

ACADEMIA DE INGENIERÍA

LOS ÁRBOLES, PRODIGIOS DE INGENIERÍA

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. JOSÉ ALBERTO PARDOS CARRIÓN

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 29 DE ABRIL DE 2003

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. ROBERTO FERNÁNDEZ DE CALEYA Y ÁLVAREZ



MADRID MMIII

Editado por la Academia de Ingeniería
© 2003, Academia de Ingeniería
© 2003 del texto, José Alberto Pardos Carrión
ISBN: 84-95662-12-4
Depósito legal: M-19.551-2003
Impreso en España

LOS ÁRBOLES,
PRODIGIOS DE INGENIERÍA

Excelentísimo Señor Presidente,
Excelentísimos Señoras y Señores,
Señoras y Señores, queridos amigos:

Es muy grato deber para mí iniciar esta intervención con palabras de satisfacción y sentido agradecimiento al Pleno de la Academia por haberme conferido el honor de compartir con mis nuevos compañeros la distinción de Académico. Sin duda, han contemplado mi trayectoria profesional con benevolencia, en cuanto a méritos, y con confianza, que espero no defraudar, en mi capacidad de contribuir con dignidad y eficacia a mi nueva condición de Académico.

También quiero dedicar un recuerdo a mi mujer e hijos, a mis primeros maestros, y luego a mis colaboradores, en las instituciones en que ha discurrido mi quehacer profesional: la antigua Dirección General de Montes, el Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid. Sin la comprensión y apoyo de todos ellos, mi discurrir profesional no hubiera podido conducirme al momento presente.

Introducción

Mi relación profesional con la ingeniería ha discurrido por la interfase entre la ciencias de la naturaleza, a través de los carriles de la anatomía, la fisiología y la genética vegetales, y la aplicación de los conocimientos básicos derivados de estas disciplinas a las actividades profesionales tradicionalmente ejercidas por los Ingenieros de Montes a través de las ciencias forestales por antonomasia, como son la selvicultura y la ordenación de montes en su sentido más amplio.

Los primeros Ingenieros de Montes fueron un grupo de naturalistas de formación y titulación que, allá por 1850, fueron becados a Alemania para adquirir conocimientos sobre las incipientes ciencias forestales en la prestigiosa Escuela Forestal de Tharand.

A ellos les otorgó Isabel II el título de Ingenieros de Montes, titulación que quedó, así, instaurada en España. Los conocimientos derivados de su condición de naturalistas se consideraron necesarios para formar a los futuros Ingenieros de Montes en la recién creada Escuela, pero no suficientes, como tampoco lo son actualmente, sino complementarios de las disciplinas básicas de la ingeniería, al igual que sucede en el campo de la agronomía.

De hecho, la conjunción de la doble formación en los Ingenieros de Montes –naturalista e ingenieril– ha tenido brillantes representaciones en nombres como Castellarnau o Ramos Fernández, como sigue teniéndolos con los profesores Argüelles o Ruiz de la Torre, por sólo citar dos representantes de trayectorias profesionales vinculadas a campos científicos muy diferentes. Así mismo, reflejo de una mayor proyección en la vertiente naturalista han sido ilustres ingenieros como Máximo Laguna o Luis Ceballos en el ámbito de la vegetación forestal, o Gonzalo Ceballos y Manuel García de Viedma, en el de la entomología forestal. Me es, también, grato resaltar la incorporación a la tarea de creación de ciencia con proyección en la técnica y gestión forestales, como profesores de Ingeniería de Montes a prestigiosos investigadores con titulación en otras ingenierías y licenciaturas, lo que sin duda ha redundado en una mejora del tronco inicial.

La concepción naturalista que impregnaba las actuaciones profesionales de los primeros Ingenieros de Montes a su regreso de la escuela sajona de Tharand adquiere hoy, transcurridos más de ciento cincuenta años, especial actualidad ante la creciente sensibilidad social por la protección de la naturaleza. La puesta en práctica de una selvicultura próxima a la naturaleza, preconizada por Engler al comienzo del siglo xx, es esencial para el desarrollo del bosque sostenible. Un siglo después, la conservación con bases ecológicas ha pasado de ser una limitación a convertirse en objetivo principal en la gestión técnica de los ecosistemas (Pelkonen, 1999).

La ingeniería ecológica, aun trascendiendo a los ámbitos de actuación de todas las ramas de la ingeniería, adquiere especial relevancia en el manejo de los ecosistemas forestales y su práctica en la gestión técnica de los montes constituye pilar para su sostenibilidad, en conjunción armónica con la multiplicidad de usos socio-culturales y económicos del monte, en un contexto presidido por los valores éticos.

En la citada decisión de elegir a titulados en ciencias naturales para que recibieran una formación básica de ingeniería, aunque todavía en los albores de una nueva ciencia, la ecología, se debió tener muy presente que una buena parte de los materiales que como ingenieros iban a manejar y utilizar, el bioma en general y los árboles en particular, tienen la especial condición de seres vivos que, al ocupar un espacio común y formar parte de muchas veces complejas comunidades vegetales, siempre en constante cambio, exigen un tratamiento que trasciende a las propiedades físicas de los elementos materiales que conforman su estructura.

Religión, mitos, arte y árboles

En el Génesis, al narrarse la "Historia del Género Humano" y en el capítulo dedicado al Paraíso, se relata como Yahvé Dios prohíbe a Adán comer del fruto del "Árbol de la ciencia del bien y el mal". En diferentes culturas, los árboles son adorados como dioses y tenidos como sede de buenos y malos espíritus. "La condición mítica del bosque como lugar sagrado y del árbol que, con su capacidad de regenerarse periódicamente, manifiesta el poder sagrado en el orden de la vida", constituyen una constante cultural.

Así, el árbol cósmico, representado con sus raíces hacia el Cielo, y sus ramas hacia la Tierra, simboliza la condición del hombre en el mundo. Multitud de leyendas se asientan en los bosques sagrados, en los que árboles gigantes ocultan el cielo con sus copas y, a semejanza del roble de Bemberg, "responden a las preguntas de los amantes sobre la fidelidad de sus amados" (García Barreno, 1996). El árbol mágico que da título a una reciente novela del escritor alemán Peter Sloterdijk es el famoso olmo de Buzancy, que el ilustre mesmeriano Amand-Marie-Jacques de Chastenet, marqués de Puységur, utilizaba para curar a sus pacientes, a los que, con las manos entrelazadas y sujetos con cuerdas al tronco del árbol, hacía llegar sus benéficos flujos magnetopáticos (Reguera, 2001). Árboles centenarios de *Thuja applicata* del bosque de Kalaloch, en el estado de Washington, bien podrían ser las criaturas mitad árboles-mitad hombres que con sus raíces levantan el castillo del brujo Saruman en *El Señor de los Anillos* de Tolkien.

Ya en plena postmodernidad, el sentido mágico, cercano a una experiencia mística es, para la "Tree Climbing International Organization" (2002),

pasar una noche colgado de un árbol de gran altura, sintiendo como se detiene el tiempo y el árbol susurra a la pareja –se entiende que es una experiencia compartida– misteriosas palabras que genera el aire al pasar entre sus ramas y hojas.

El árbol ha sido, también, una constante en el arte a lo largo de la historia de la humanidad. El realismo de los árboles desnudos le sirve al pintor Giovanni Sasseta para resaltar el preciosismo de las vestiduras del santo en su *Tentación de San Antonio en el desierto*. Un árbol casi muerto es usado por Andrea Mantegna para acentuar el carácter trágico de su *Plegaria en el Huerto de los Olivos*. El Perugino, en su *Combate entre el amor y la castidad* se anticipa en siglos al surrealismo y representa una mujer que se transforma en árbol. La bóveda que forman las copas de los árboles en *La alameda sombreada* de Jean-Honoré Fragonard es un ejemplo de las muchas formas arquitectónicas presentes en la naturaleza. El lirismo que embriaga *El camino de los cipreses* de Van Gogh “hace temblar a la naturaleza” (Rouselot, 1974).

La poesía es también pródiga en la exaltación de los árboles. En su poema “El árbol” refleja Cernuda (*Antología Poética*, 2002) algunas de sus portentosas características:

El árbol bello dos veces centenario...
 Las poderosas ramas extendidas
 Dosel donde una sombra edénica subsiste...
 La secreta premura de la savia, ascendiendo
 Tal si fuera el latido de su propio destino...
 Ser de un mundo perfecto donde el hombre es extraño

Volúmenes y pesos, adaptabilidad e ingeniería

¿A qué se deben esa atracción y esa admiración, casi reverenciales, que generan el bosque y los árboles? Algo tendrá que ver en ello el tamaño que pueden alcanzar, las muy variadas formas que desarrollan y su muy larga vida, en ocasiones milenaria, hecha posible por su capacidad de adaptación a las siempre cambiantes condiciones ambientales.

