes que les transfieren resistencia a plagas y enfermedades, además de mantener la biodiversidad y potenciar su utilización al estar mejor adaptadas al medio (Tutin *et al.*, 1968).

Se puede decir, por tanto, que hablar de jardinería autóctona mediterránea equivale, frecuentemente, a hablar de xerojardinería, es decir, jardinería de bajo consumo de agua, lo que a su vez implica el uso de plantas adaptadas a las condiciones climáticas mediterráneas.

Las principales ventajas que presenta el uso de plantas autóctonas mediterráneas son:

- Son plantas propias de la zona, adaptadas al régimen hídrico, temperatura y suelos del lugar.
- Son las más apropiadas para restaurar paisajes degradados por impactos ambientales.
- Las plantas del clima mediterráneo, mayoritariamente siempre verdes, proporcionan interés y cobertura todo el año.
- Los climas mediterráneos favorecen a una gama de plantas extraordinariamente amplia con un creciente incremento de especies nuevas y bien adaptadas a sus condiciones.
- La vegetación autóctona del clima mediterráneo es básicamente rústica, resultando de una manipulación admirablemente baja.
- Las plantas autóctonas se adaptan bien a condiciones adversas y se autorregulan después de ser plantadas.

Aunque también existen algunos inconvenientes:

- Desconocimiento del manejo de muchas de ellas.
- Algunas son de crecimiento lento o bajas, sobre todo los árboles.
- Problemas de disponibilidad: falta de viveros especializados.
- Indumentos o características no deseables en algunas de ellas.
- La intensidad de luz en cada una de las estaciones del año convierten al verano en un período difícil para las plantas.
- El viento, que en otros climas no es siempre una desventaja, puede serlo en el clima mediterráneo.

A pesar de todas las ventajas que supone la utilización de plantas autóctonas, su uso es actualmente escaso, tanto con fines ornamentales como con fines alimentarios. Esta situación contrasta con la riqueza biológica vegetal a nivel nacional y regional. España es un país privilegiado en relación al medio natural. Centrándonos en la flora, se calcula que el número de plantas vasculares presentes en España oscila entre 8.000 y 9.000, lo que supone aproximadamente un 80-90% de las plantas vasculares presentes en la Unión Europea (UE) y el 60% de todas las del continente europeo (MOPTMA, 1995). Comparando el número de plantas vasculares endémicas de cada uno de los países de la UE observamos que España es, con diferencia, el país más rico en

endemismos. Existen unas 1.500 especies o subespecies endémicas, unas 590 compartidas con el norte de África, 228 compartidas únicamente con Portugal y unos 195 endemismos pirenaicos de España y Francia. Prácticamente la mitad de los endemismos europeos son españoles, a pesar de que nuestro territorio representa sólo un 4,5% de la superficie europea. Por otra parte, en la Región de Murcia hay catalogados más de 2.500 taxones (hasta nivel de subespecie) de plantas vasculares, de los cuales, unos 200 taxones de la flora silvestre de la región son endemismos ibéricos, iberoafricanismos o plantas raras que deben ser analizadas por su situación de amenaza.

Sin embargo, esta extraordinaria riqueza florística original y frágil, cuyo uso en paisajismo está aumentando considerablemente ha sido poco utilizada en la jardinería española. Esto tiene una explicación: son plantas que tienen, en general, un crecimiento lento y una flora que es vistosa solamente en algunos géneros (*Cistus*, *Nerium*, etc.), aunque la presencia de tonos verdes en su follaje, o su carácter habitualmente perennifolio y la resistencia a diversas condiciones ambientales, hacen que la planta autóctona pueda ser un elemento valioso en jardinería; pero hay que potenciar su estudio y difusión (Cabot *et al.*, 2000).

En la actualidad la horticultura ornamental ocupa un papel relevante en el conjunto de la horticultura española, representando el 4,4% de la producción vegetal final (Gutiérrez, 1999). Además, la productividad de especies ornamentales tanto por hectárea, como por metro cúbico de agua utilizada es muy superior a la mayoría de los cultivos hortícolas, representando una clara alternativa a los mismos, sobre todo, en regiones con déficit hídrico, como es nuestro caso (Arcas y Romero, 2000).

El uso de plantas autóctonas para flor cortada, complemento en verde, o planta de vaso, es una buena opción, ya que el uso de material vegetal alóctono conlleva mayores exigencias ambientales, problemas de infección de nuevas plagas y enfermedades, y además genera dependencia de otros países e inversiones económicas. De hecho en el sector de la planta ornamental se está produciendo un cambio progresivo del consumo, provocando una diversificación del material vegetal, que se refleja en los cultivos de flor cortada, complemento en verde y planta en vaso. El uso de flor autóctona con fines comerciales supone la incorporación en el mercado de un producto nuevo (Chimonidou, 2000).

En los últimos años, el uso de planta autóctona en jardinería privada y pública va en aumento. En jardinería pública, su uso en remodelación y construcción de nuevos

jardines presenta ciertos obstáculos que deben ser superados; como el desconocimiento de las técnicas de cultivo, adaptación a otros cultivos artificiales, poca variedad de plantas, etc. (López y Medina, 2000). Del mismo modo, en jardinería privada también se detecta un mayor interés por la planta autóctona, a veces por la facilidad de mantenimiento, y otras por un intento de aproximación a la naturaleza.

Las especies exóticas son también muchas veces utilizadas, no siempre con buen resultado, en detrimento de las plantas autóctonas. Estas plantas exóticas generalmente, en su mantenimiento requieren mayores cuidados, siendo numerosas las especies que no florecen o lo hacen raramente (Molina *et al.*, 1997). Además, crear pequeños ecosistemas compuestos de plantas totalmente ajenas al entorno en el que viven es, hoy en día, una fórmula botánica en desuso. Para muchos, ya no tiene sentido llenar un parterre de flores exóticas o especies tropicales cuando nos encontramos en lugares donde las lluvias son limitadas. Sobre todo porque nos ocasionaría la necesidad de regar demasiado o tratar con productos químicos el suelo y así conseguir adaptar artificialmente las condiciones ambientales.

El concepto de jardinería autóctona trae consigo una forma de entender el jardín, menos artificial, más acorde con la estructura y la dinámica de los paisajes naturales, donde las especies se interrelacionan y su composición mantiene, dentro de lo posible, un grado de semejanza con los ambientes naturales a los que pretende emular.

Algunas especies importantes en la jardinería mediterránea (limonero, árbol del paraíso, árbol de Júpiter, naranjo amargo...) fueron introducidas por fenicios, romanos y árabes; aunque a partir del siglo XV, con el descubrimiento de América y algunas regiones africanas, fue cuando se incorporaron nuevas especies que aumentarían significativamente la cantidad de plantas exóticas utilizadas en jardines europeos.

Tanto movimiento de especies ha provocado que pueda haber confusión en determinados términos utilizados en paisajismo como plantas autóctonas, mediterráneas, silvestres, naturalizadas, etc. Es por eso que, en sentido genérico, se habla de jardín mediterráneo incluyendo especies que no pertenecen realmente a la flora mediterránea, pero se han adaptado muy bien y también son usadas muy ampliamente, siendo consideradas autóctonas (Gildemeister, 1997).

Entre las especies tradicionalmente utilizadas y que persisten en la jardinería actual destaca el pino carrasco (*Pinus halepensis*) en los parques mediterráneos. Otras especies hoy olvidadas que tuvieron un particular interés en tiempos pasados son, por

ejemplo, los lirios (diferentes especies de *Iris*) y las varas de San José. Algo parecido también ocurre con la encina, el pino piñonero, el alelí cuarentena (*Erysimum cheiri*) y las especies silvestres de rosa como *Rosa gallica* (Rivera, 1997).

