

Estrategias mecánicas de las plantas arborescentes: enseñanzas estructurales de los árboles

Mechanical strategies of arborescent plants: structural teachings of trees

Gustavo Vargas^{1*}

Recibido 30 de noviembre de 2015, aceptado 25 de agosto de 2016

Received: November 30, 2015 Accepted: August 25, 2016

RESUMEN

Los árboles son los seres vivos más grandes que jamás han poblado la Tierra, pudiendo tener más de cien metros de altura, masas de varios miles de toneladas y alcanzar edades de varios miles de años. Para conseguirlo, entre otros condicionantes funcionales, los árboles deben hacer frente a todo tipo de cargas mecánicas. Así, para cumplir con estos requisitos estructurales, los árboles cuentan con la madera, un material excepcional desde un punto de vista mecánico, y ofrecen un sinnúmero de estrategias de diseño que van desde garantizar la estabilidad estructural hasta ofrecer un adecuado factor de seguridad empleando una cantidad mínima de material, con la consecuente eficiencia metabólica. De esta forma, este trabajo presenta las estrategias más importantes de crecimiento, anatomía y morfología que emplean las principales familias de plantas arborescentes, las gimnospermas y las angiospermas, destacando especialmente las características de los materiales naturales vegetales, que poseen una organización jerárquica y que, en la mayoría de los casos, son materiales compuestos reforzados con fibras, materiales con estructura celular, o ambos, como la madera.

Palabras clave: Biomecánica de las plantas, comportamiento estructural, materiales naturales vegetales, árboles.

ABSTRACT

Trees are the largest living beings that have ever lived on Earth, with more than one hundred meters high, masses of several thousand tons and ages of several thousand years. In order to achieve this, among other functional conditions, trees have to cope with all kinds of mechanical loads. Therefore, to meet these structural requirements, trees have wood, an exceptional material from a mechanical point of view, and offer a number of design strategies ranging from ensuring structural stability to provide adequate safety factor using a minimum amount of material, with consequent metabolic efficiency. In that sense, this paper presents the most important strategies of growth, anatomy and morphology that use the leading arborescent plants families, gymnosperms and angiosperms, highlighting the features of natural plant materials, which have a hierarchical organization, and in most cases are fiber-reinforced composite materials, materials with cellular structure, or both, such as wood.

Keywords: Plant biomechanics, structural behavior, natural vegetal materials, trees.

¹ Grupo 'Materiales+Tecnologías'. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco (UPV/EHU). E- 20018 San Sebastián, España. E-mail: gustavo.vargas@ehu.es

* Autor de correspondencia

INTRODUCCIÓN

Si en la naturaleza los animales son los equivalentes de los vehículos y las máquinas, las plantas son seguramente los equivalentes de las estructuras. En las plantas, la estructura principal sujeta otra parte por encima del suelo. Por ejemplo, en una planta, el tallo, las ramas y las raíces tienen la tarea de levantar las hojas por encima de las de otras plantas competidoras, ya que estas hojas deben aprovechar la luz solar para ofrecer la energía necesaria para el crecimiento y la reproducción de la planta [1]. De esta forma, los árboles están en competencia permanente, con otras plantas del planeta y entre ellos, para captar la mayor cantidad de luz solar posible. Su principal ventaja es su gran altura; así, logran ubicar a sus unidades de fotosíntesis (las hojas) en lugares privilegiados. Para conseguir esta ventaja competitiva, las plantas arborescentes tienen que transportar el agua a lo largo de grandes distancias, en contra de la gravedad y de la fricción interna, y tienen que hacer frente a cargas mecánicas considerables: su propio peso, la carga del viento, el peso de la nieve, entre otras. En este contexto, las plantas arborescentes, o arbóreas, son aquellas que se pueden sostener por sí mismas, que tienen una altura del adulto de al menos 5 m, y que tienen uno o varios tallos erectos de un diámetro de al menos 10 cm [2].

Para cumplir con estos requisitos mecánicos, los árboles cuentan con un sofisticado diseño mecánico, y tienen un material de ingeniería único: la madera. De este modo combinan la resistencia, la flexibilidad y la rigidez, e incluso pueden responder a su entorno y, por tanto, cambiar su diseño. Ello les permite desplegar las hojas usando un mínimo de material estructural [3]. En tal sentido, los tallos de los árboles son una de las más impresionantes construcciones mecánicas de la naturaleza; de hecho, los árboles son los seres vivos más grandes que jamás han poblado la Tierra. Debido a la estructura jerárquica y a su multifuncionalidad los árboles pueden crecer más de 100 m de altura [4], tener masas de varios miles de toneladas y alcanzar edades de varios miles de años [5]. Además, los árboles pueden soportar grandes tensiones sin romperse: la relación entre su resistencia mecánica y las tensiones de servicio es de hasta 4,5 veces. Este resultado coincide con los valores del factor de seguridad que presentan los huesos de los mamíferos, entre 3 y 4 [6].