Tres caracteres medibles en todo ser vivo –altura, biomasa y longevidad– harían figurar a los árboles en el libro *Guinness de los récords*, muy destacadamente respecto a cualquier otro organismo terrestre vivo. Los 150 m de altura asignados a un ejemplar de eucalipto (*Eucalyptus regnans*), abatido el año 1872 en Victoria (Australia), o los 26 ejemplares de secuoya (*Sequoia sempervirens*) con más de 118 m de altura, inventariados en varias reservas naturales de California; los más de 18 m de grosor para el multi-tronco que emerge poderosamente del suelo del árbol de Moctezuma o ciprés de Tula (*Taxodium mucronatum*), “La Gran Diosa Madre”, visitable en Santa María de Tula (Méjico), plantado según la leyenda hace unos 1.400 años por orden de Ehecatel, dios de las tormentas; o las 500 toneladas superadas por los nombrados “El Soltero y las Tres Gracias”, emblemáticas secuoyas (*Sequoiadendron giganteum*) habitantes del Yosemite National Park; también, los 4.600 años registrados en varios pies vivos de *Pinus longaeva*, la especie conocida que alcanza más edad (Pakenhan, 2001); todos ellos constituyen ejemplos, y no los únicos, de que los árboles dejan muy atrás, respectivamente, a los escasamente más de 6 m de altura alcanzados por una jirafa (incluso a los apenas 40 m que mide el esqueleto exhibido en el Fernbank Museum de Atlanta de un ejemplar de *Argentinosaurus*, especie de dinosaurio tenido como el animal de mayor longitud que haya existido nunca); también, al ya nada desdeñable peso de un elefante africano adulto, que apenas supera las siete toneladas, o a los 200 años en que se cifró la edad alcanzada por un ejemplar de tortuga marina (*Testudo sumeirii*) capturada en 1766 en las islas Seychelles, especie considerada como la más longeva entre las pertenecientes al reino animal (Scortecchi, 1968).

Los árboles, considerados por algunos ecólogos (Jones, 1994) como “especies ingenieras autogénicas” dada su capacidad de modular la disponibilidad de recursos para otras especies al cambiar el medio con sus propias estructuras físicas, resuelven prodigiosamente los problemas de ingeniería que les plantean su altura, su volumen y peso, y su longevidad.

La capacidad, común a todo el reino vegetal, de utilizar directamente una parte de la radiación solar para transformar la energía de una porción de su espectro en energía química a través de la fotosíntesis; y otra porción, en términos energéticos del orden de cuarenta veces mayor, para el bombeo del agua y nutrientes desde el suelo a porciones de la copa en muchos ca-

sos muy distantes, evidencia que en la evolución los árboles y el bosque han tenido que solventar auténticos problemas de ingeniería (Terradas, 2001).

En nuestro recién estrenado siglo XXI, los árboles se tienen que enfrentar, además, con los retos derivados del progresivo aumento de temperatura de la Tierra, cuya superación con éxito exigiría que estuviesen equipados con gran plasticidad fenotípica. Para su supervivencia a largo plazo, deberían contar bien con una capacidad de dispersión mayor que la velocidad del cambio ambiental (condición que los registros fósiles no parecen evidenciar que haya existido para la mayoría de las especies); o acudir a una respuesta genética mayor que dicha velocidad de cambio, condición cuyo cumplimiento no puede todavía ser avalado inequívocamente por los valores de que se dispone sobre la varianza aditiva de los caracteres más importantes. Cabe recordar que una especie arbórea con un periodo de regeneración de 25 años necesita una varianza aditiva mucho mayor que una especie anual, la cual puede responder 25 veces durante este periodo. En cualquier caso, ante un cambio climático global se vaticina la fragmentación de las especies de área continua y la configuración de poblaciones más esparcidas y pequeñas, con el consiguiente aumento de la deriva genética (Eriksson y Ekberg, 2001).

Un breve recorrido por el túnel del tiempo. Adquisición de las funciones mecánica y conductora en las plantas

La evolución de las plantas terrestres se inició en el Silúrico, hace unos 420 millones de años. En el Devónico aparecen las primeras formas arbóreas de plantas vasculares, los helechos arborescentes, que alcanzan su mayor desarrollo bajo las condiciones térmicas más suaves y la mayor humedad del Carbonífero. Sin embargo, la ramificación dicotómica de la copa no favorecía su subsistencia en el proceso de evolución de las especies y acabaron siendo substituidos en el Triásico, hace unos 248 millones de años, por las Coníferas. Tendrán que transcurrir otros 100 millones de años para que, ya en el Cretácico, hagan su aparición las Angiospermas, las primeras plantas con flores (Benton, 1995).

En su nuevo medio, las plantas requerían atender, entre otras, a dos nuevas funciones: una, mecánica, derivada de la necesidad de soportar cargas,

estáticas y dinámicas; y otra, hidráulica, para llevar a cabo los procesos de absorción de agua del suelo y su transporte, en equilibrio con su evaporación a la atmósfera. El cumplimiento de estas funciones, junto con la necesidad de hacer compatible el intercambio gaseoso a que obliga su nutrición primaria (la absorción del dióxido de carbono atmosférico) con la mínima pérdida de agua transpiratoria, son interpretados como un importante motor evolutivo en la formación de las estructuras que hacen posible dicha nutrición (Niklas, 1993).

A falta del esqueleto propio de los animales superiores, la pared celular cumple en las plantas la función de soportar cargas; pero restringe su movilidad y confiere al cuerpo de las plantas una rigidez que no les ha permitido evolucionar hacia el desarrollo de un mecanismo de bombeo de líquidos nutricios como la sangre por nuestro corazón. No obstante, han solucionado el problema del transporte de líquidos a gran distancia poniendo en juego mecanismos físico-químicos.

Las enormes tensiones de tracción que son capaces de soportar las finísimas microfibrillas de celulosa que se integran en la pared celular y la capacidad de resistencia a tensiones de compresión que le confieren sus otros componentes mayoritarios, principalmente la lignina, –auténticos “áridos orgánicos” en que quedan embutidas aquellas a modo de redondos de acero–, hacen de la pared celular, invento existente en el mundo vegetal, un hormigón armado capaz de resistir fuertes cargas tanto de tracción como de compresión (Wardrop, 1981). Propiedades que permiten a los árboles resolver con un alto grado de perfección y eficacia, dos de los retos con los que se enfrentan cuanto más edad adquieren: soportar mayores cargas y alcanzar alturas considerables.

Al dotar a las microfibrillas de celulosa de la pared celular de resistencia a la tracción, se permitió a las plantas soportar altas presiones de turgencia que, en su ausencia, en un medio acuoso como es el existente en la célula vegetal, la harían reventar.

En el aire, las plantas tuvieron que enfrentarse con la gravedad y mantener la estabilidad frente a sollicitaciones de compresión y de flexión, funciones para las que no era útil la celulosa. Entonces incorporaron la lignina. Sin ella, las plantas apenas podrían alcanzar medio metro de altura, pues

no serían capaces de resistir, ni siquiera, los esfuerzos generados por su propio peso. La lignificación confirió capacidad de resistencia a la compresión y a la flexión, permitiendo plantas de mucha mayor altura y la existencia de copas extendidas horizontalmente (Niklas, 1992).

Asimismo, la presencia de la lignina hizo posible un novedoso sistema de transporte de agua al estabilizar las células conductoras frente a un posible colapso ante las tensiones generadas. El sistema permite el transporte de agua en recorridos que, desde los ápices radicales a los caulinares, superan los 200 m en algunas de las especies antes mencionadas.

Ambas propiedades, la conformación hidráulica, que posibilita un eficaz transporte de agua a los puntos más distantes de la copa, y la capacidad de soportar ingentes y variables cargas, constituyen un buen referente para las obras humanas de ingeniería, en las que el hombre es, en definitiva, un imitador de la naturaleza.

Crecimiento y capacidad de adaptación al medio ("estrés mecánico")

Un tejido embrionario (el cambium) capaz de dividirse y producir células a lo largo de toda la vida de un árbol, da lugar a la formación de anillos anuales concéntricos que constituyen la madera del tronco, ramas y raíces leñosas de los árboles, haciendo posible que el tronco, al crecer en altura y diámetro, sea capaz de soportar el aumento progresivo de biomasa, así como las tensiones derivadas de las cargas debidas a la acción de agentes atmosféricos –peso de la nieve sobre las copas, fuerza del viento– y de la propia topografía del lugar. Los árboles van adaptando sus estructuras anatómicas resistentes y conductoras a sus necesidades, modificando el grosor de los anillos de crecimiento, así como la forma y dimensiones de sus células y, sobre todo, la estructura interna de las paredes de las nuevas células (Savidge, 1996).