Entre las especies más utilizadas en la actualidad encontramos el grupo de las labiadas, con especies como *Lavandula dentata*, *L. stoechas*, *Salvia officinalis* y *Rosmarinus officinalis*, junto a otras como el lentisco, la adelfa (*Nerium oleander*), o el acebuche (*Olea europea* var. *Sylvestris*). Sin embargo, existe un elevado número de especies silvestres, con un enorme potencial ornamental, usadas escasamente o que no han sido empleadas nunca en jardinería autóctona como: *Coronilla juncea*, *Lotus creticus*, *Osyris quadripartita*, *Phragmites australis*, *Ephedra fragilis*, *Sedum album*, *Withania frutescens*, *Thymelea hirsuta*, *Tetraclinis articulata*, entre otras muchas.

2.3. ENDURECIMIENTO

En la zona mediterránea, los proyectos de jardinería y paisajismo deben emplear especies de plantas ornamentales adaptadas a sus condiciones ambientales, bastante desfavorables para ellas, que pueden ser causa de estrés, y que ponen en peligro su supervivencia; es por ello que el trasplante y la fase de establecimiento definitivo son críticos para lograr el éxito en dichos proyectos (Whitcomb, 1986).

Factores como déficit hídrico, exceso de calor, salinidad, deficiencia de oxígeno, reguladores del crecimiento, pueden afectar al crecimiento de las plantas, así como a su biomasa o su productividad. Para sobrevivir, conviene que salgan del vivero lo más aclimatadas posible a esas condiciones adversas.

El concepto de aclimatación es diferente al de adaptación. Adaptación se refiere a un determinado nivel genético de resistencia adquirido por un proceso de selección a lo largo de muchas generaciones. Si la tolerancia aumenta debido a una exposición se dice que la planta se aclimata o endurece. Debido a la influencia de condiciones naturales, las plantas están frecuentemente expuestas a estrés. Algunos factores ambientales pueden hacerse estresantes en pocos minutos (por ejemplo la temperatura del aire), otros pueden tardar días o semanas (agua del suelo) o hasta meses (algunos nutrientes minerales). El estrés también tiene un papel muy importante en determinar como el suelo y clima limitan la distribución de las especies de plantas (Nilsen y Orcut, 1996).

Se pueden usar diversos métodos de acondicionamiento para endurecer a las plantas, de tal forma que desarrollen unas características morfológicas y fisiológicas que les permitan resistir situaciones de falta de agua, altas temperaturas, salinidad, etc. y así sobrevivir al trasplante y que el estrés sea lo menor posible.

La repercusión de las técnicas de producción viverística para un mayor o menor éxito en el trasplante y posterior comportamiento de la planta en terreno definitivo ha sido poco estudiada (Arnott *et al.*, 1993). Las condiciones ambientales que las plántulas experimentan durante su crecimiento en vivero son determinantes para conseguir el éxito en su establecimiento definitivo (Terradas y Savé, 1992). La aclimatación permite la resistencia como resultado de la exposición de las plantas al estrés (Taiz, 1998).

Algunas de las técnicas de endurecimiento empleadas pueden ser: riego deficitario, manejo del microclima (temperatura, humedad, dióxido de carbono, luz), micorrización, manejo de la fertilización y empleo de fitoreguladores.

Una vez aplicados estos métodos, se puede estudiar el endurecimiento de las plantas midiendo algunos parámetros morfológicos (altura, diámetro, peso, etc.) y fisiológicos (potencial hídrico, conductancia estomática, fotosíntesis, etc.).

2.3.1 MÉTODOS DE ENDURECIMIENTO

2.3.1.1. RIEGO DEFICITARIO

Consiste en regar con dosis menores de las normales, en nuestro caso durante todo el periodo de vivero, para favorecer el endurecimiento de las plantas y que así puedan ser transplantadas en condiciones adversas y sobrevivir.

Se han publicado recientemente varios trabajos estudiando cómo afecta el riego deficitario durante la producción en vivero a algunas características morfológicas y fisiológicas de especies ornamentales de interés: *Argyranthemum coronopifolium* (De Herralde *et al.*, 1998), *Limonium cossonianum* (Franco *et al.*, 2002b), *Lotus creticus* (Franco *et al.*, 2001; Bañón *et al.*, 2004), *Myrtus communis* (Bañón *et al.*, 2002), *Nerium oleander* (Bañón *et al.*, 2005), *Olea europaea* var. *Sylvestris* (Bañón *et al.*, 2003b), *Phillyrea angustifolia* (Fernández *et al.*, 2004), *Pistacia lentiscos* y *Juniperus oxycedrus* (Vilagrosa *et al.*, 2003), *Rhamnus alaternus* (Bañón *et al.*, 2003b), *Rosmarinus officinalis* (Sánchez-Blanco *et al.*, 2004).

2.3.1.2. MANEJO DEL MICROCLIMA

Se pueden modificar algunas condiciones climáticas dentro del invernadero para favorecer el comportamiento de las plantas tras el trasplante:

- **Temperatura:** las plantas que son tratadas durante su etapa de vivero con temperaturas bajas, después presentan mayores tasas de supervivencia y de crecimiento relativo tanto en la parte aérea como del sistema radical. Se ha comprobado que con éste tratamiento, las plantas desarrollan menor altura y menores proporciones altura/diámetro de tallo y parte aérea/sistema radical; los valores de gs y transpiración son menores en el momento del trasplante, y aumenta la densidad estomática abaxial. La eficiencia fotoquímica también puede verse reducida, incrementándose la concentración foliar de antocianos (Close *et al.*, 2004).
- **Humedad del aire:** según se ha comprobado en estudios previos, la aplicación de baja humedad, junto con riego deficitario, favorece el endurecimiento de las plántulas. Ello es debido a varios mecanismos de adaptación a la sequía y el calor: reducción del crecimiento y redistribución de los asimilados hacia las raíces, permitiendo el desarrollo de un sistema radical mayor y más eficiente; ajuste osmótico foliar, que permite en situaciones de falta de agua, que se mantenga la turgencia; regulación estomática más eficiente.
- **CO₂:** se pueden obtener, mediante el enriquecimiento del aire con CO₂, plántulas con una mayor productividad y baja relación parte aérea/sistema radical; capaces de tolerar las condiciones desfavorables del trasplante en xerojardinería y paisajismo (Biel *et al.*, 2004; Cortes *et al.*, 2004). En estudios realizados, combinado con riego deficitario, el enriquecimiento con CO₂ incrementa la biomasa total, la biomasa foliar y el área foliar; mientras que el riego deficitario disminuye la biomasa de tallos y hojas y el área foliar; aunque no se ha observado que ambos factores interactúen entre sí.
- **Intensidad luminosa y fotoperiodo:** la intensidad luminosa suele afectar al crecimiento y floración de las plantas ornamentales, aunque su respuesta a este factor varía según las especies (Heiskanen, 2004). Un fotoperiodo largo en especies de fotoperiodo corto da lugar a un incremento de biomasa (Adams y Langton, 2005).

2.3.1.3. MICORRIZACIÓN

Para un buen establecimiento tras el trasplante es importante que las plantas desarrollen lo más rápido un sistema radical funcional, especialmente si se enfrenta a condiciones edafoclimáticas adversas, pues un sistema radical convenientemente micorrizado presenta una mayor capacidad para la absorción de agua y nutrientes (Goicoechea *et al.*, 2004; Iglesias *et al.*, 2004; Sánchez-Blanco *et al.*, 2004). Las plántulas inoculadas con micorrizas desarrollan un sistema radical más ramificado y con raíces más cortas y densas, lo que ayuda a su establecimiento tras el trasplante (Hooker *et al.*, 1992; Citernesi *et al.*, 1998; Palenzuela *et al.*, 2002; Marín *et al.*, 2003; Sánchez-Blanco *et al.*, 2004). La micorrización también puede influir de forma sustancial en la nutrición de las plantas. También se ha encontrado un efecto positivo sobre el crecimiento de las plántulas durante la fase de vivero (Carpio *et al.*, 2003).