Aunque las diferentes familias de plantas arborescentes experimentan cargas mecánicas similares, cada familia posee estrategias de crecimiento, anatomía y morfología diferentes [5]. Así, en este trabajo, se presentan las principales estrategias estructurales de los árboles, haciendo énfasis en aspectos relacionados con la estabilidad mecánica y la disposición del material, así como características de crecimiento, anatomía y morfología según las diferentes familias analizadas.

ESTABILIDAD MECÁNICA DE LAS PLANTAS TERRESTRES

Existen dos relaciones cuantitativas que se pueden utilizar para describir el efecto combinado de las cargas estáticas y dinámicas que gobiernan la estabilidad mecánica de las plantas terrestres (plantas sembradas en la tierra que toman el agua y las sales minerales mediante raíces que están bajo tierra).

La primera de estas relaciones se extrae directamente de los principios básicos de la teoría de la estabilidad elástica, y dice que la altura máxima, H_{\max} , que un elemento estructural vertical (e.g. el tronco de un árbol) puede alcanzar antes de que pandee elásticamente bajo su propio peso depende del diámetro, d , y de la rigidez específica, E/ρ , de los materiales (tejidos) que lo componen, tal y como se esquematiza en la Figura 1.

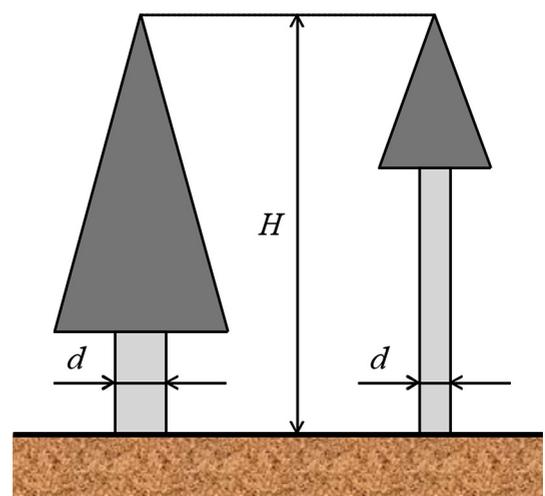


Figura 1. Variables geométricas que inciden sobre la estabilidad mecánica de las plantas terrestres. H , altura. d , diámetro del tronco.

Así, desde un punto de vista mecánico, la altura máxima a la que pueden crecer las plantas arborescentes se calcula mediante la ecuación de Euler-Greenhill. Esta ecuación afirma que la altura crítica de pandeo es proporcional a la rigidez específica del material de la planta (tejido) elevada a la potencia 1/3, i.e. $(E/\rho)^{1/3}$, y al diámetro del tallo elevado a la potencia de 2/3, i.e. $d^{2/3}$. Las especies de plantas progresivamente más altas emplean tejidos más rígidos y más ligeros como estrategia de refuerzo principal en sus tallos [7]. Matemáticamente, la ecuación de Euler-Greenhill se expresa como:

$$H_{\max} \propto C \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/3} d^{2/3} \quad (1)$$

donde C es una constante de proporcionalidad, E es el módulo elástico de Young y ρ es la densidad del material. Esta expresión, llamada la ecuación de Euler-Greenhill [8] ya que fue desarrollada a partir de una fórmula propuesta por Leonard Euler, hace más de 270 años [9], indica que una columna robusta puede soportar un peso mayor que una columna esbelta, fabricadas con los mismos materiales, y que para una determinada rigidez del material, los materiales ligeros son preferibles a los materiales pesados. La fórmula de Euler-Greenhill muestra que un aumento en el diámetro, o el uso de un material con una mayor rigidez específica, aumenta la altura máxima a la que un árbol puede crecer antes de que falle por pandeo bajo su propio peso. Asimismo, esta fórmula predice que la altura crítica de pandeo de los tallos deberá ser proporcional a $d^{2/3}$, ya que la constante de proporcionalidad y la rigidez específica del material son constantes entre tallos de diferente tamaño. Tanto C como E/ρ son constantes para especímenes de árboles muy grandes y, por lo tanto, muy antiguos. En consecuencia, la altura de los árboles antiguos está en función del promedio de las potencias de 2/3 de los diámetros de los troncos. No obstante, existen factores como la disponibilidad de luz y la intensidad de las cargas de viento, que afectan la alometría de la altura de los árboles [10]. Se entiende por alometría al estudio de los cambios que se producen en las proporciones de varias partes de un organismo, en relación con el crecimiento del conjunto.

La segunda relación importante para entender la estabilidad mecánica de las plantas terrestres está relacionada con las estructuras sometidas a cargas

horizontales, como la presión de viento. Esta relación indica que para asegurar la estabilidad mecánica de un elemento estructural vertical, el momento de arrastre en la base del elemento (igual al producto entre la fuerza de arrastre, D , y la altura a que esta fuerza actúa, H) no puede exceder el momento gravitacional (igual al peso de la columna, W , por la distancia, r , entre su línea de acción y el punto de rotación ubicado a un lado del centro de la base del elemento) [7]. Esta situación se representa esquemáticamente en la Figura 2 y se expresa de forma matemática como:

$$DH < Wr \quad (2)$$

En esta fórmula, H no es necesariamente la altura del elemento estructural vertical, es el centroide donde se aplica la fuerza de arrastre en toda la estructura (e.g. el centroide del área que forma la superficie proyectada del follaje). La relación entre el momento de arrastre y el momento flector gravitacional, presentado en la ecuación (2), indica que los elementos estructurales verticales grandes y rígidos pueden resistir las cargas de viento simplemente en virtud de la fuerza de reacción que su propio peso genera sobre el terreno. Sin embargo, los elementos estructurales verticales más pequeños deben resistir las cargas de viento de otra forma, por ejemplo utilizando geometrías que les brindan palancas de apoyo mayores [11].