Nos resulta familiar y hasta nos parece obvio, que el hábito natural de los árboles sea crecer en vertical, y cualquier estudiante de biología vegetal nos diría que lo hacen porque el crecimiento del tallo tiene un gravitropismo negativo, lo cual es cierto. Pero cuando ese hábito natural es alterado

por la exposición a fuertes vientos o a deslizamientos del suelo, el tronco se inclina y el árbol reacciona “autoapuntalándose” para evitar su desplome, y lo hace modificando su patrón de crecimiento y desarrollando una madera de reacción que le sirve para reorientar su eje principal o tronco, estabilizar su estructura y evitar que siga inclinándose más.

El cambium responde a la distribución asimétrica de las fuerzas generadas por el efecto ladera con la formación de troncos y ramas excéntricos. En las ramas, que funcionan como voladizos, se producen momentos de flexión que generan tensiones. En las gimnospermas, estas tensiones se soportan mediante la formación de anillos de crecimiento más anchos en la parte inferior de las ramas. Sus células, sometidas a compresión, desarrollan una pared secundaria más gruesa, con más lignina (en suma, más hormigón), menos celulosa y grandes espacios intercelulares. La situación en frondosas se invierte: las tensiones de flexión son soportadas por fibras gelatinosas, que trabajan a tracción, con paredes poco lignificadas, que configuran anillos de crecimiento más anchos en su porción superior (Robards, 1969; Timmell, 1987).

Dos hipótesis tratan de explicar las singularidades del crecimiento en la madera de reacción. Según una de ellas, el hinchamiento de la lignina, depositada a modo de cemento entre las microfibrillas de celulosa de la pared celular, es la causa de su expansión lateral, lo que teniendo en cuenta la naturaleza elástica de la pared, origina un estado tensional de contracción longitudinal. (Boyd, 1985).

Otro grupo de investigadores sostienen que las singularidades del crecimiento tienen su origen en la naturaleza contráctil de la celulosa, y que el aumento de lignina producido en la madera de compresión sólo sirve para unir con más fuerza la estructura celulósica, dando mayor resistencia a la compresión y ejerciendo el papel de vehículo transmisor de la tensión a través de la madera. El considerable aumento del ángulo de las microfibrillas de celulosa que configuran la denominada capa S2 de la pared celular en la madera de compresión ha conducido a sugerir que dichas microfibrillas actúan como muelles helicoidales, con similitud estructural con los muelles mecánicos usados en los sistemas de suspensión de vehículos. Y, al igual que éstos se encuentran encajados en un cilindro que evita su expansión lateral, la citada capa S2 se encuentra encajada en la capa S1, que

le proporciona el adecuado soporte lateral para resistir la estructura de muelle comprimido. Las formas redondeadas que se ven al microscopio, con pérdida del contorno poligonal característico de las células de la madera de gimnospermas normal, apoya el modelo de muelles helicoidales. El modelo que asume el comportamiento de las microfibrillas de celulosa como muelles con capacidad de encogerse o estirarse es considerado como la base de la naturaleza elástica de los árboles, permitiendo a los tallos jóvenes recuperar su posición con independencia de la dirección en la que actúe la fuerza a que estén sometidos (Bamber, 1987, 2001).

También, una singular adaptación a la acción del viento muestran las raíces de los individuos vetustos para mejorar su sistema de anclaje. En las raíces secundarias de las coníferas, en la zona próxima a su inserción, los anillos de crecimiento son excéntricos, con mayor grosor en su porción superior, lo contrario que sucedía en el tallo, asemejándose el perfil al de una viga en T, mayormente a sotavento. Distalmente del eje del árbol, sobre todo a barlovento, las raíces presentan secciones más ovoides, con anillos de crecimiento más gruesos en su porción superior e inferior, comportándose como una viga en doble T, lo que permite al árbol resistir mejor la flexión. Estas adaptaciones mejoran la rigidez de la placa "suelo-raíces" y aumentan la longitud del brazo de palanca, lo que permite contrarrestar la acción del viento conforme el árbol va creciendo y aumentar su resistencia a ser derribado. Estas estructuras resisten a compresión; por el contrario, en las frondosas los engrosamientos se producen a barlovento y resisten a tracción (Nicoll y Ray, 1996).

Otras adaptaciones de los sistemas radicales, presentes en especies arbóreas del trópico húmedo, son las costillas que, en suelos poco profundos y con capa freática alta (circunstancias que propician sistemas radicales muy superficiales) emergen de la zona basal del tronco sirviendo de plataforma estabilizadora. Estas costillas se desarrollan sobre todo en el lado opuesto al de inclinación del árbol y están caracterizadas por la presencia de fibras de pared gruesa que resisten a tracción, a modo de tirantes que sujetan el árbol. Reducen, asimismo, el riesgo de que se tronche el tronco por su base, de forma especial en las especies de maderas ligeras (Ter Steege et al, 1997).

La formación de estas estructuras muestra que los árboles en su crecimiento se adaptan espontáneamente –"sin necesidad de recurrir a cálcu-

los matemáticos” – a las singularidades del medio economizando material y concentrándolo en las zonas en las que se producen mayores solicitaciones, fieles al principio de que la materia tiende a asumir la geometría que minimiza energía.

Para la justificación de las adaptaciones de los sistemas radicales al viento se han desarrollado modelos aeroelásticos de los árboles en los que se simula el comportamiento de las plantaciones en túneles de viento. La ingeniería (en este caso de los hombres) contribuye, así, al conocimiento de la biomecánica de los árboles; también lo hace la mecánica clásica al analizar los árboles como sistemas de vibración expuestos a las excitaciones aleatorias debidas a la turbulencia provocada por el viento (Wood, 1995).

Estructura hidráulica de los árboles

El sistema hidráulico de los árboles se considera formado por una compleja red de “tuberías”, imaginando que un árbol, a efectos de conducción del agua, está constituido por muchas plantas, con tallos altos, delgados y unidos en manojos, cuyo diámetro tiende a aumentar desde las ramas al tronco y raíces (Shinozaki et al, 1964).

Ya Leonardo da Vinci, en su cuaderno de notas sobre “la construcción de los árboles” (Richter, 1970) señaló que “a cualquier altura, la suma de las secciones de las ramas en que se bifurca el tronco iguala a la de éste” y que “los cursos de agua por aquellas, si tienen lugar con la misma rapidez, igualan al principal”. Actualmente se considera que la ramificación en árboles tiene carácter fractal, siendo el exponente con que se expresa la superficie de ramas y tronco una dimensión fractal, con un valor cercano al dos, valor presumido por da Vinci. Un salto de siglos conduce a dar un paso conceptual considerable al relacionar la sección conductora de tronco y ramas con el peso fresco de las hojas a las que suministra.

Asimismo, se han desarrollado modelos que integran la hidrodinámica, la biomecánica y la geometría de la copa, basados en la aplicación de una teoría de distribución de recursos a través de una red de distribución jerárquica, considerando una arquitectura fractal de la copa. Los modelos responden a los requerimientos de una ley alométrica propuesta en fisiología

animal, la "ley del cuarto poder", según la cual las características morfológicas y anatómicas cambian en función del tamaño del organismo.

En los árboles, los conductos del xilema se estrechan de modo que el flujo de agua y la conductancia hidráulica por conducto son independientes del recorrido total y del tamaño de la planta. Esto resuelve el problema de evitar que, hasta cierto límite, la resistencia hidráulica aumente con la distancia; permite que las plantas hayan evolucionado hacia estructuras verticales y explica el valor de la altura máxima alcanzada por los árboles (West et al, 1999). No obstante, aunque los modelos son útiles para entender cambios interespecíficos, no predicen con la suficiente exactitud los sutiles cambios ontogénicos y se ha postulado que los cambios en el tamaño del árbol pueden conducir a un "trueque entre el suministro óptimo de agua para atender a la superficie foliar y el coste de mantenimiento del tejido conductor del agua" (Mencuccini, 2002).

Durante los primeros 300 millones de años de su condición de terrícolas, fueron las traqueidas los únicos elementos especializados en la conducción de agua; y sólo, al aparecer las plantas con flores, se separaron en el xilema de las angiospermas las funciones conductoras, llevadas a cabo por los vasos, de las funciones de soporte mecánico, con implicación de las fibras (Baas, 1982).