Los hongos utilizados anteriormente en estudios de micorrización han sido principalmente del género *Glomus*: *Glomus intraradices* (Palenzuela *et al.*, 2002; Carpio *et al.*, 2003; 2005; Linderman y Davis, 2003; Marín *et al.*, 2003), *G. mosseae* (Citernesi *et al.*, 1998; Marín *et al.*, 2003), *G. deserticola* (Iglesias *et al.*, 2004; Sánchez-Blanco *et al.*, 2004), *G. fasciculatum* (Goicoechea *et al.*, 2004), mezclas de diferentes *Glomus* spp. (Carpio *et al.*, 2003; 2005), *Acaulospora scrobiculata* (Iglesias *et al.*, 2004) y *Pisolithus tinctorius* (Maestre *et al.*, 2002; Martín *et al.*, 2003).

2.3.1.4. MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN

Es una forma eficaz de controlar el crecimiento de las plántulas en su fase de vivero. La aplicación de una fertilización apropiada, de la que resulte una plántula bien equilibrada en cuanto a su parte aérea y su sistema radical, es vital para su supervivencia y crecimiento tras ser transplantada en condiciones adversas, en las que la competencia por el agua y los nutrientes es muy intensa (Martin y Ruter, 1996; Rikala *et al.*, 2004). La respuesta a la fertilización a veces varía para plantas taxonómicamente próximas (Close y Beadle, 2004).

Si aplicamos micorrización, la adecuada colonización por parte de la micorriza inoculada es a veces incompatible con el empleo de una fertilización convencional, la cual puede tener un efecto tóxico inhibitorio sobre aquella (Quoreshi, 2003).

2.3.1.5. EMPLEO DE FITORREGULADORES

Los fitorreguladores pueden definirse como compuestos sintéticos u hormonas naturales con capacidad de modificar los procesos fisiológicos de las plantas. Su acción resulta de la imitación de hormonas, influencia en la síntesis hormonal, destrucción, traslocación, o incluso, modificación del lugar de acción hormonal (Luckwill, 1981). Son utilizados principalmente para manipular la forma, el tamaño, la floración, y la tolerancia a estreses abióticos de plantas ornamentales (Ruter, 1994; Bañón *et al.*, 2001b). También se usan en la propagación clonal mediante técnicas *in Vitro* (Glocke *et al.*, 2005).

Los efectos que produce cada fitorregulador sobre la planta pueden ser muy distintos (Bruner *et al.*, 2000, 2001). Algunos de los más empleados pueden ser:

- Daminozida: fue uno de los primeros productos químicos usados para inhibir el crecimiento de las plantas (Cathey, 1975). Su modo de acción es el mismo para inhibir la traslocación de las giberelinas o para promover su degradación (Rademacher, 1991).
- Cloruro de clormecuat (CCC): es bien absorbido por vía foliar y radicular y que actúa en múltiples direcciones.
- Uniconazol: puede ser usado como fungicida, que inicialmente actúa como inhibidor de una o más enzimas citocromo oxidasa, importantes en la biosíntesis de esteroides, componentes necesarios en las paredes celulares de hongos (Rademacher, 1991; Benton y Cobb, 1987).
- Paclobutrazol (PBZ): fue originalmente usado como fungicida. Más tarde se descubrió que tiene un elevado nivel de actividad reguladora del crecimiento de la planta. El PBZ también ha sido una alternativa a la poda en muchos árboles de fruto, en la producción de arbustos para paisajismo, así como, para controlar el crecimiento en altura en crisantemo, geranios, entre otras plantas. Su fórmula es $C_{15}H_{20}CLN_3$.

2.3.2. PARÁMETROS FISIOLÓGICOS DE MEDIDA DEL ENDURECIMIENTO

2.3.2.1. POTENCIAL HÍDRICO (Ψ)

El potencial hídrico constituye la resultante de fuerzas de orígenes diversos (osmótica, capilar, turgente, etc.) que liga el agua al suelo o a los tejidos del vegetal. Se puede definir como el trabajo que habría que suministrar a una unidad de masa de agua “ligada” al suelo, o a los tejidos de una planta, para llevarla de ese estado de unión a un estado de referencia, correspondiente al del agua pura (“libre”) a la misma temperatura y a la misma presión atmosférica. Como se adopta el valor 0 para este potencial de referencia, todos los Ψ que caracterizan “el agua ligada” son negativos, puesto que sería necesario suministrar un trabajo para llevar esta agua a un $\Psi = 0$.

El potencial hídrico en una muestra es directamente proporcional a la diferencia entre el potencial químico del agua en la muestra (μ) y el potencial químico de referencia del agua (μ°); e inversamente proporcional al volumen molar del agua (V).

El potencial químico es la variación de la energía libre del agua en un punto, debido a una variación de moles de agua que entran o salen de este punto, siendo constantes los demás parámetros.

El término potencial y, en general, el tratamiento más antiguo que se conoce sobre el uso de los conceptos termodinámicos en plantas corresponde a Tang y Wang (1941), aunque la gran aceptación de estos conceptos se debió a la propuesta conjunta de Taylor y Slatyer sobre una terminología unificada en los estudios de las relaciones planta-suelo-agua, en un congreso sobre Zonas Áridas celebrado en Madrid (Taylor y Slatyer, 1961).

En un sistema particular, el potencial hídrico total es la suma algebraica de varios componentes:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g$$

Siendo Ψ_p , Ψ_s , Ψ_m y Ψ_g , respectivamente, componentes debidos a fuerzas de presión, osmótica, mátrica y gravitacional. El componente de presión (Ψ_p) representa la diferencia en presión hidrostática con la referencia y puede ser positivo o negativo. El componente osmótico (Ψ_s) es consecuencia de los solutos disueltos, disminuye la energía libre del agua y es siempre negativo. El potencial osmótico se halla relacionado con la fracción molar del agua (χ_a) o su actividad (a_a), que disminuyen con la presencia

de solutos. El potencial mátrico (Ψ_m) es similar a Ψ_s , excepto que la reducción de a_a es consecuencia de fuerzas en las superficies de los sólidos. El componente gravitacional (Ψ_g) es consecuencia de diferencias de energía potencial debidas a diferencia de altura con el nivel de referencia, siendo positivo si es superior al de referencia, y negativo cuando es inferior.

El potencial hídrico de la planta también se utiliza para expresar el estado energético del agua en células y tejidos vegetales.

Ψ consta de tres componentes potenciales:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m$$

Para entender la naturaleza y contribución de los diferentes potenciales componentes de Ψ se considera una célula adulta que consta de tres fases distintas: una pared celular elástica, el citoplasma con el núcleo y los orgánulos, y una vacuola central que contiene una solución diluida de azúcares, iones orgánicos, etc. La vacuola que llega a ocupar entre el 80 y el 90% del volumen total de la célula se halla rodeada por el tonoplasto, que es también una membrana semipermeable. Se considera, por tanto, que los intercambios de agua celular están controlados por la vacuola y, además, que la célula parenquimática madura se comporta como un osmómetro. En tal caso, se desprecia la contribución de la matriz ($\Psi_m = 0$), quedando:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s$$

Cuando una célula pierde agua, a medida que lo hace, se puede observar una interdependencia entre su volumen, Ψ , Ψ_s y Ψ_p . En una célula totalmente turgente, $\Psi = 0$, de tal modo que $\Psi_s = -\Psi_p$. En este punto, el volumen relativo a plena turgencia es 100. A medida que se pierde agua, disminuye el volumen celular; así la presión de turgencia, generada como consecuencia de la extensión elástica de la pared celular, disminuye aproximadamente de manera lineal con el volumen celular hasta el punto de turgencia cero (cuando Ψ_p se iguala a 0). A medida que decrece el volumen celular, el potencial osmótico disminuye, dado que Ψ_s se halla inversamente relacionado con el volumen celular.