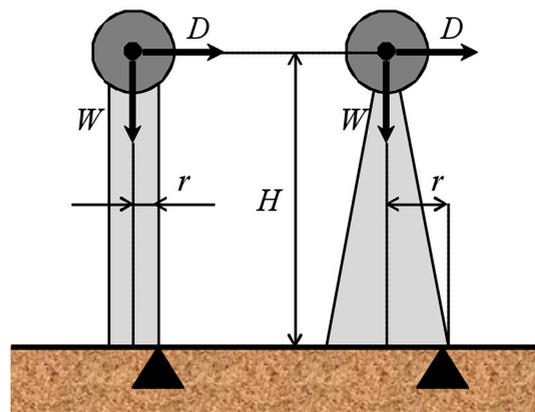


Figura 2. Momento de flexión gravitacional (Wr) y del momento de arrastre (DH) ejercidos sobre un tronco cilíndrico y otro cónico.

Las principales estrategias mecánicas que emplean las plantas para aumentar las palancas

de apoyo se pueden apreciar en la Figura 3, y son las siguientes: contrafuertes alineados longitudinalmente que sirven como elementos de soporte a compresión (e.g. troncos de árboles con contrafuertes) –Figuras 3A y 4– [12], cables tensores anclados en el suelo sometidos a tracción en el lado de barlovento (e.g. raíces aéreas) –Figura 3B–, estacas enterradas aprovechando la presión del suelo para resistir la fricción (e.g. raíces pivotantes) –Figura 3C–, cimentación ancha en forma de placa para aumentar el brazo de palanca de la base (e.g. coronas de raíces que se expanden lateralmente) –Figuras 3D y 3E–, y sistemas ramificados interconectados que actúan a tracción en las bases de los elementos verticales vecinos (e.g. sistemas de raíces entremezcladas o injertadas) –Figura 3F–. Por supuesto, algunas geometrías tienen mayores palancas que otras a pesar de tener volumen y altura equivalentes [7].

Al ser r el radio basal de un elemento estructural vertical, la palanca de apoyo de un cono es 1,73 veces mayor que la de un cilindro, con un volumen y una altura equivalentes. Por lo tanto, suponiendo que hay dos árboles con materiales que tienen rigidez y densidad equivalentes, el tronco que tenga una forma cónica puede resistir mucho mejor las cargas de viento que el que tiene forma cilíndrica, gracias a su palanca de apoyo más grande, como se esquematiza en la Figura 2 [7]. De forma matemática, ello se expresa como:

$$r_{\text{cono}} = \sqrt{3} r_{\text{cilindro}} \quad (3)$$

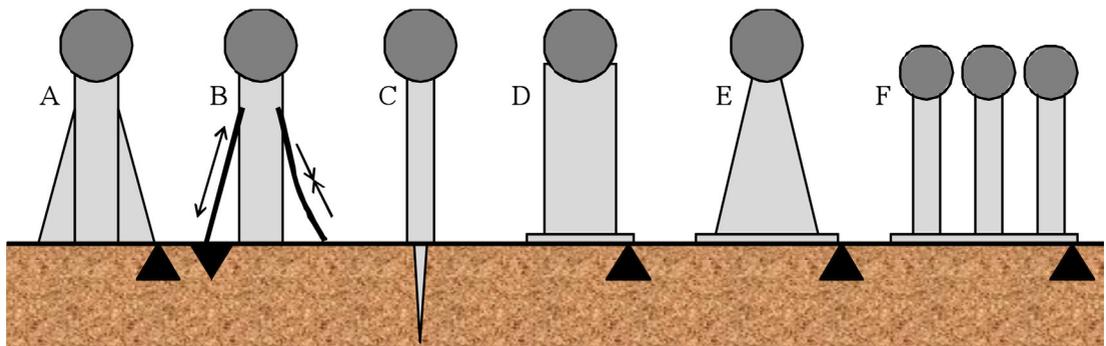


Figura 3. Principales estrategias mecánicas que emplean las plantas para aumentar las palancas de apoyo. A. Contrafuertes alineados longitudinalmente. B. Cables tensores anclados. C. Estacas enterradas. D y E. Cimentación ancha en forma de placa. F. Sistemas ramificados interconectados.