La mayor eficiencia hidráulica de los conductos anchos frente a los más estrechos ha hecho que las fuerzas selectivas hayan favorecido a los primeros. Sin embargo, existe un amplio intervalo de valores entre las 500 micras de diámetro de los vasos más anchos de la madera temprana de diversas frondosas y las 10 micras que sólo alcanzan las traqueidas de las gimnospermas. El límite superior no está marcado por la pérdida de resistencia mecánica que podrían acarrear los conductos más anchos, pues siempre cabría mantener unos pocos conductos muy anchos con los que conseguir una conductancia hidráulica grande, rodeados de un abundante número de fibras como elementos de sostén, a fin de maximizar los ratios módulo de Young a densidad, y tensión de rotura a densidad; y hacer posible que los árboles, al crecer verticalmente, lo hagan sin doblarse o romperse (Niklas, 1993). El límite inferior del diámetro de los conductos viene impuesto por el ahorro en la inversión del carbono que se requiere para producir un número mayor de conductos estrechos con la misma capacidad hidráulica que un número menor de conductos más anchos.

La estrategia evolutiva ha desembocado en un compromiso entre eficiencia hidráulica, en combinación con un cierto grado de protección ante la pérdida de la función conductora, y resistencia mecánica. Para conseguirlo, se combinan conductos grandes y pequeños, ajustándose a la ecología de la estación. Temperaturas suaves y ambientes húmedos favorecen las especies en que predominan los vasos anchos, mientras que el frío y la sequía propician las especies con conductos estrechos (Tyree et al, 1994).

Por otra parte, los elementos traqueales no son continuos desde las raíces a las hojas: en las coníferas, las traqueidas más largas no superan los 3 mm de longitud, de modo que se necesitan más de 300 por metro de recorrido, estimándose que la mitad de la pérdida de carga que se produce en el recorrido se origina en el paso de la membrana que cubre los poros (punteaduras) que las conectan entre sí. Los vasos de las frondosas pueden alcanzar hasta 10 m de longitud, el ensamblaje de los elementos de los vasos se asemeja más al de los de una tubería, y en ellos la mayor caída de presión se produce en el lumen. Además, los vasos ni siquiera son rectilíneos, presentan formas curvilíneas, lo que permite que, en su recorrido, vasos próximos tengan zonas de contacto entre sí; en la cuales, a través de las punteaduras puede moverse el agua de un vaso a otro. Ello, además de hacer posible cubrir las grandes distancias entre los extremos de las raíces y los ápices caulinares, muy superiores a la longitud de los vasos más largos, constituye un sistema de seguridad del sistema conductor, pues entraña la posibilidad de que el agua pase de un conducto al contiguo, evitando que cualquier alteración que impida el normal funcionamiento de un elemento de un vaso afecte irreversiblemente al sistema en su conjunto (Zimmermann, 1982).

La versatilidad y estructura del sistema conductor aseguran la llegada de agua a todas las partes de la copa gracias a la conjunción de dos sistemas que concurren en los árboles. El agua que llega a una determinada porción de la copa procede de la suministrada a la vez por varias raíces y, asimismo, una raíz puede suministrar agua a varias porciones de la copa, estableciéndose conexiones que varían en el tiempo. Ello supone un cierto trato igualatorio en el suministro de agua (Zimmermann y Brown, 1971). Por si ello fuera poco, se pone también en juego un mecanismo de compensación de las diferencias en la pérdida de carga del caudal de agua entre puntos de la copa del árbol, dadas las diferentes distancias que los

separan de su base. Se admite que, a igualdad de tasa de transpiración, las hojas de las ramas más bajas están sometidas a presiones menores que las situadas en las ramas más apicales, haciendo posible que sus estomas se cierren antes en respuesta a esa menor presión y, en consecuencia, les llegue menos agua.

Por tanto, el diseño hidráulico del árbol favorece a las hojas de la porción apical, las más importantes para su supervivencia, pero también las situadas en posición más desfavorable, por estar más alejadas del sistema radical. A ello se suma el menor diámetro de los elementos conductores de las ramas laterales, lo que impide que éstas tomen agua a expensas de las ramas principales y éstas lo hagan del tronco. Esta segmentación del árbol constituye un instrumento de seguridad. Si la presión desciende a niveles letales, sus efectos nocivos afectan primero a las hojas, que acaban marchitándose. El aumento del estrés hídrico afecta después a las ramillas e incluso a las ramas mayores, y sólo si el estrés fuera muy agudo quedarían afectados el tronco del árbol y la porción apical de la copa, los elementos más importantes en términos de supervivencia. Esta arquitectura de copa ha permitido sobrevivir con éxito en la evolución a las especies arbóreas actuales, frente a las que poseían ramificación dicotómica que, menos protegidas en términos hidráulicos, se han extinguido (Tyree y Zimmermann, 2002).

Bombeo y movimiento del agua

¿Qué fuerzas impulsan el agua por esta extensa y compleja red hidráulica? El agua (la savia) se mueve por el tronco y ramas por flujo en masa, cubriendo distancias de decenas de metros, más de un centenar en algunos casos, en tiempos de algunas horas, variables en función tanto del diámetro de las tuberías conductoras (los vasos y traqueidas del xilema) como de la presión a que está sometida el agua; en este caso, la succión provocada en el proceso de pérdida de agua por la transpiración de las hojas de la planta. También, aunque con escasa contribución en términos cuantitativos al movimiento del agua en los árboles, y sólo importante al final del invierno en especies caducifolias antes de la salida de las hojas, la savia asciende por el tronco del árbol impulsada por una presión positiva generada en las propias raíces por un proceso de ósmosis (Taiz y Zeiger, 1998).

Las estimaciones hechas conducen a afirmar que el agua tardaría un siglo en alcanzar la copa, no ya de una gran secuoya, sino la de un fresno o un sauce que apenas superase los 10 m de altura, si al moverse por el xilema sólo obedeciera a las leyes de la difusión. Esta forma de movimiento sólo es utilizable para recorridos muy cortos, entre células vivas contiguas, propias de los tejidos de parénquima, en las que el agua se mueve por diferencias de potencial osmótico (Kozlowski y Pallardy, 1997).

Una importante contribución al conocimiento de las relaciones hídricas en las plantas ha sido tratar el movimiento del agua desde el suelo a las raíces, en el interior de la planta y desde ésta a la atmósfera, como una serie de procesos interrelacionados, que tiene su expresión en el denominado continuum suelo-planta-atmósfera. Ello permite tratar el movimiento del agua en el sistema a semejanza de una corriente eléctrica y ser formulado como un análogo de la ley de Ohm, expresándose el flujo de agua en cada una de las porciones del recorrido por el cociente entre la energía que genera el movimiento, en suma la diferencia de potencial hídrico entre ambos extremos de cada tramo de la "tubería" y la resistencia que ésta ofrece (Philip, 1966).

Teóricamente, el concepto de continuum permite modelizar el movimiento del agua y en su caso llegar a predecir el comportamiento de la planta bajo un cierto intervalo de condiciones ambientales, que afectarán de diferente forma a los distintos tramos de la conducción. Al secarse el suelo y faltar, o reducirse, el aporte de agua a la planta, aumentará la resistencia del flujo de agua a las raíces, mientras que un aumento del déficit del vapor de agua en la atmósfera, podrá favorecer la transpiración y, en consecuencia, aumentar el flujo de agua transportada. En suma, el suministro de agua, la fuerza que genera su movimiento y la resistencia al mismo, que supone en definitiva una pérdida de carga, son tres elementos substanciales en el proceso, de forma análoga a como sucede en el transporte de agua por una tubería desde un depósito. En realidad, esta concepción entraña una cierta simplificación, pues asume un estado de equilibrio, que raramente existe en las plantas. No obstante, se han desarrollado modelos que incorporan datos de mediciones de la conductancia y del agua almacenada hechas a lo largo de sucesivas porciones del recorrido hidráulico en el eje del árbol, y que proporcionan valores simulados de potencial, con una buena correspondencia con los valores realmente medidos (Tyree, 1988; Whitehead y Hinckley, 1991).

Aun así, en ocasiones, el continuum se rompe por escasez de agua disponible o por efecto de temperaturas muy bajas, y los conductos xilemáticos cavitan y se embolizan. Si tal sucede durante el período vegetativo, se interrumpe temporalmente el suministro de agua por los conductos dañados; pero la compleja estructura hidráulica del árbol facilita el transporte de agua por otros conductos no dañados; o, incluso, se recuperan de la embolia al equilibrarse nocturnamente su potencial hídrico con el del suelo (Tyree y Sperry, 1989).