2.3.2.2. MOVIMIENTOS ESTOMÁTICOS

Las plantas terrestres se enfrentan a demandas opuestas. Por una parte, la humedad de la atmósfera es tan relativamente baja, que la planta corre peligro de deshidratación, a pesar de la presencia de la cutícula, que actúa como barrera. Por otra parte, una barrera completa bloquearía el intercambio de O₂ y CO₂, esencial para respiración y fotosíntesis. Debido a esta limitación, las plantas no pueden impedir la difusión del agua hacia el exterior, sin impedir también la entrada de CO₂ en la hoja. La solución funcional a este dilema es la regulación temporal de las aberturas estomáticas. Por la noche, cuando no hay fotosíntesis, y por tanto no existe demanda de CO₂ en el interior de la hoja, las aberturas estomáticas se mantienen pequeñas, impidiéndose la pérdida innecesaria de agua. Por la mañana, cuando el suministro de agua es abundante y la radiación solar incide sobre la hoja, favorece la actividad fotosintética, la demanda de CO₂ dentro de la hoja es grande, y los poros estomáticos están muy abiertos, disminuyendo la resistencia a la difusión del CO₂.

En estas condiciones, la transpiración estomática también tiene un aspecto positivo. En primer lugar, crea la corriente transpiratoria que transporta rápidamente los nutrientes minerales desde las raíces a las partes aéreas en crecimiento y, en segundo lugar, enfría las hojas cuando el tiempo es caluroso o la luz potente. Por tanto, cuando el agua es abundante, los estomas pueden desempeñar un papel importante en la regulación térmica.

Por todo esto, la capacidad para abrir y cerrar los poros estomáticos es absolutamente esencial, y se consideran válvulas gobernadas por turgencia, que regulan el intercambio de gases; proporcionando a las plantas un mecanismo fundamental para adaptarse a un ambiente continuamente cambiante. Uno de sus papeles más importantes es la regulación de la pérdida de agua (transpiración), para la conservación del agua.

La abertura estomática en relación con el suministro de agua está controlada por, al menos, tres señales: diferencia de presión de vapor entre la hoja y el aire; niveles de ABA en el apoplasto foliar; y alguna señal no bien conocida procedente de las raíces. Los estomas de muchas especies se cierran en respuesta a un aumento en la diferencia de presión de vapor entre la hoja y el aire. La magnitud de esta respuesta depende de la especie, de las condiciones de crecimiento, y, especialmente, del estado hídrico de la planta, siendo menor la respuesta a temperatura elevada o en plantas sometidas a sequía.

La señal procedente de la hoja, que provoca el cierre estomático en caso de déficit hídrico, es el inhibidor del crecimiento ácido abscísico (ABA). Las hojas e, incluso, la epidermis superior e inferior de una misma hoja pueden variar su sensibilidad al ABA. Cuando las hojas se marchitan (turgencia 0), se desencadena la síntesis de ABA en los cloroplastos de las células del mesófilo. Al cabo de varios ciclos de marchitamiento y recuperación, los niveles de ABA aumentan y, al final, una caída de la turgencia foliar provoca la liberación del ABA almacenado en las paredes celulares. El ABA puede transportarse hasta el plasmalema de las células oclusivas en las que afecta al bombeo de iones y provoca el cierre estomático. En este caso, el papel del ABA parece ser verdaderamente hormonal. A medida que la hoja se rehidrata se degrada el ABA apoplástico.

2.3.2.3. FOTOSÍNTESIS NETA

El proceso de fotosíntesis consiste en captar la energía de la luz y utilizarla, mediante una compleja serie de reacciones, para fabricar los glúcidos, y liberar el oxígeno, a partir del dióxido de carbono y del agua. La fotosíntesis es en esencia un proceso de óxido-reducción, en el que el carbono del dióxido de carbono (CO_2) se reduce a carbono orgánico.

El CO_2 se encuentra en la atmósfera, desde donde se traslada por *difusión* (siguiendo un camino inverso al del vapor de agua durante la *transpiración*), a través del ostiolo hasta las paredes del mesófilo, y desde allí llega hasta los cloroplastos. Este flujo difusional es directamente proporcional a la diferencia de concentraciones de CO_2 e inversamente proporcional a las resistencia que el camino oponga. La diferencia de concentraciones se establece entre la atmósfera, cuya proporción de CO_2 es de aproximadamente un 0.03 %, y el cloroplasto, donde el CO_2 va siendo transformado por fotosíntesis en otros compuestos y no llega a acumularse en forma significativa.

De las diversas resistencias a la difusión, la más relevante es la estomática: si los estomas se cierran (debido a un déficit hídrico, por ejemplo) el CO_2 no llegará al cloroplasto y la fotosíntesis se interrumpirá.

Para que la energía de la luz pueda ser usada por los seres vivos, primero ha de ser absorbida. Una sustancia que absorbe la luz se denomina pigmento. La clorofila, el

pigmento que hace que las hojas sean verdes, absorbe la luz en el espectro violeta y azul y también en el rojo. Puesto que transmite y refleja la luz verde, su aspecto es verde.

Las membranas especializadas, donde se encuentran embebidas la clorofila y otros pigmentos, se llaman tilacoides. Normalmente, presentan un aspecto de sacos o vesículas aplanadas. En los eucariotas, los tilacoides forman parte de la estructura interna de orgánulos especializados, los cloroplastos. En las plantas, los cloroplastos se encuentran presentes en todas las células clorénquimáticas del mesófilo y de la periferia de los tallos herbáceos.

El complejo proceso de fotosíntesis, con sus numerosos pasos que ocurren en varias etapas y tienen lugar en distintos compartimentos estructurales, se ve afectado por diversos factores, tanto ambientales como endógenos o propios de la planta. Entre los factores ambientales principales se cuentan la luz, que proporciona la energía necesaria; la concentración atmosférica de CO_2 , que es la fuente de carbono; la temperatura, debido a su influencia en todos los procesos enzimáticos y metabólicos; también juegan un papel la disponibilidad de agua, que puede afectar al grado de apertura estomática y por tanto a la difusión del CO_2 , y la disponibilidad de nutrientes. Los factores endógenos son las características propias del vegetal (estructurales, bioquímicas, etc.) que influyen en cualquiera de los procesos parciales de la fotosíntesis, y resultan de la interacción entre el genotipo y el ambiente en el que se ha desarrollado la planta. También influyen en la fotosíntesis la densidad de los estomas y su sensibilidad, la edad de la hoja y el área foliar, entre otros factores.

Tanto los factores internos como los ambientales interaccionan entre sí; a modo de ejemplo, téngase en cuenta que la radiación influye sobre la temperatura del aire, y ésta sobre su humedad relativa y también sobre la difusión del CO_2 , mientras que el ácido abscísico afecta al grado de apertura estomática, y ciertas características epidérmicas (pelos, ceras) influyen sobre la proporción de luz absorbida.

Por otra parte, la fotosíntesis está estrechamente relacionada con los procesos metabólicos que consumen moléculas orgánicas, en los que intervienen los gases atmosféricos. Al tiempo que la fotosíntesis consume CO_2 y libera O_2 , la fotorrespiración y la respiración mitocondrial consumen O_2 y liberan CO_2 ; una elevada concentración externa de O_2 favorecerá la fotorrespiración a costa de la fotosíntesis. En consecuencia, cuando se estudia la influencia de ciertos factores sobre la acumulación de productos de la fotosíntesis a través de los cambios en la concentración de CO_2 en la

atmósfera, en realidad se está midiendo la actividad de los tres procesos considerados globalmente y su resultado neto.