MATERIALES NATURALES VEGETALES

Los materiales biológicos están en todo lo que nos rodea. Son los principales constituyentes de los organismos vegetales y animales, y tienen una amplia diversidad de funciones. Una de estas funciones es el comportamiento mecánico, que ofrece protección y estructura para el individuo [13]. La destacable eficiencia mecánica de los sistemas biológicos se debe, en gran parte, a las estrategias que usa la naturaleza para conseguir materiales con un excelente comportamiento estructural. Dichas estrategias tienen que ver con la organización jerárquica de los materiales biológicos [14], y a que en la mayoría de los casos se tratan de materiales compuestos reforzados con fibras [15] o materiales celulares [16], o ambos. De hecho, muchos tejidos biológicos, como la madera y los huesos, son sólidos celulares reforzados con fibras que presentan una estructura jerárquica. Sus excepcionales propiedades mecánicas se deben a una adaptación funcional de la estructura a todos los niveles de dicha jerarquía [13].

Estructura jerárquica

Los tejidos biológicos, como la madera, los huesos o los dientes, están estructurados jerárquicamente para proporcionar la máxima resistencia con un mínimo de material. Muchos de estos materiales son sólidos celulares (e.g. hueso esponjoso o madera) o materiales con función gradiente (e.g. dentina). En el nivel más bajo de la jerarquía, es decir, en el intervalo de nanómetros, los materiales biológicos son generalmente composites reforzados con fibras. Gracias a esta estructura jerárquica, existe una amplia



Figura 4. Árbol con contrafuertes, rigidizadores laterales que unen las raíces y el tronco. Foto: G. Vargas.

variedad de diferentes diseños posibles, cambiando la disposición de los componentes a los diferentes niveles de tamaño [17].

En el caso particular de los árboles, el diámetro representativo de las diferentes subestructuras cubre un intervalo desde 10^1 metros (e.g. el tronco de una

secuoya) hasta 10^{-8} metros (e.g. el diámetro de una protofibrilla de celulosa); es decir, diez órdenes de magnitud con ocho niveles jerárquicos: órgano (tronco), tejido (madera), célula de madera, paredes celulares laminadas, paredes individuales, fibras de celulosa, microfibrillas y protofibrillas [18], como se presenta de forma esquemática en la Figura 5. En tal sentido, las paredes celulares de las plantas están hechas de cuatro elementos básicos: celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina.

Aunque la microestructura de las paredes celulares vegetales varíe en los diferentes tipos de plantas, en términos generales, las fibras de celulosa refuerzan una matriz de hemicelulosa y, o bien lignina o pectina, dispuesta en una o varias capas. El contenido en volumen de fibra de celulosa y su orientación varían entre una capa y otra, así como la estructura geométrica de las células vegetales: desde células prismáticas en disposición de nido de abeja, en el caso de la madera, y células poliédricas de parénquima con forma de espuma con celdas cerradas rellenas de líquido, en el caso

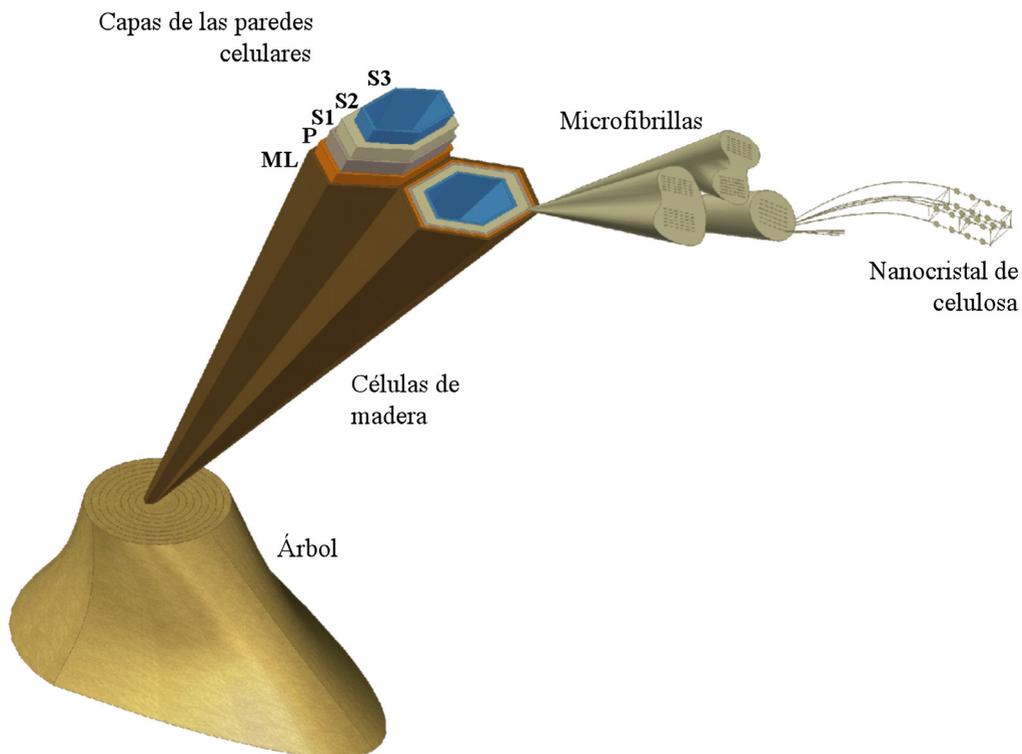


Figura 5. Estructura de la pared celular de la madera: lamela media (ML), pared primaria (P), paredes secundarias (S1, S2, S3), microfibrillas, estructuras cristalinas.