El embolismo se repite anualmente con las primeras heladas en los conductos de mayor lumen, acusadamente en las especies de poros en anillos; y hasta que se forman nuevos elementos conductores para atender la demanda de las hojas, el árbol recurre a los formados al final del período vegetativo anterior, más estrechos y por tanto con menor capacidad conductora, pero menos proclives a daños por temperaturas bajas. En todo caso, unos y otros, con el paso del tiempo, van perdiendo su función conductora y sufren un complejo proceso de duraminización, con la consiguiente impregnación de polifenoles y otros extractivos que confieren a la porción más interna del tronco –el corazón de la madera– una mayor capacidad de resistencia ante patógenos y de resistencia mecánica para soportar el progresivo aumento de cargas a que está sometido el árbol. Merced a este proceso de senescencia del xilema podemos disfrutar de la calidad y belleza de las maderas nobles.

En árboles adultos, en rodales forestales en monte, la respuesta a la sequía difiere de la obtenida en experimentos con plantas jóvenes o en ensayos de corta duración, lo que añade complejidad al problema y de alguna forma cuestiona los resultados derivados de estos últimos. A tales efectos, se ha sugerido la existencia en las masas arboladas de mecanismos homeostáticos que permiten mantener valores de potencial hídrico al mediodía dentro de un intervalo de seguridad, evitando la irrupción de un ciclo de retroalimentación positiva con disminución de potenciales hídricos y conductividades en el xilema que, eventualmente, supondrían la muerte y pérdida de hojas (Tyree y Sperry, 1988).

La base funcional del comportamiento isohídrico no se ha elucidado. Se ha propuesto (Tardieu y Simmonneau, 1998) que podía derivarse de la interacción de una señal originada en las raíces y el status hídrico de las ho-

jas, modulándose la respuesta estomática a la falta de agua en el suelo con la intervención de un mensajero químico, posiblemente ácido abscísico. A largo plazo, el mantenimiento de potenciales hídricos implicaría una aclimatación estructural, en la que participarían el intercambio de gases entre hojas y atmósfera y la arquitectura hidráulica del árbol (Cinnirella et al, 2002). Al mantenimiento de un alto grado de homeóstasis funcional se añadiría la capacidad del árbol de producir cambios en el reparto de carbono y en consecuencia del crecimiento entre sus diversos órganos frente a la sequía: el efecto de la sequía se trasluce más en la reducción de la producción de hojas, en especial en coníferas, que en el crecimiento del tronco, aunque el reparto de carbono de las hojas al tronco sólo se manifiesta al cabo de varios años, lo que revela la lenta dinámica de aclimatación de los árboles (Irvine et al, 1998) .

Asignación de recursos, biomasa, altura máxima y capacidad hidráulica versus edad

La gran variabilidad de formas, tamaños y longevidad que ofrecen las especies arbóreas refleja su adaptación a los lugares de habitación merced a una estratégica asignación de recursos, regulada por complejas relaciones fuente-sumidero y favorecida por su condición de organismos modulares, organizados en subunidades morfológicas repetitivas, que se originan en meristemas únicos y se combinan en niveles superiores de organización (Harper y White, 1974).

La altura final alcanzada por las especies arbóreas se considera más relacionada con su longevidad que con la tasa anual de crecimiento o el tipo de tallo producido (Kozlowski, 1971). Así, en general, las especies consideradas de crecimiento rápido, p. e. los chopos, presentan alta tasa de crecimiento, no alcanzan gran altura, su madera es blanda y son poco longevas. Por el contrario, las especies clasificadas como de crecimiento lento alcanzan, por lo general, alturas más elevadas y muchas de ellas viven más años y presentan maderas más duras. La longevidad está relacionada positivamente con la capacidad de producir abundante biomasa leñosa de alto peso específico, con una menor relación de madera temprana a madera tardía en los anillos de crecimiento, favorable a soportar mayores cargas y durante períodos más prolongados (Zobel y van Buijtenen, 1989).

No obstante, como contrapunto, la habitación en lugares con ecología muy restrictiva para el crecimiento va ligada a especies de muy larga vida, como sucede con el citado *Pinus longaeva*. Su estructura modular hace posible la asignación de los escasos recursos de que dispone a una supervivencia milenaria con un crecimiento aparentemente anárquico, tanto en el espacio como en el tiempo, que da lugar al desarrollo de árboles de altura moderada, con troncos gruesos y deformes en la senectud, con copas retorcidas, en las que se muestran simultáneamente signos de vida y de muerte, en suma, estructuras construidas para resistir.

Cabe preguntarse si la altura máxima alcanzada por los árboles no sería mayor si vivieran más años; y en el caso de que así fuera, si el agua podría alcanzar el extremo apical del tallo. La tensión originada por un potencial hídrico de la atmósfera de -3 MPa basta para soportar una columna de agua de casi 300 m de altura. Por otra parte, si se considera un gradiente de potencial hídrico de $0,015$ MPa \cdot m $^{-1}$, valor medio para especies arbóreas (Kozłowski y Pallardy, 1997), el agua podría llegar a 200 m, altura que, no obstante, no es alcanzada por especie viviente alguna.

Datos experimentales apoyan que las constricciones hidráulicas impuestas por la estructura de los elementos conductores hacen que la conductancia hidráulica en su conjunto disminuya sobrepasada la madurez del árbol, lo que se ha considerado la causa principal del cese del crecimiento en altura y de la producción de madera en los árboles (Ryan y Yoder, 1997). A ello se une la declinación de la capacidad fotosintética foliar con la altura, que constituiría un freno adicional a un mayor crecimiento (Ninemets, 2002).

La hipótesis de la limitación hidráulica de la altura de los árboles ha sido, sin embargo, puesta en entredicho si se asume el modelo que predice la existencia de un equilibrio homeostático entre la capacidad de transporte (dependiente de la superficie de la sección de la albura y la permeabilidad) y la demanda transpiratoria; de modo que los efectos negativos derivados de un largo recorrido del agua podrían compensarse en el caso de que ello reportase alguna ventaja para el árbol. Así, cuando el crecimiento en altura dejase de ofrecer una ventaja en términos de competencia (para evitar la sombra de pies contiguos), el reparto de recursos se ajustaría a favorecer la supervivencia y la reproducción, y no necesariamente la producción de madera (Becker et al, 2000).

En suma, la altura de los árboles puede estar constreñida por limitaciones físicas y genéticas; y no es previsible que en el marco de los genotipos existentes se expresen fenotipos que superen en altura los valores máximos conocidos (Day et al, 2002), pudiéndose afirmar que los actuales gigantes arbóreos han alcanzado su techo como "estructuras funcionalmente viables".

Reflexión final

Los 200 m de altura y las 500 toneladas de biomasa "que pueden alcanzar los árboles" se quedan, sin embargo, muy atrás en comparación con los 520 m de altura, los 320.000 m³ de hormigón y las 200.000 toneladas de acero, cifras que según Google.com se utilizaron en la construcción de la gran obra de ingeniería y arquitectura que fueron las trágicamente destruidas World Trade Center Towers de Nueva York. Todo ello no obsta para que la magnificencia de los árboles, su compleja y duradera estructura en perfecto diseño para las funciones que inexorablemente desempeñan, y su larga vida con la que desafían al tiempo, en conjunción con el misterio que los rodea, la belleza que muestran, el arte que inspiran, los hagan acreedores de ser considerados prodigios de ingeniería.

Es más, si hiciéramos nuestras las palabras del neodarwinista y filósofo de la ciencia Daniel Dennett (1995), más allá de los árboles cabría afirmar que "la vida, la inteligencia, el lenguaje, el arte y, a la larga, también la conciencia, no son, en definitiva, sino un problema de ingeniería".

Muchas gracias.