Si se considera positiva la acumulación de sustancias orgánicas resultantes de la fotosíntesis, llamadas genéricamente fotoasimilados, y negativa su pérdida, puede definirse el intercambio neto de carbono con el ambiente como:

$$FN = FB - (FR + RM)$$

donde FB, o fotosíntesis bruta, representa la cantidad total de fotoasimilados producida, FR representa la cantidad consumida por fotorrespiración y RM representa las pérdidas debidas a respiración mitocondrial. El balance puede expresarse como la cantidad de fotoasimilados resultante de ganancias y pérdidas o **fotosíntesis neta** (FN).

La **fotosíntesis neta** resulta un índice adecuado para estudiar el efecto de algunos factores ambientales importantes sobre la acumulación de materia orgánica de la planta, y pro tanto sobre el aumento del peso seco, directamente relacionado con el crecimiento.

La fotosíntesis neta es normalmente medida mediante el uso de un analizador infrarrojo (IRGA). Este determina la cantidad de moléculas de CO₂ en un determinado volumen de aire. El CO₂ absorbe la radiación infrarroja especialmente en aquella de longitud de 4,26 μm y eliminar el agua y otros gases con filtros adecuados. Este posee una fuente de radiación IR ubicada en un extremo del tubo y un detector en el otro extremo. La cantidad de radiación que llega al detector es función de la cantidad de moléculas de CO₂ que se encuentran entre la fuente de radiación y el detector. El instrumento posee dos tubos, uno de los cuales puede contener un gas sin CO₂ (tubo de referencia) y el otro el gas a analizar con CO₂ (tubo de análisis). La diferencia entre ambos puede ser determinada.

2.3.2.4. CLOROFILA

La clorofila es el pigmento de color verde presente en plantas y algas y es el elemento básico para la transformación de la energía del sol en el proceso de la fotosíntesis. Su función es la absorción de energía luminosa en la variante de la fotosíntesis que llamamos fotosíntesis oxigénica, la que es característica de los organismos mencionados. El principal papel de las clorofilas en la fotosíntesis es la absorción de fotones de luz con la consiguiente excitación de un electrón. Ese electrón

excitado cede su energía, volviendo al estado normal, a algún pigmento auxiliar (a veces otras clorofilas), donde se repite el fenómeno. Al final el electrón excitado facilita la reducción de una molécula, quedando así completada la conversión de una pequeña cantidad de energía luminosa en energía química, una de las funciones esenciales de la fotosíntesis.

La estructura de la molécula de clorofila tiene dos partes: un anillo de *porfirina* sustituida (con pequeños grupos enlazados, *sustituyentes*) y una cadena larga llamada *fitol*. El anillo de porfirina es un tetrapirrol, con cuatro anillos pentagonales de pirrol enlazados para formar un anillo mayor que es la porfirina. La porfirina de la clorofila lleva un átomo de magnesio (Mg^{+2}). La absorción de determinados picos del espectro de radiación es una propiedad de aquellas moléculas orgánicas que contienen dobles enlaces conjugados. El *fitilo* es una cadena hidrocarbonada con restos de metilo ($-CH_3$) a lo largo. Tiene, como todas las cadenas orgánicas basadas sólo en C e H, un carácter “hidrófobo”; es decir, que repele al agua. La cadena del fitilo sirve para anclar la molécula de clorofila en la estructura anfipática de los complejos moleculares en que residen las clorofilas.

Las clorofilas son insolubles en agua y solubles en disolventes orgánicos. Se pueden distinguir diversos tipos (*a*, *b*, *c*, *d*, *e*, bacterioclorofilas, clorofilas de *Chlorobium*, etc.). Las más conocidas son la *a* y la *b* que son las de más amplia distribución. Las clorofilas *c*, *d* y *e* se encuentran en algas, junto a la *a*; las bacterioclorofilas se hallan solamente en bacterias fotosintéticas.

Las clorofilas tienen típicamente dos picos de absorción en el espectro visible, uno en el entorno de la luz azul (400-500 nm de longitud de onda), y otro en la zona roja del espectro (600-700 nm); sin embargo reflejan la parte media del espectro, la más nutrida y correspondiente al color verde (500-600 nm). Esta es la razón por la que las clorofilas tienen color verde y se lo confieren a los organismos, o a aquellos tejidos, que tienen cloroplastos activos en sus células.

La clorofila fue descubierta en 1817 por los químicos franceses Pelletier y Caventou, que consiguieron aislarla de las hojas de las plantas. Pelletier introdujo los métodos, basados en la utilización de disolventes suaves, que permitieron por primera vez aislar no sólo la clorofila, sino sustancias de gran importancia farmacológica como la cafeína, la colchicina o la quinina.

2.4 RIEGO DEFICITARIO

Es bien sabido que el riego deficitario afecta a aspectos morfológicos y fisiológicos relacionados con el endurecimiento de las plantas (Liptay *et al.*, 1998), produciendo cambios que permiten a las plantas resistir mejor el estrés hídrico.

El déficit hídrico es conocido por limitar la productividad de las plantas en muchas regiones del mundo. Estudios recientes muestran que los grados de crecimiento de diversas plantas son directamente proporcionales a la disponibilidad de agua en el suelo. El déficit hídrico también altera distintos procesos bioquímicos y fisiológicos, desde la fotosíntesis hasta la síntesis proteica y acumulación de solutos (Chartzoulakis *et al.*, 2002). La restricción hídrica logra el endurecimiento o tolerancia al estrés. Esta tolerancia es importante para asegurar el éxito en los trasplantes de las plantas en su establecimiento definitivo, un elevado porcentaje de supervivencia y un mayor grado de adaptación (Liptay, 2000).

El estrés hídrico es un tipo de estrés fisiológico; esto es, un conjunto de condiciones que causan una modificación en los procesos fisiológicos, desembocando frecuentemente en perjuicios. Algunos autores definen el estrés como un cambio en la fisiología que ocurre cuando las especies son expuestas a condiciones desfavorables, y que induce una respuesta de alarma; las respuestas de alarma son respuestas defensivas o adaptativas hacia el estímulo.

Las respuestas fisiológicas a los agentes causantes de estrés se pueden dividir en dos grupos. Uno de ellos es la tolerancia; las plantas tienen mecanismos que mantienen la actividad metabólica alta bajo un estrés más leve, y una actividad menor bajo un estrés más severo. Por otro lado están los mecanismos de anulación que ocasionan una disminución en la actividad metabólica, dando lugar a un estado de dormancia, por la exposición a un estrés extremo. Generalmente las especies pueden tener mecanismos de tolerancia o anulación, o una combinación de ambos.

El estrés hídrico afecta a muchos procesos fisiológicos y bioquímicos en las plantas. Ha habido mucho interés en comprender lo que está por detrás de esos mecanismos de estrés, que regulan el crecimiento de los tallos y raíces, así como, respuestas estomáticas. En algunas plantas, la supresión del crecimiento foliar y conductancia estomática durante la sequía, también ha sido descrita como independiente de los cambios en el flujo hídrico, y la acumulación de ABA puede ser responsable de

estas respuestas. El estrés hídrico es generalmente asociado a salinidad en la zona radicular y/o como estrés provocado por el calor en las hojas (Ismail *et al.*, 2002).