de las manzanas y las patatas, hasta materiales compuestos de estas dos estructuras celulares, como en el caso de los tallos de palmeras arborescentes. La disposición de los cuatro elementos básicos en la pared celular de las plantas y las variaciones en la estructura celular ofrecen una amplia variedad de propiedades mecánicas: módulos de Young que varían desde 0,3 MPa en la parénquima hasta los 30 GPa en las palmeras más densas (100.000 veces mayor), y resistencias a compresión de 0,3 MPa en la parénquima contra 300 MPa en palmeras de alta densidad (1.000 veces mayor). Lo interesante es que hay plantas que tienen materiales vegetales con módulos elásticos y resistencias que abarcan casi todo este intervalo de valores [19].

Materiales compuestos reforzados con fibras

La mayoría de los tejidos biológicos están hechos de fibras poliméricas. Dos de las fibras más abundantes en la naturaleza son la celulosa y el colágeno. La celulosa se encuentra predominantemente en las plantas, aunque también es producida por algunas bacterias, y es uno de los principales constituyentes de la pared celular vegetal.

La celulosa es la sustancia orgánica más abundante en la naturaleza, es la principal fibra estructural del reino vegetal, y puede ser sintetizada por plantas terrestres, algunos animales (e.g. los tunicados), algas y un gran número de microorganismos. Esta es un polisacárido que, gracias a los enlaces β -(1 \rightarrow 4) entre las unidades de glucosa [20], produce una estructura lineal en forma de cinta que es muy rígida y que forma fibras estables, lo que le confiere rigidez al cuerpo de la planta [21]. Para ser un polímero la celulosa tiene unas excelentes propiedades mecánicas: su módulo de Young es de unos 130 GPa y su resistencia a tracción es cerca de 1.000 MPa. Las propiedades de la hemicelulosa y de la lignina, por el contrario, son similares a las de los polímeros de ingeniería comunes: la lignina, por ejemplo, tiene un módulo de unos 3 GPa y una resistencia de aproximadamente 50 MPa [19].

Las principales características de la macromolécula de celulosa son: su carácter renovable, su estructura regular, su alto peso molecular y sus grupos hidroxilo reactivos. Estas particularidades han contribuido a la utilización de la celulosa como material de refuerzo potencial, debido a la combinación de sus propiedades: alta área superficial, alta relación

de aspecto y propiedades mecánicas específicas excepcionales [20]. En cuanto a las propiedades mecánicas, la molécula de celulosa tiene un módulo teórico de 250 GPa, pero el mayor valor que se ha obtenido experimentalmente es de aproximadamente 130 GPa. La densidad de la celulosa es de aproximadamente 1,5 g/cm³, de modo que es posible comparar su comportamiento mecánico (resistencia y rigidez) con el de otros materiales de ingeniería. En conclusión, la celulosa es un material de alto rendimiento, comparable con las mejores fibras producidas tecnológicamente [22].

Materiales celulares

Los materiales con una estructura celular abundan en la naturaleza e incluyen los que tienen celdas prismáticas con disposición de nido de abeja, como la madera y el corcho, o los que cuentan con celdas poliédricas, como los núcleos de tallos de plantas y los huesos esponjosos. También están las estructuras sándwich naturales con núcleos ligeros, como las hojas largas y estrechas de las iridáceas, y como los huesos tipo cáscara (e.g. el cráneo). Las estructuras tubulares naturales, como los tallos de bambú, tienen con frecuencia un núcleo tipo nido de abeja o un núcleo esponjoso que está envuelto en una cáscara cilíndrica externa más densa, aumentando así la resistencia de la cáscara a fallos por pandeo local (e.g. en los tallos de las plantas). Desde un punto de vista mecánico, estos materiales naturales celulares son eficientes: la microestructura en forma de panel de abeja de la madera, por ejemplo, ofrece un comportamiento mecánico excepcionalmente alto para resistir flexión y pandeo [23].

Las características microestructurales de los sólidos celulares que afectan su comportamiento mecánico se pueden observar con mayor facilidad en las estructuras artificiales tipo nido de abeja o en las espumas artificiales. Las estructuras tipo nido de abeja, con sus celdas prismáticas, se denominan como sólidos celulares bidimensionales, mientras que las espumas, con sus celdas poliédricas, son sólidos celulares tridimensionales. La densidad relativa es la densidad del sólido celular dividida por la densidad del sólido del que está hecho, y es equivalente a la fracción en volumen del sólido. Las espumas pueden ser abiertas (con material sólido únicamente en los bordes de los poliedros) o cerradas (con membranas sólidas sobre las caras de los poliedros). Las propiedades de una espuma dependen de las del sólido que constituye

el material celular; en el caso de materiales como la madera, las paredes celulares son, a su vez, materiales compuestos laminados reforzados con fibras [23].

Por otro lado, la madera también tiene una desventaja estructural: como sus células son alargadas y tienen forma de tubos de pared delgada, tienen una propensión a pandearse cuando están bajo la acción de cargas de compresión. Esto hace que la madera sea aproximadamente la mitad de resistente a compresión que a tracción [3, 24].