Referencias

- Baas, P., 1982. "Systematic, phylogenetic and ecological wood anatomy-history and perspectives". En: *New perspectives in wood anatomy*. Ed. P. Baas, Martinus Nijhoff/Dr Junk Publ., pp 23- 58.
- Bamber, R. K., 1987. *The origin of growth stresses: a rebuttal*. IAWA Bull.n.s. 8: 80-84.
- Bamber, R. K., 2001. *A general theory for the origin of growth stresses in reaction wood: how trees stay upright*. IAWA J. vol 2283: 205-216.
- Becker, P., Meinzer, F. C., Wullschlegel, S. D., 2000. "Hydraulic limitation of tree height: a critic". *Functional Ecology* 14: 4-11.
- Benton, M. J., 1995. "Diversification and extinction in the history of life". *Science* 268: 52-58.
- Boyd, J. D. 1985. *The key factor in growth stress generation in trees. Lignification or crystalization*. IAWA Bull.n.s. 6:139-150.
- Cernuda, L. 2002. *Antología poética*. Colección Austral, pp 389.
- Cinnirella, S., Magnani, F., Saracino, A., Borghetti, M. 2002. "Response of a mature *Pinus laricio* plantation to a three-year restriction of water supply: structural and functional acclimation to drought". *Tree Physiol.* 22(1): 21-30.
- Day, M. E., Greenwood, M. S., Díaz Sala, C. 2002. "Age- and size-related trends in woody plant shoot development: regulatory pathways and evidence for genetic control". *Tree Physiol.* 22: 507- 513.
- Dennett, D. C., 1995. *Darwin's dangerous idea: evolution and the meanings of life*. Simon and Schuster, Nueva York.
- Eriksson, G. Ekberg, I. 2001. *An Introduction to Forest Genetics*. Department of Forest Genetics, Swedish University of Agricultural Sciences, pp 166.
- García Barreno, P., 1996. *Mitología de los bosques*. El Campo, 134: 29-47.
- Harper, J. L., White, J. 1974. "The demography of plants". *Ann. Rev. Ecol. Systems.* 5: 419- 463.
- Irvine, J., Perks, M. P., Magnani, F. Grace, J. 1998. "The response of *Pinus sylvestris* to drought: stomatal control of transpiration and hydraulic conductance". *Tree Physiol.* 18: 393-402.
- Jones. C. G., Lawton, J. H., Shachack, M., 1994. *Organisms as ecosystem engineers*. *Oikos* 69: 373- 386.
- Kozłowski, T.T., 1971. *Growth and development of trees*. Vol. I. Academic Press, pp 443.
- Kozłowski, T.T., Pallardy, S. G. 1997. *Physiology of Woody Plants*. Academic Press, 2nd ed., pp 411.
- Mencuccini, M., 2002. "Hydraulic constraints in the functional scaling of tree". *Tree Physiol.* 22: 553-565.
- Nicoll, B. C., Ray, D. 1996. "Adaptive growth of tree root systems in response to wind: action and site conditions". *Tree Physiol.* 16: 891-898.
- Niklas, K. J., 1992. *Plant Biomechanics*. Univ. of Chicago Press, Chicago.
- Niklas, K. J., 1993. "The scaling of plant height: A comparison among major plant classes and anatomical grades". *Ann. Bot.* 72:165-172.
- Niinemets, Ü., 2002. "Stomatal conductance alone does not explain the decline in foliar photosynthetic rates with increasing tree age and size in *Picea abies* and *Pinus*

sylvestris". *Tree Physiol.* 22: 515- 535.

- Philip, J. R., 1966. "Plant water relations: Some physical aspects". *Ann. Rev. Plant Physiol.* 17: 245- 268.
- Pakenham, T. 2001. *Remarkable Trees of the World*. Weidenfeld & Nicolson, London, pp 192.
- Pelkonen, P. et al (edit.), 1999. *Forestry in Changing Societies in Europe*. Part I. pp 82, University Press.
- Reguera, I. 2001. "Ilustración magnética". *Babelia, El País*, pp 1.
- Richter, J. P., 1970. *The notebooks of Leonardo da Vinci (1452-1519), compiled and edited from the original manuscripts*. Dover, Nueva York.
- Robards, A. W., 1969. *The effect of gravity on the formation of wood*. *Sci. Prog. Oxf.* 57, 513-532.
- Rouselot, J., 1974. *La naturaleza en el arte*. Edit. Argos, Barcelona, pp 334.
- Ryan, M.G, Yoder, B.J., 1997. "Hydraulic limits to tree height and tree growth". *Bioscience* 47(4): 235- 242.
- Savidge, R.A., 1996. *Xylogenesis, genetic and environmental regulation. A review*. *IAWA J.* 17(3): 269-310.
- Scortecchi, G., 1968. *Los animales*. Vol. I, Edit. Vergara, pp 639.
- Shinozaki, T., K. Yoda, K. Hozumi, Kira, T. 1964. "A quantitative analysis of plant form: The pipe model theory I". *Basic Analyses*. Japón. *J. Ecol.* 14: 97-105.
- Taiz, L., Zeiger, E., 1998. *Plant Physiology*. The Benjamin/ Cummings Publ. Co., pp 792.
- Tardieu, F., Simmonneau, T. 1998, "Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours". *J. Exp. Bot.* 49: 419-432.
- Ter Steege, H., Ter Welle, B. J. H., Laming, P. B. 1997. *The possible function of buttresses in "Caryocar nucciferum" in Guayana: ecological and wood anatomical observations*. *IAWA J.* 18(4): 415- 432.
- Terradas, J., 2001. *Ecología de la vegetación*. Omega, pp 703.
- Timell, T. E., 1985. *Compression wood in gymnosperms*. Vol. 3., Springer- Verlag, pp 337.
- *Tree Climbers International Inc*, 2002. Página web: www.treeclimbing.com
- Tyree, M. T., 1988. "A dynamic model for water flow in a single tree: evidence that models account for hydraulic architecture". *Tree Physiol.* 4: 195- 217.
- Tyree, M. T., Sperry, J. S. 1988. "Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress?" *Plant Physiol.* 88: 574-580.
- Tyree, M. T., Sperry, J. S. 1989. "Vulnerability of xylem to cavitation and embolism." *Ann. Rev. Plant Phys. Mol. Biol.* 40: 19-38.
- Tyree. M. T., Davis, S. D., Cochard, H. 1994. *Biophysical perspectives of xylem evolution: is there a tradeoff of hydraulic efficiency for vulnerability to dysfunction?* *IAWA J.* 15(4): 335- 360.
- Tyree, M. T., Zimmermann, M. H. 2002. *Xylem Structure and the Ascent of Sap*. 2nd edition. Springer- Verlag, pp 286.
- Wardrop, A. B., 1981. "Lignification and Xylogenesis". En: J. R. Barnett, edit., *Xylem Cell Development*, Castle House Publ. Ltd, pp 115-152.
- West, G. B., Brown, J. H., Enquist, B. J. 1999. "A general model for the structure and allometry of plant vascular system". *Nature* 400: 664-667.

- Whitehead, D., Hinckley, T. M. 1991. "Models of water flux through forest stands: critical leaf and stand parameters". *Tree Physiol.* 9: 35- 57.
- Wood , C. J., 1995. "Understanding wind forces in tress". En *Wind and Trees*, Eds.: M. P. Coutts y J. Grace. Cambridge Univ. Press, pp 133-164.
- Young, T. P., Perkocha, V. 1994. "Crown assimetry, treefalls and repart disturbance of broad-leaved forest gaps". *J. Ecol.* 82:318-324.
- Zimmermann, M. H., Brown, C. L. 1971. *Trees. Structure and Function*. Springer-Verlag, pp 336.
- Zimmermann, M. H., 1982. "Functional Anatomy of Angiosperm Trees". En: *New Perspectives in Wood Anatomy*. Ed.: P. Baas. Martinus Nijhoff/ Dr Junk Publ., pp 59-70.
- Zobel, B. J., van Buijtenen, J. P. 1989. *Wood variation: its causes and control*. Springer-Verlag, pp 363.

CONTESTACIÓN

EXCMO. SR. D. ROBERTO
FERNÁNDEZ DE CALEYA Y ÁLVAREZ

Excmo. Sr. Presidente,
Excelentísimos Señoras y Señores,
Señoras y Señores, queridos amigos:

Gracias Presidente, gracias queridos compañeros de Corporación, por haberme encomendado el ser hoy, lo que para mí es un lujo, la voz de la Academia en la respuesta al brillante discurso de ingreso en nuestra Casa del nuevo Académico José Alberto Pardos Carrión.

La antigüedad se adquiere por el paso de los años; la vejez es inexorablemente reconocida, entre otras señales, por el propio carnet de identidad. Permítanme que remontándome a una época situada entre lo antiguo y lo viejo, les dé unas pocas pinceladas biográficas sobre José Alberto Pardos.

Conocí a José Alberto hace veinticinco años. Yo era un recién llegado de una estancia en la Universidad de California donde había estado interesado por la fisiología vegetal y, más concretamente, por el modo de acción de las hormonas vegetales; Pardos era un investigador del entonces Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) que, en ese momento, estaba de "okupa" (disculpen el término) en el Laboratorio de Fisiología Vegetal de la E.T.S.I. Agrónomos de Madrid.

A la sazón, el guión exigía que un becario como yo tuviera que impartir un seminario sobre el trabajo realizado en el extranjero. Y así lo hice. La audiencia (bioquímicos, microbiólogos y genéticos de Agrónomos) parecía mostrar un relativamente bajo interés por mi experiencia personal transatlántica. Mi sorpresa fue mayúscula cuando al final de la sesión, y ante la demanda de preguntas formulada por mi presentador de ese día, el Académico García Olmedo, el único "inquisidor" dentro de un público que me resultaba conocido, fue precisamente José Alberto, un desconocido para mí. Intercambiamos datos, recetas, referencias bibliográficas, opiniones y reflexiones sobre hormonas vegetales (o lo que sean). Creo que ese día nos empezamos a apreciar mutuamente.