La habilidad de las plantas para funcionar en condiciones de baja humedad del suelo depende de su capacidad para ajustar forma y función con objeto de equilibrar los daños causados por potenciales hídricos negativos en suelo y atmósfera. Investigaciones de estos mecanismos de estrés pueden informar acerca del comportamiento y productividad de las plantas adaptadas a hábitats secos, así como las capacidades de otra especie para crecer en ambientes áridos.

2.4.1. MECANISMOS DE SUPERVIVENCIA AL DÉFICIT HÍDRICO

Al menos tres mecanismos de adaptación a la sequía han sido identificados:

1. Mantenimiento de la absorción de agua.

Requiere el aumento de la densidad y profundidad radical con el fin de que las raíces sigan extrayendo agua. Consiste en una traslocación de los asimilados del cuello a la raíz. Es sabido que el suelo seco estimula el crecimiento radicular y la proliferación hacia el interior del perfil del suelo. Estos cambios estructurales en la raíz están generalmente relacionados con una disminución del crecimiento de la parte aérea. El déficit hídrico disminuye la tasa de expansión foliar, producción foliar y alargamiento del tallo. Por consiguiente, en cuanto el suelo va estando más seco, más asimilados son repartidos para las raíces, que aumentan la relación de raíces en relación a la biomasa total. Esto puede ser visto como una importante respuesta de adaptación al estrés hídrico. Los resultados totales de esta combinación de cambios pueden ser un aumento del crecimiento de la raíz en todos los parámetros, en relación al crecimiento de la parte aérea. Sin embargo, conviene destacar también que suelos extremadamente secos también reducen el crecimiento radicular.

2. Ajuste osmótico.

Según la terminología de Levitt (1980), el ajuste osmótico es un mecanismo de tolerancia a la sequía que minimiza sus efectos mediante el mantenimiento de la turgencia foliar. A través del aumento de la concentración de solutos, la turgencia puede ser mantenida a un potencial hídrico bajo para que el agua del suelo pueda ser extraída.

La turgencia permite la apertura estomática y expansión celular, crecimiento radicular y aumento de la productividad. Además de la acumulación de solutos, un aumento del espesor de la pared celular y disminución del tamaño de la célula, como resultado del estrés hídrico, puede disminuir el potencial osmótico y después contribuir para mantener la turgencia. La concentración pasiva de solutos como consecuencia de una deshidratación disminuirá el valor del potencial osmótico (Ψ_s), pero no se considera ajuste osmótico, pudiendo ser explicada por hechos como un descenso en el contenido hídrico por unidad de peso seco, cambios en la elasticidad del tejido, un descenso en la relación peso saturado/peso seco, y/o un aumento en el porcentaje de agua apoplástica (Johnson *et al.*, 1984).

3. Reducción de las pérdidas de agua.

Uno de los mecanismos más generales para evitar la pérdida de agua es la reducción del área foliar (Fererres, 1984). Esta reducción se puede realizar a partir de procesos de defoliación y/o mediante la producción de hojas nuevas y más pequeñas. El resultado final es una menor superficie evaporativa, contribuyendo a la economía del agua. El cierre de los estomas es otro mecanismo importante para reducir las pérdidas de agua. Sin embargo, puesto que los estomas son los encargados de fijar el CO_2 , esta respuesta lleva consigo la reducción de la productividad. En algunos trabajos, este cierre está relacionado con una disminución en la turgencia de las hojas como consecuencia del bajo potencial hídrico. En determinadas circunstancias, el cierre de los estomas en respuesta a baja humedad del suelo, puede ocurrir a pesar de haber un elevado potencial hídrico foliar.

2.4.2. EFECTOS DEL RIEGO DEFICITARIO

Cuando las plantas van a ser transplantadas en condiciones ambientales adversas es imprescindible un buen manejo del riego durante la fase viverística. El efecto del riego deficitario sobre aspectos morfológicos y fisiológicos de las plantas ha sido estudiado, en varios trabajos publicados recientemente, para algunas especies ornamentales de interés como *Argyranthemum coronopifolium* (De Herralde *et al.*, 1998), *Limonium cossonianum* (Franco *et al.*, 2002b), *Lotus creticus* (Franco *et al.*,

2001; Bañón *et al.*, 2004), *Myrtus communis* (Bañón *et al.*, 2002), *Nerium oleander* (Bañón *et al.*, 2005), *Olea europaea* var. *sylvestris* (Bañón *et al.*, 2003^a), *Phillyrea angustifolia* (Fernández *et al.*, 2004), *Pistacia lentiscus* y *Juniperus oxycedrus* (Vilagrosa *et al.*, 2003), *Rhamnus alaternus* (Bañón *et al.*, 2003b), *Rosmarinus officinalis* (Sánchez-Blanco *et al.*, 2004).

Los efectos que frecuentemente produce el riego deficitario son:

1. Disminución del crecimiento tanto de la parte aérea (altura, longitud de tallos, área foliar, pesos fresco y seco) como del sistema radical (longitud, pesos fresco y seco, volumen de raíces).
2. Reducción de la relación parte aérea/sistema radical, uno de los parámetros que más afecta al comportamiento de la planta tras el transplante.
3. Incremento del porcentaje de raíces gruesas; disminuyendo el de raíces medias y el de raíces finas, hecho observado en *M. communis* y *N. oleander* (Bañón *et al.*, 2002; Bañón *et al.*, 2005). La reducción del volumen radical fue mayor que la del peso seco, lo que implica un aumento de la densidad de las raíces. Para la producción de plantas que resistan en el transplante condiciones de estrés hídrico, es importante un cierto grado de endurecimiento de las raíces.
4. Cambio de color de las raíces, de blanco a marrón, debido a la suberización de la exodermis, por un proceso de metacutinización (proceso de lignificación y suberización parcial) para provocar un reposo de la raíz que la protege de circunstancias adversas, en este caso estrés hídrico; aunque siendo capaz el sistema radical de continuar activamente su crecimiento cuando cesan dichas circunstancias (Bloomfield *et al.*, 1996).
5. Disminución de la conductancia estomática, potencial hídrico foliar, potencial de turgencia, potencial osmótico a plena turgencia y contenido relativo de agua, como se ha comprobado en los trabajos anteriormente citados. Se obtuvieron plantas con mayor densidad de tricomas y mayor número de vasos xilemáticos en tallos y raíces, desarrollando ajuste osmótico, lo que ayudó a la planta a soportar las condiciones adversas en su establecimiento en campo (Franco *et al.*, 2002a; Bañón *et al.*, 2004). Estos cambios permiten a la planta mantener una elevada tasa de asimilación de dióxido de carbono, posibilitando una mayor supervivencia en condiciones de sequía (Vilagrosa *et al.*, 2003).

Debido a estas modificaciones, el efecto del riego deficitario durante la producción de plántulas en vivero suele ser muy favorable, incrementando su porcentaje de supervivencia y su crecimiento en condiciones de calor y falta de agua. El incremento en la supervivencia ha sido estudiado en *Proposis glandulosa* (Bainbridge *et al.*, 2001) y *N. oleander* (Bañón *et al.*, 2005). Por otra parte, en *L. creticus* (Franco *et al.*, 2001; 2002a) y *L. cossonianum* (Franco *et al.*, 2002b), se ha observado como las plantas que durante su estancia en vivero habían sido sometidas a cierto grado de estrés hídrico, muestran un crecimiento radical mayor y más rápido tras el transplante en condiciones semiáridas especialmente cuando la humedad del suelo es escasa (Franco *et al.*, 1999); y también se reactiva antes si recibe una lluvia o un ligero riego tras mucho tiempo de sequía (Franco *et al.*, 2002b). En cuanto a la parte aérea, una vez realizado el transplante, las plantas sometidas a riego deficitario mostraron un mayor crecimiento de los tallos y una cobertura del suelo más densa en *L. creticus*, y un desarrollo mayor y más compacto con varas florales más largas en *L. cossonianum*; comprobando también que cuanto más adversas son las condiciones del transplante, más evidente se hace el efecto del endurecimiento previo (Franco *et al.*, 2001).