ESTRATEGIAS ESTRUCTURALES DE LAS PLANTAS LIGNIFICADAS

En contraposición a las monocotiledóneas, a medida que los árboles van creciendo las propiedades del material se van adaptando a la respectiva geometría de los tallos. Cuando el árbol es joven tiene una forma esbelta (fina) con un momento de inercia comparativamente bajo; el momento de inercia, I , de una sección circular es proporcional al diámetro elevado a la cuarta potencia, i.e. d^4 . Matemáticamente:

$$I_{\text{circular}} = \frac{\pi d^4}{64} \quad (4)$$

Asimismo, la deflexión máxima, δ_{max} , que experimenta un elemento estructural recto de longitud H empotrado en un extremo y libre en el otro, como en el caso de un árbol, y sometido a una carga puntual, P , en el extremo libre (tal y como se esquematiza en la Figura 6), se puede calcular como:

$$\delta_{\text{max}} = \frac{P H^3}{3 E I} \quad (5)$$

y reemplazando la ecuación (4) en la ecuación (5):

$$\delta_{\text{max}} = \frac{64 P H^3}{3 \pi E d^4} \quad (6)$$

De este modo, un árbol joven y esbelta puede evitar las cargas de viento deflectándose, empleando un material flexible y resistente. Por el contrario, en un árbol adulto, y grueso, las cargas de viento se soportan con un material de alta rigidez a la flexión, que se consigue mediante dos posibles estrategias [5]. La

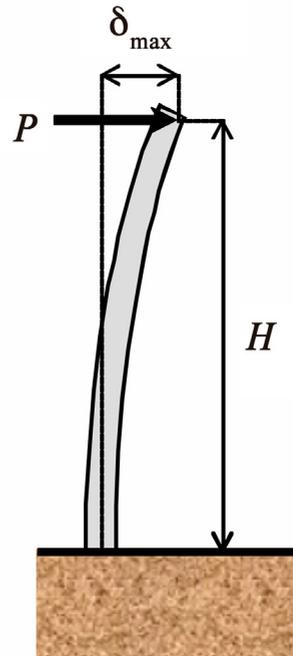


Figura 6. Deflexión de un elemento estructural recto empotrado en un extremo y libre en el otro, sometido a una carga puntual en el extremo libre.

primera, es mediante la formación permanente de nuevas capas de la pared celular y la lignificación de las paredes celulares existentes, lo que ofrece una mayor acumulación de material, aumentando la densidad del tejido y, en consecuencia, incrementando el módulo elástico. Durante el crecimiento de la planta, esta deposición consecutiva de capas forma la estructura multilaminar de la pared celular [4]. La segunda estrategia, consiste en un aumento del diámetro mediante crecimiento secundario [5], lo que redonda en un considerable aumento del momento de inercia: si el diámetro de un tronco se duplica, su momento de inercia, y en consecuencia su rigidez a flexión –ver ecuaciones (4) y (6)– se multiplica por 16.

A nivel bioquímico, la distribución de los ángulos de microfibrillas de celulosa, AMF, puede cambiar mediante la sección transversal del tronco de un árbol. Para las maderas de gimnospermas (especies con semillas desnudas, coloquialmente conocidas como coníferas), y para algunas maderas de angiospermas (especies con flores, coloquialmente conocidas como frondosas), en especial en los árboles más

viejos, el AMF disminuye desde un valor alto en la médula (aproximadamente 40°) hasta valores muy pequeños cerca de la corteza. Como el tronco va aumentando de diámetro mediante la adición de los anillos anuales en el exterior, la historia de un árbol se va registrando según la sucesión de dichos anillos. Por tanto, el hecho de que el ángulo de microfibrillas disminuya desde la médula hasta la corteza indica que los árboles más jóvenes están optimizados para la flexibilidad, mientras que cuando el árbol se hace mayor el tronco se va rigidizando y optimizando para resistir la flexión (ver Figura 7). Una posible explicación para este cambio de estrategia podría ser un compromiso entre la resistencia frente al pandeo, lo que requiere rigidez, y la flexibilidad bajo cargas de flexión para resistir la fractura [25].

Diseño mecánico adaptativo

En biología, el diseño mecánico adaptativo tiene que ver con la salida de diseño resultante de un conjunto de entradas proveniente de la evolución o crecimiento de un órgano o de un organismo. Las entradas pueden ser cargas externas o internas, cambios medioambientales, entre otros, que se