La moviola me lleva a un año después, 1979, cuando conseguí, por una serie de coincidencias afortunadas para mí, una plaza de Profesor Agregado de la E.T.S.I. de Montes. Entre las primeras personas de esa Escuela que me recibieron con extremada cortesía y afecto, además de los inolvidables D. Anto-

nio Nicolás (Subdirector Jefe de Estudios), D. Manuel García de Viedma (Subdirector de Investigación, que luego fue Académico de I de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales) y D. Ángel Ramos (quien también llegó a Académico de la de Ciencias, así como fue miembro de esta Academia de Ingeniería), entre otros estaba José Alberto: pienso que este último incluso con alegría. Entonces, él era profesor de doctorado en el llamado Grupo VII, Anatomía, Fisiología y Genética, desde donde, al poco tiempo, organizó un ciclo de conferencias sobre Genética, absolutamente inusitado en nuestra Escuela tanto por la temática como por su interdisciplinariedad, en el que participamos los Profesores Germán Cancio, Ángel de la Fuente, José Alberto Pardos y yo mismo.

Han pasado muchos años, a lo largo de los cuales he podido comprobar cómo el nuevo Académico ha hecho una labor notable en pro de la Ingeniería de Montes.

Se la voy a resumir a Vds.

Datos fríos (o sea, sacados del currículum vitae)

José Alberto Pardos nació en 1934. Es Doctor Ingeniero de Montes (1963) por la Escuela de Ingenieros de Montes de Madrid y Doctor en Farmacia (1971) por la Universidad Complutense de Madrid. Completó su formación con estancias en la Junta de Energía Nuclear, en Long Ashton Research Station (Reino Unido), en las Universidades de Jerusalén y de Gales (en Aberystwith) y en el Institute of Paper Chemistry en Appelton, Wisconsin (EEUU).

Tras su graduación como ingeniero en 1959, fue contratado por la Dirección General de Montes (1959-1961) y por la Escuela de Montes (primero como auxiliar, 1961-1962, y luego como encargado de curso, 1962-1963). Entre 1963 y 1967 desarrolló su trabajo como ingeniero de sección en el Distrito Forestal de Zaragoza y como Profesor ayudante en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza.

En 1967 se incorporó al entonces denominado Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE, más tarde integrado en el INIA) primero como investigador y posteriormente como Jefe de Equipo (1975) y como Coordinador Nacional del Programa de Mejora Genética Forestal (1979), llegando en 1981 a Director del Departamento de Viveros, Mejora y Repoblación Forestal.

Desde 1979 es Profesor Adjunto y desde 1983 Catedrático de Anatomía, Fisiología y Genética en la E.T.S.I. de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid.

Su investigación ha sido financiada por diversas Agencias españolas (ICONA, CAICYT, CICYT, CAM) y extranjeras (Programas FOREST, AIR, FAIR entre otros) así como por empresas (ENCE).

Sus resultados más notables se han plasmado en la formación de una pléyade de jóvenes investigadores (trece tesis doctorales dirigidas) lo que sin duda contribuirá a la renovación de la investigación forestal y en la publicación del libro *Fisiología Vegetal aplicada a especies forestales*; así mismo, es autor o coautor de buen número de artículos y capítulos de libro tanto en publicaciones nacionales como internacionales de gran prestigio. También ha participado a través de Comunicaciones y de Ponencias invitadas en Congresos nacionales e internacionales y ha sido, o es miembro de importantes comités y representaciones forestales.

En 1991 fue promotor y luego Presidente (hasta 2002) de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, desde donde organizó tres Congresos Forestales Españoles (Lourizán, Pontevedra 1993, Pamplona 1997, y Granada 2001) e inició la publicación de los *Cuadernos de la Sociedad* de los que han aparecido 13 volúmenes.

La trayectoria investigadora del Profesor Pardos está marcada por una prolongada dedicación al estudio de las diferencias adaptativas entre las especies que configuran el dominio forestal.

Se inició con D. Luis Ceballos (1896-1967; Catedrático de Botánica en la Escuela de Montes y Académico de la Española y de la de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales) en la elaboración del Mapa Forestal de España. Pardos realizó los trabajos de campo relativos a dieciséis provincias, consiguiendo así un buen conocimiento de la biodiversidad de las especies forestales.

Posteriormente se ha ocupado, entre otras líneas de trabajo, de la calidad de la planta forestal, de la fisiología aplicada a la mejora genética forestal y de la ecofisiología de plantas forestales.

Es de destacar el proyecto elaborado en 1984 con el antiguo Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) para el establecimiento de una red de huertos semilleros del género *Pinus* en toda España; así se ha logrado disponer de más de veinticinco hectáreas de huertos, capaces de abastecer un porcentaje importante de las nuevas repoblaciones y, sobre todo, ha introducido el concepto fundamental de la imprescindibilidad del uso de semillas forestales de calidad.

En 1985, Pardos inició un proyecto acerca del Mejoramiento genético de *Pinus pinaster*, la especie más ampliamente utilizada (aproximadamente un 26 % del total repoblado) y la única de la que se disponía de ensayos de procedencias establecidos en 1967. Los resultados obtenidos permitieron ver la frecuente utilización inadecuada de procedencias con una especie con gran variabilidad y, a cambio, hoy se conoce con cierta precisión, el comportamiento de un gran número de orígenes tanto de ésta como de otras especies, desde el estadio de plántulas hasta el de árbol adulto, y las implicaciones, tanto en la supervivencia como en la producción, de la utilización de una u otra fuente de semilla (con resultados hasta seis veces superiores utilizando la mejor semilla frente a la de peor comportamiento). Esto ha dado lugar a que se promovieran las delimitaciones de las regiones de Procedencia para las principales especies forestales (*Pinus*, *Quercus*, y *Fagus*) así como las Regiones de Identificación y Utilización de Semillas (RiUs) para las restantes.

El material forestal de reproducción es la forma en la que la mejora genética llega a la silvicultura con el objetivo de obtener mejores árboles y, por tanto, mejores bosques. Asegurada la calidad genética de las semillas, el siguiente objetivo es y ha sido la producción de planta de calidad que permita incrementar las probabilidades de éxito en las repoblaciones realizadas principalmente en el medio mediterráneo (este proyecto fue planteado tras los grandes fracasos de repoblaciones efectuadas en el Levante español durante años secos que predominaron en las pasadas décadas).

Finalmente, por sus peculiaridades, cabe reseñar la línea iniciada en 1992 en el Hayedo de Montejo de la Sierra. Este hayedo constituye un enclave singular, un sistema forestal que se encuentra en una situación marginal respecto al ámbito geográfico o ecológico habitual de sus especies consti-

tuyentes, con problemas añadidos derivados de su tamaño. Frente a una visión tradicional de preservación del recurso genético, se ha planteado una estrategia de actuaciones que promuevan la conservación adaptativa, en función de la respuesta hoy bastante bien conocida (después de diez años de seguimiento), a las condiciones del medio.

Ahora, datos menos fríos

Conozco un viejo aforismo, que tal vez se pueda atribuir a Chateaubriand, que reza así "los bosques preceden a los pueblos y a éstos les siguen los desiertos".

¿Donde situaríamos a Pardos? ¿Antes o después de los desiertos?.

Como no soy un experto, prefiero utilizar un borgiano (y, por tanto, imaginario) *Diccionario de Autoridades Forestales* para, a su luz, revisar los datos fríos servidos de primer plato.

Veamos:

D. Agustín Pascual (1818-1884), primer Profesor de Dasonomía en la Escuela Especial de Ingenieros de Montes y Académico de la Española, fue el autor del planteamiento y el contenido doctrinal de sus estudios. En su Reglamento inicial, razonó la importancia dada al conocimiento y aplicación de las ciencias naturales incluyendo en el tercer curso "la anatomía y fisiología vegetal con la exposición del método natural de familias". Señalaba que "se pretende sólo buscar en sus principales elementos una provechosa aplicación; que el conocimiento de la naturaleza justifique y asegure el cultivo de los montes; que los resultados de la observación vengan en auxilio de las prácticas verdaderamente útiles y que, a un vano y ciego empirismo, suceda la regularidad de un sistema de enseñanza fundado en los principios de la naturaleza misma".

Pienso que el Profesor Pardos, en su trabajo ya mencionado en el equipo de D. Luis Ceballos, pudo fundamentar adecuadamente su posterior dedicación a la enseñanza en esos principios de la naturaleza.