La técnica del riego deficitario también puede entenderse como una forma de reducción notable en el empleo de recursos hídricos sin empeorar, si acaso mejorando, las características de las plantas producidas (Bergeron *et al.*, 2004).

No sólo la cantidad de agua influye en la producción de plántulas de calidad, sino también el método de riego empleado. La supresión del riego por aspersión, y empleo de métodos de subirrigación puede mejorar las características del sistema radical (Franco y Leskovar, 2002), su potencial hídrico (Leskovar, 1998) y su estado nutricional (Biern-baum y Versluys, 1998; Franco y Leskovar, 2002); y también disminuir el impacto medioambiental, al reducirse la lixiviación de nutrientes y agroquímicos (Bilderback, 2002), sobre todo cuando se emplean sistemas de recirculación (Harris *et al.*, 1997).

2.5. EMPLEO DE FITORREGULADORES

Los fitorreguladores han sido ampliamente utilizados principalmente para manipular la forma, el tamaño, la floración, y la tolerancia a estreses abióticos de plantas ornamentales (Ruter, 1994; Bañón *et al.*, 2001b). A través de la aplicación de

estos productos es posible modificar la dinámica interna del crecimiento y desarrollo de la planta. Generalmente se utilizan en concentraciones muy bajas, y es necesario tener mucha precisión a la hora de elegir la dosis, el modo y el momento de aplicación, pues en caso contrario los resultados pueden ser contraproducentes.

La ciencia de la regulación del crecimiento se desarrolla a partir de los primeros trabajos sobre hormonas vegetales realizados en diferentes países, principalmente durante la primera mitad del siglo XX. Una vez establecido que el crecimiento y la reproducción de las plantas están controlados por hormonas vegetales producidas en la propia planta, se vio la posibilidad de interferir en el comportamiento vegetal mediante la aplicación externa de compuestos que afectan al sistema hormonal. Pero era necesario descubrir la naturaleza química de las hormonas endógenas. Este trabajo fue realmente difícil, teniendo en cuenta los métodos de análisis relativamente poco sofisticados disponibles entonces, y la extremadamente pequeña concentración en que se presentan las hormonas en los tejidos vegetales. El camino se abrió en 1934, cuando dos químicos holandeses, F. Kogl y A. J. Haagen-Smit, identificaron un ácido 3-indol acético como sustancia natural de crecimiento o auxina. Es una molécula relativamente simple, que podía ser sintetizada y aplicada a las plantas para modificar su crecimiento. Fue, de hecho, el primer regulador de crecimiento y la primera hormona endógena vegetal descubierta.

En el año 1938, al estudiarse los daños producidos en arroz por un hongo del género *Gibberella*, se descubrió la giberelina, capaz de estimular el crecimiento de este cereal. Posteriormente se descubrieron otras sustancias, unas naturales y otras sintetizadas en el laboratorio, cuya acción es bastante compleja y, a veces, poco conocida.

Los fitorreguladores naturales, obtenidos de vegetales, son costosos de extraer, por lo que en la práctica se sustituyen por fitorreguladores de síntesis, obtenidos en laboratorios a través de productos orgánicos, tales como benceno, fenol, etc. Estos fitorreguladores sintéticos producen los mismos o efectos parecidos a los fitorreguladores naturales (Luckwill, 1981).

Aunque sólo suponen un 3-4% de los productos fitosanitarios comercializados en el mundo, en los últimos años los fitorreguladores desempeñan un papel valioso en la agricultura, tanto en los cultivos destinados a la alimentación como en los cultivos ornamentales (Greene, 2002; Rademacher y Bucci, 2002).

Dentro de los fitorreguladores se pueden distinguir distintos tipos: hormonas naturales, agentes que liberan etileno, inhibidores del transporte de hormonas, miméticos de hormonas, antagonistas de hormonas, retardadores del crecimiento, inhibidores del crecimiento, etc., siendo los retardadores del desarrollo los más usados (Rademacher y Bucci, 2002).

Actualmente, los retardadores del desarrollo son usados en numerosos sistemas de producción hortícola, especialmente en plantas ornamentales, para manipular el tamaño, la forma y otros aspectos cualitativos y funcionales. Su utilización en los cultivos ornamentales es mayor que en los cultivos destinados a la alimentación (Halevy, 1995).

2.5.1. PACLOBUTRAZOL

El paclobutrazol es un retardador del desarrollo perteneciente al grupo de los triazoles, que integra al grupo más importante de compuestos sistémicos desarrollados para el control de hongos en plantas y animales (Siegel, 1981). Los triazoles fueron desarrollados en los años sesenta y se caracterizan por su actividad fúngica y retardadora del desarrollo vegetal (Fletcher y Hofstra, 1988). Su actuación en un sentido u otro depende de unas mínimas modificaciones en su estructura química (Fletcher y Hofstra, 1990).

La investigación sobre compuestos triazoles que manifestaban una mayor actividad retardadora del desarrollo fúngico desembocó en la obtención del paclobutrazol (Fletcher *et al.*, 1986). Comparado con otros retardadores del desarrollo, el paclobutrazol es muy efectivo a dosis bajas y no suele presentar problemas de fototoxicidad (Davis *et al.*, 1988; Jung *et al.*, 1986).

El nombre químico del paclobutrazol es (2RS,3RS)-1-(4-clorofenil)-4,4-dimetil-2-(1H-1,2,4-triazol-1-il)pentano-3-ol y su estructura se caracteriza por tener un heterociclo con nitrógeno. El mecanismo de acción principal por el que el paclobutrazol reduce el crecimiento es por la inhibición de la biosíntesis de las giberelinas (Dalziel y Lawrence, 1984). Interfiere con la segunda de las tres etapas de este proceso, inhibiendo la oxidación de *ent*-kaureno a ácido kaurenoico (Rademacher, 1989). Esta oxidación está catalizada por enzimas dependientes del citocromo P-450 (Graebe, 1987; Izumi *et al.*, 1985; Rademacher, 1991b). El paclobutrazol interactúa con el citocromo P-450

inhibiendo las enzimas dependientes de este sistema y, por tanto, inhibe la oxidación del karueno (Rademacher, 1997). La actividad fungicida de los triazoles se debe a que interfieren el metabolismo de los esteroides, un componente imprescindible de la pared celular en hongos (Benton y Cobb, 1997). En la planta, el paclobutrazol puede alterar los niveles de los esteroides (Burden *et al.*, 1987), lo que produce cambios que pueden implicar alteraciones en la función y estructura de la membrana celular (Haughan *et al.*, 1987) y aumentar la aclimatación a determinados estreses (Fletcher *et al.*, 2000).

Por otra parte, ha sido sugerido que el paclobutrazol afecta al metabolismo de otras fitohormonas endógenas. Se ha mencionado que el paclobutrazol aumenta la síntesis del ácido abscísico (Grossman, 1992) al reducir su catabolismo (Hauser *et al.*, 1990); dado que los niveles del ácido abscísico están asociados con la protección frente a estreses (Zeevart y Greelman, 1988), el efecto antiestrés del paclobutrazol podría efectuarse, al menos en parte, por su influencia sobre esta hormona.

Igualmente, se ha comprobado el aumento de los niveles de las citoquininas por el paclobutrazol (Fletcher y Arnold, 1986; Grossmann, 1990). Por el contrario, inhibe la producción del etileno (Graus *et al.*, 1992; Min y Bartholemew, 1996), posiblemente al inhibir la actividad ACC (1-aminociclopropano-1-carboxílico)oxidasa (Grossman *et al.*, 1994). La alteración de la biosíntesis del etileno podría afectar también a la síntesis de las poliamidas, ya que comparten un mismo precursor SAM (S-adenosilmetionina). Los triazoles pueden modificar el metabolismo de los brasinosteroides (Srivastava, 2001), compuestos que actúan de forma similar y aditivas que las giberelinas.