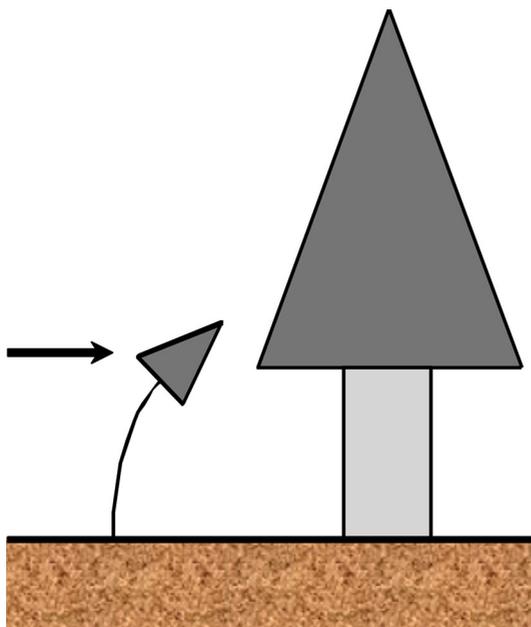


Figura 7. Optimización estructural de las plantas arborescentes según su edad: árboles jóvenes optimizados para la flexibilidad y árboles más viejos optimizados para la rigidez.

superponen en la información genética disponible. Como la escala de tiempo evolutiva es muy larga, lo que observamos ahora es el resultado de todas estas entradas durante largos períodos [18].

Los mejores ejemplos de diseños mecánicos “adaptativos” son los huesos [26] y los árboles [27]. En los árboles, cuando las circunstancias mecánicas lo requieren, se produce un tipo especial de madera en los anillos anuales sucesivos, con diferente orientación de microfibrillas de celulosa y estructura celular [18]. Otros dos tipos de diseño mecánico adaptativo que ocurren en una escala de tiempo más corta (y por ello, son más observables), y que tiene que ver con individuos más que con especies, son la tigmorfogénesis; por ejemplo, cambios en la forma, la estructura, las propiedades del material..., como resultado de cambios transitorios en las condiciones del entorno [28], y las distintas formas de tropismo, como el heliotropismo en los girasoles y la reestructuración en los huesos, mencionado anteriormente.

Estos efectos están íntimamente relacionados con el crecimiento y son buenos ejemplos de modificaciones en el diseño con el fin de resolver un conjunto específico de condiciones de servicio. La formación de la madera de reacción en los árboles, necesaria para enderezar el tronco hacia la vertical o para compensar las cargas en direcciones específicas (e.g. vientos predominantes, crecimiento inclinado) y el mecanismo de reestructuración en los huesos son quizás los ejemplos más conocidos y los mejor documentados. Lo que muestran estos ejemplos de diseño mecánico adaptativo es que durante el crecimiento, la flexibilidad de diseño intrínseca, debido a la combinación de los materiales reforzados con fibras, la organización en diferentes niveles de jerarquía y la interacción entre ellos, convergen hacia una solución específica necesaria para una situación concreta en la que se ha desarrollado [18]. Así, a nivel celular se puede modificar la densidad del tejido y a nivel bioquímico se pueden modificar los ángulos de microfibrillas de celulosa y se puede conseguir una lignificación suficiente, con el fin de adaptar la solución de diseño, aunque sea de manera temporal, según los cambios en las condiciones circundantes [5]. De este modo, durante su crecimiento los árboles están en adaptación permanente y altamente eficiente, aunque lenta. Esta alta flexibilidad estructural y geométrica de los

árboles, combinada con una estrategia de transporte de agua de alta eficiencia, son las razones por las que los árboles puedan alcanzar alturas espectaculares, como las secuoyas gigantes (*Sequoia sempervirens*) de hasta 115 m en California (Estados Unidos).

Madera de reacción

La madera de reacción, RW (en inglés, *reaction wood*), se forma generalmente como respuesta a una orientación no vertical del tronco, causada por vientos predominantes, nieve, pendientes inclinadas o perfiles asimétricos en el follaje. Este tipo anormal de madera se forma como parte de un proceso de desarrollo cuyo objetivo es reorientar la inclinación de un tronco, o de una rama, para que el árbol pueda encontrar una posición más favorable, como en el caso que se aprecia en la Figura 8. Tanto en las especies de angiospermas como en las de gimnospermas, el tejido de la madera de reacción se asocia frecuentemente con el crecimiento radial excéntrico del tronco [29].



Figura 8. Formación de madera de reacción en un tronco para reorientar su inclinación, en busca de una posición vertical más favorable. Foto: G. Vargas.

Por un lado, en el caso de las gimnospermas a la madera de reacción se le suele llamar madera de compresión, CW (en inglés, *compression wood*) ya que suele aparecer en zonas localizadas del árbol sometidas a tensiones de compresión, en

la parte inferior de los tallos inclinados, como se presenta en la Figura 9A. La CW tiene un mayor contenido de lignina, con más subunidades p-hidroxifenil, y contiene menos celulosa que la madera normal, NW (en inglés, *normal wood*). Además, la densidad de la madera de compresión es hasta un 50% mayor que la de la madera normal. En la CW el ángulo de microfibrilla de las fibras de celulosa en la capa S2 de la pared celular es alto, la longitud de las traqueidas es baja, el perfil de la sección transversal de la célula es más redondeado y los espacios intercelulares son mayores [30]. Para ángulos de microfibrillas mayores de 45°, las células se expanden en la dirección longitudinal [31].