Y hablando de D. Luis, no me resisto a incluir aquí otra cita, esta vez de

D. Joaquín M^a de Castellarnau (1848-1943), egregio científico forestal, Director que fue de la Escuela y Académico y Director de la de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. En 1933, D. Joaquín M^a, prologando los trabajos iniciales de D. Luis en el Mapa Forestal de la provincia de Málaga, decía "...por la voluntad de un ministro de Obras Públicas se podrá cruzar de carreteras y ferrocarriles todo el territorio nacional sin que quede un palmo libre; pero niego del modo más rotundo que un ministro de Agricultura, con todo el cuerpo de Ingenieros de Montes a sus órdenes, tenga poder bastante para poblar de árboles una sola hectárea de yermo, si los árboles se niegan a ello; y para no exponerse a un fracaso, bueno es preguntarles antes si acceden a vivir en el terreno que se les destina".

Los trabajos de Pardos han ido siempre encaminados a evitar, con planteamientos científicos, ese posible fracaso. Así, por ejemplo, la obtención de semillas de calidad abordada en el proyecto ya mencionado de los huertos semilleros, unida a la elección adecuada de la procedencia de la semilla inicial permite, sin duda, aumentar las probabilidades de éxito en la repoblaciones españolas. De esta forma se podrán evitar situaciones como la que describía D. Antonio Nicolás (1910-1998; Catedrático de Edafología, y Presidente del Consejo Superior Agrario) después de una visita de inspección a las repoblaciones de la provincia de Córdoba que, tras años de ir comportándose razonablemente, comenzaban a fallar estrepitosamente; "No es compatible la calidad con la cantidad. Se han repoblado demasiadas hectáreas en la postguerra y no se ha cuidado la calidad ni la capacidad adaptativa de las semillas" decía D. Antonio. Y continuaba: "para reintroducir una especie en zonas donde faltan procedencias locales, se ha de acudir a orígenes tan variados como los que se pueden observar en *Pinus pinaster*, cuyas masas naturales habitan en suelos tan diversos como peridotitas, calcitas, dolomías, rodenos o arenas silíceas".

Nadie duda actualmente que el avance de la selvicultura se debe, en gran medida, a la investigación realizada con las especies arbóreas. El nuevo Académico nos ha puesto de manifiesto que los árboles, tanto por su tamaño como por su longevidad, no son sujetos fáciles para el trabajo científico. Sin embargo, el primer experimento en fisiología vegetal, que tal vez merezca ese nombre, fue realizado con un árbol: Van Helmont (1577-1644), a principios del siglo xvii refutó la teoría aristotélica de la nutrición de las plantas al pesar un sauce joven plantado en un recipiente relleno de

tierra, pesado antes y después de la experiencia y protegido del agua de lluvia durante la misma. Pero hubo que esperar hasta fecha tan próxima como 1957 para que se realizara el Primer Simposio Internacional sobre la Fisiología de los Árboles Forestales bajo el patrocinio de la estación forestal Harvard Forest de la Universidad de Cambridge.

Pocos años después, Pardos es pionero en la incorporación de la fisiología forestal española a ese grupo fundador de la misma que incluye nombres tan notorios como los de I. Bailey, E. Bollard, D. Fraser, D. Gibbs, B. Huber, T. Kozłowski, P. Kramer, L. Leyton, N. Mirov, T. Mittler, S. Saphiro, P. Scholander, K. Thimann, P. Wareing y M. Zimmermann, entre otros.

En otro orden de cosas, han podido observar Vds. que José Alberto Pardos a lo largo de su intervención ha mostrado un respeto exquisito por lo que podríamos llamar, valga la redundancia, la componente más ingenieril de una ingeniería como la de Montes. Este tema ha sido (y aún es) objeto de controversia. Tan pronto como en 1891, D. Antonio García Manceira, ingeniero de Montes de la promoción de 1869 escribía: "Acaso influya algo en esta manera de apreciar las cosas, el olvido en que se van poniendo las Ciencias Naturales en los modernos Reglamentos de Estudio, aun en aquellas carreras en que aquellas ciencias son la base y el fundamento más sólido. La manía que aqueja a muchos de identificarse con otros estudios tan dignos como lo son los de Ingenieros de Caminos y Arquitectos va borrando el carácter especial y propio que ciertas profesiones ostentan en sus comienzos, y las van dejando sin sello especial, propio y distintivo, que es lo que cabalmente constituye su fuerza y lo que les dio prestigio".

José Alberto ha sido, a lo largo de su quehacer profesional, garante de ese sello "especial, propio y distintivo" sin olvidar, en momento alguno, que el aglutinante de las enseñanzas forestales es la función productiva de nuestros montes y, ésta, no depende exclusivamente de las Ciencias Naturales, sino además, de la demanda social e industrial de obras y de servicios para la gestión y aprovechamiento.

De la misma manera, creo que ha mostrado además un auténtico espíritu profesional como el que nos recordaba en 1947 D. Ezequiel González Vázquez (1884-1961). Catedrático de Selvicultura de la Escuela, refirién-

dose a la diferenciación que establecía el ya citado Castellarnau “entre el espíritu profesional y el espíritu de clase, el primero es una realidad de hecho forjada al calor de una sentida vocación, el segundo es una mera ficción de derecho mantenida las más de las veces como defensa de una conveniencia. El primero verdadero creador del prestigio, el otro obstinado mantenedor del privilegio. En relación con los montes sostenía (Castellarnau) la translación a ellos y a nuestras especies, de los aspectos propios de cada ciencia, labor que sólo podrá realizarse si predomina entre nuestros ingenieros **un verdadero espíritu profesional.**

Por último, creo también que jamás podrá reprochársele lo que D. Lucas Olazábal (1829-1899), catedrático de Ordenación de Montes en la Escuela echaba en cara al leer la necrológica del que fue maestro y del que, a su vez fue subordinado, D. Agustín Pascual “...sobrábanle para ello [para la redacción de un texto que contuviera toda la Dasonomía] inteligencia, conocimientos y laboriosidad, pero le faltaba una cosa sin la cual nada duradero se edifica en tal terreno: la vocación”. Sin duda la vocación de Pardos le ha llevado a la publicación del libro mencionado *Fisiología Vegetal aplicada a especies forestales* donde nos traslada, al tiempo, su conocimiento y su experiencia de tantos años; experiencia de auténtico *self-maderman* en un ámbito en el que, desgraciadamente, no ha habido maestros españoles anteriores.

Para finalizar, quiero comentar que el nuevo Académico nos ha dicho muchas cosas, y muy bien dichas, sobre los árboles. Sin embargo, no nos ha dicho que los árboles también hablan. Pues bien, José Alberto, tengo que decirte que los árboles hablan o al menos, así lo han entendido distintos autores. Por ejemplo, D. Ricardo Codorniu (1846-1923), honra y prez de los ingenieros de montes, apodado el “Apóstol de los árboles”, en su delicioso libro *Bagatelas forestales* con frecuencia hace hablar a los árboles, como al buen y viejo baobab (que el más antiguo de cuantos seres vivos pueblan el universo, contaba ya la respetable edad de mil y pico de años cuando el primer Faraón se estableció en Menfis, cerca de 2.400 cuando el rey David dió a Sión el nombre de Jerusalén, y unos 3.150 al ser expulsados de España los cartagineses y 5.150 años, ni uno más ni uno menos, cuando fue descubierto en 1749 por Michel Adanson, el célebre botánico creador de la clasificación natural de los vegetales”) que “se entretenía en contar a sus descendientes historias y más historias, pero siempre advertía que no le era posible responder en absoluto de su veracidad, ya que de

antiguo se afirmaba que todo cuento tiene algo de historia y toda historia no poco de cuento”.

O, así mismo, años después, Rafael Alberti pone en boca de Buster Keaton “cuando busca por el bosque a su novia, que es una verdadera vaca”, las siguientes palabras:

¡Georginaaaaa!
 ¿Estás o no estás?
 Abeto ¿dónde está?
 Alis(i)o ¿dónde está?
 Pinsapo ¿dónde está?

Sin duda, Buster Keaton esperaba contestación de esos árboles.
 José Alberto Pardos, bienvenido a la Academia.

Bibliografía

- Alberti, R. *Antología poética*. Alianza Editorial, 2002. pp. 99-101.
- Castellarnau, J. M. *En Estudio sobre la vegetación y flora forestal de la provincia de Málaga*. Luis Ceballos y Carlos Vicioso. Madrid, 1933.
- Codorníu, R. *Bagatelas forestales* (1914 y 1915). Imprenta Alemana. Madrid, 1916.
- García Maceira, A. “Insectos”. *Revista de Montes*, XV, 393-395, 1891.
- González Vázquez, E. *Selvicultura*. Editorial Dossat, 2ª ed. 1948.
- Olazabal, L. “Don Agustín Pascual”. *Revista de Montes*, IX, 33-50, 1885.