El paclobutrazol puede ser aplicado vía foliar o sustrato. La baja solubilidad en agua del paclobutrazol (30 ppm) facilita su entrada en la planta (Lever, 1986). Una vez dentro de la planta, se desplaza principalmente por el xilema hacia las hojas y yemas, a través del flujo de nutrientes y agua que activa la transpiración (Davis *et al.*, 1988; Intriери *et al.*, 1987; Quillan y Richardson, 1986; Wang *et al.*, 1986). Estudios recientes han demostrado que el movimiento del paclobutrazol no es exclusivo por el xilema, como se creía antes, pues se mueve también por el floema (Witchard, 1997a).

Es más efectivo cuando se aplica al sustrato, frente a la pulverización foliar (Davis *et al.*, 1998; Bañón *et al.*, 2001a; 2002; Barret y Bartuska, 1982; Goulston y Shearing, 1985). Sin embargo, en este caso, la composición del medio puede alterar su movimiento y con ello su eficacia (Barret, 1982; Klock, 1998; Lever, 1986). La movilidad del paclobutrazol en el suelo es baja y depende del movimiento del agua y

del coeficiente de adsorción de las partículas del medio (Lever, 1986). Es por ello que para una buena absorción radical se necesita que las raíces y el retardador estén localizados en la misma zona (Lever, 1986). En la planta, el paclobutrazol es catabolizado muy lentamente (Davis y Curry, 1991). Su alta resistencia a la degradación en la planta (Sterrett, 1988) limita su uso para cultivos destinados a la alimentación.

Los estudios ecotoxicológicos del paclobutrazol indican su compatibilidad con mamíferos, aves y peces, siendo relativamente poco peligroso para las abejas. Respecto a su peligrosidad general, el paclobutrazol se considera un producto irritante (Registro de Productos Fitosanitarios, 2003).

La aplicación de paclobutrazol, repercute, pues, en el comportamiento de las plantas una vez transplantadas bajo condiciones desfavorables, pues les confiere mayor tolerancia al estrés hídrico e incremento del uso del agua tanto en plántulas como en plantas adultas (van den Driessche, 1996; Watson, 2001).

En estudios realizados anteriormente con distintas especies ornamentales se pudieron comprobar disminuciones en la altura de la planta, en su biomasa, el área foliar y la transpiración en caso de *Phillyrea angustifolia* (Fernández *et al.*, 2004); mientras que en caso de *Arbutus unedo* se observaron reducciones en altura y peso seco de la parte aérea, y un aumento del diámetro de las raíces y del volumen del sistema radical (Navarro *et al.*, 2004). En ambos casos, además de estos cambios morfológicos, se produjo una disminución de la actividad estomática, lo cual, unido a las demás adaptaciones, permitió una mayor supervivencia tras el transplante.

La aplicación de paclobutrazol también confiere un aumento de la tolerancia a la salinidad. Con el uso de PBZ ha sido posible reducir el estrés salino en *Nerium oleander* y *Rhamnus alaternus*. En caso de *N. oleander*, las plantas tratadas reducían la absorción de iones Na⁺ y Cl⁻, promoviendo un proceso de ajuste osmótico mediante la acumulación de citosolutos orgánicos (Bañón *et al.*, 2005). En plantas de *R. alaternus*, la aplicación de PBZ aumentaba la conductancia estomática, la síntesis de citosolutos orgánicos, reduciendo la disponibilidad de iones en el medio (Bañón *et al.*, 2003b).

2.6. MATERIAL VEGETAL

Para proyectos de jardinería y paisajismo en zonas semiáridas es necesario utilizar plantas ornamentales adaptadas al déficit hídrico.

Últimamente se está recurriendo al uso de plantas exóticas, con mecanismos naturales de adaptación a condiciones adversas, pero un abuso de ellas puede llegar a alterar el equilibrio de ecosistemas frágiles (Kingsbury, 2004; Kotzen, 2002). Es por ello de mayor interés poder utilizar especies autóctonas de la zona mediterránea.

Estas especies autóctonas están capacitadas para adaptarse a las condiciones ambientales mediante transformaciones morfológicas y fisiológicas; aunque el grado de adaptación puede variar considerablemente incluso entre plantas taxonómicamente próximas (Sánchez-Blanco *et al.*, 2002; Torrecillas *et al.*, 2003).

Para nuestro proyecto vamos a emplear 2 especies vegetales autóctonas de la Región de Murcia, la madreselva y el mirto.

2.6.1. MADRESELVA

La madreselva es una planta perteneciente a la familia de las Caprifoliáceas, siendo su nombre científico *Lonicera implexa* Aiton. Es una planta perenne, trepadora, caducifolia y leñosa, de hasta 2,5 m. Las hojas son opuestas, las más altas están soldadas en la base, abrazando al tallo entre ambas. Las flores, muy perfumadas y de color rosa pálido a anaranjado, tienen forma de largo tubo y se agrupan en inflorescencias; florece entre mediados de primavera y mediados de verano. El fruto es una baya roja que crece formando grupos.

En la región de Murcia, dentro del género *Lonicera* se encuentran 5 especies más además de *L. implexa*: *L. etrusca*, *L. splendida*, *L. biflora*, *L. japonica* y *L. periclymenum* subsp. *hispanica*.

La madreselva puede encontrarse en bosques, matorrales, setos. Está extendida en todas las zonas templadas, siendo muy cultivada en jardines.

Es una planta de fácil cultivo. Es muy adecuada para terrazas o balcones, donde se le pueden instalar alambres para que trepe. Llega a escalar alturas de hasta cuatro metros. Crece bien en zonas ligeramente sombreadas y de clima templado, pero resiste bien las heladas. Precisa riegos regulares y se adapta con facilidad a todo tipo de suelos. Si en otoño la podamos enérgicamente, lograremos la renovación de la planta.

2.6.2. MIRTO

El mirto es una planta perteneciente a la familia de las Mirtáceas, siendo su nombre científico *Myrtus communis* L. Es un arbusto perennifolio, denso y muy ramoso, de hasta 5 m de altura. Sus hojas son coriáceas y relucientes, ovalolanceoladas, agudas y opuestas, que al restregarlas son muy aromáticas. Las flores son blancas, fragantes, con numerosos estambres. Fruto en baya, de 1 cm de largo, de color azul oscuro. Florece al final del verano y tiene frutos en época lluviosa. Se reproduce fácilmente por semilla y tiene un desarrollo lento. Las hojas, flores y frutos son ricos en un aceite aromático que es empleado en perfumería.

Se encuentra extendido por toda la región mediterránea en solanas secas y bosques de pinos. Requiere climas suaves, suelos frescos y algo húmedos, donde no haya sequía. Prefiere suelos fértiles, algo arenosos y bien drenados. Cuando estos son ricos en cal puede tener problemas de clorosis férrica, que se corrigen aumentando la proporción de arena y mantillo en el sustrato y abonando con quelatos de hierro.

Esta planta es muy famosa desde la antigüedad, donde se la consideraba el símbolo del amor y la belleza. A menudo se cultiva como ornamental, pues resiste bien la poda; empleándose para formar setos, molduras y figuras de "arte topiario", pero es muy apropiado también para setos bajos no prismáticos porque no solo las hojas sino también sus flores y posteriormente frutillos son de gran valor ornamental; también se emplea para hacer arreglos florales. Se emplea con frecuencia en proyectos de revegetación y paisajismo.