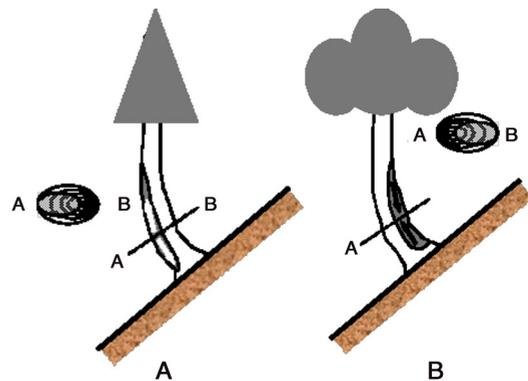


Figura 9. Enderezamiento de un tronco inclinado mediante la generación de madera de reacción, por acción combinada de las partes superior e inferior del tejido. A. Madera de compresión en gimnospermas. B. Madera de tracción en angiospermas.

Por otro lado, en las especies de angiospermas a la madera de reacción se le llama madera de tracción, TW (en inglés, *tension wood*) porque aparece en las zonas del árbol sometidas a tensiones de tracción, en la parte superior de los tallos inclinados (ver Figura 9B). El contenido total de lignina de la TW es menor, el contenido de celulosa es mayor y el ángulo de microfibrilla es menor que las correspondientes propiedades de la NW [30]. Para $AMF < 45^\circ$, las células se contraen en la dirección longitudinal [31]. A la madera que se produce en el lado de un tallo o una rama opuesto al que se genera la madera de reacción se le denomina madera opuesta, OW (en

inglés, *opposite wood*), y se puede ver como una madera que tiene propiedades intermedias entre la NW y la RW [30].

Pretensionado longitudinal

Los troncos de los árboles deben soportar su propio peso, lo que origina tensiones de compresión; sin embargo, en la práctica, las tensiones producidas por los esfuerzos a flexión debidas a las cargas de viento son siempre mayores y más importantes que las de compresión. Algo similar sucede con los mástiles de los barcos que soportan tensiones de compresión cuando se tensan los aparejos [32]. De hecho, tradicionalmente los armadores de barcos preferían usar troncos únicos enteros para construir los mástiles de los barcos, intentando utilizar el árbol en su estado más natural, tanto como fuera posible. Curiosamente, durante muchos años los ingenieros despreciaron este conocimiento tradicional; de hecho, lo primero que hacen los ingenieros con un árbol es cortarlo en pedazos pequeños para después volver a encolarlos entre sí con el fin de obtener algún tipo de sección hueca [24].

En este sentido, para resolver este problema estructural los árboles emplean un compromiso de diseño, donde las ventajas de tener un material celular para una alta rigidez a flexión específica origina una baja resistencia a compresión, debido a las propiedades tanto de la fibra como de la estructura celular [18]. Sin embargo, este compromiso se puede compensar mediante un crecimiento diferenciado de las distintas partes del tronco, de manera que este queda pretensionado, con las capas más externas sometidas a tensiones de tracción para compensar las bajas propiedades a compresión de la madera [33].

Ya que los árboles tienen que resistir cargas que actúan en cualquier dirección, según los “caprichos” del viento, la solución idónea se consigue mediante una sección simétrica, normalmente circular. En una sección sin pretensionado, como la que se presenta en la Figura 10A, la distribución de tensiones es lineal, y las tensiones máximas de compresión, C, y tracción, T, tienen la misma magnitud y se localizan en la periferia de la sección, en el punto más alejado del centro. En tal caso, cuando la tensión máxima de compresión alcance el valor de la correspondiente resistencia (i.e. 27 MPa), el árbol empezará a romperse por el lado de compresión.

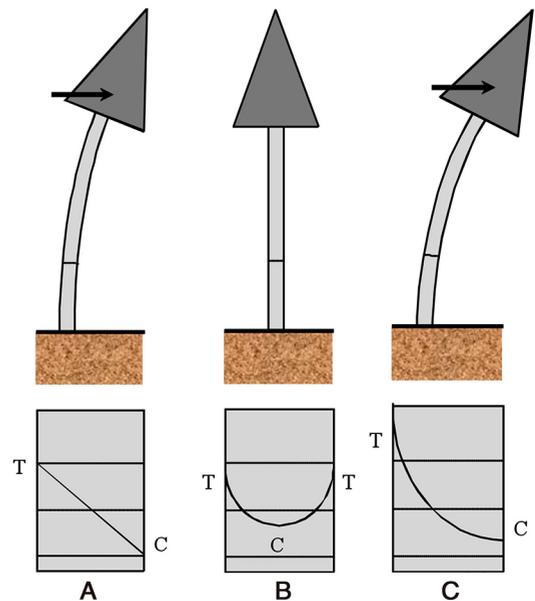


Figura 10. Pretensión axial de los troncos de los árboles. A. Árbol bajo la acción del viento sin madera pretensada (distribución lineal de tensiones). B. Árbol pretensado sin carga de viento (el exterior del tronco a tracción, T, y el interior a compresión, C). C. Árbol pretensado bajo la acción del viento (superposición de tensiones de A. y B.).

Para resolver este problema, el árbol consigue crecer de forma que las fibras de madera de la parte exterior quedan sometidas a un pretensionado a tracción, de unos 14 MPa, mientras que la madera de la parte central del árbol queda trabajando a compresión, para equilibrar la carga vertical total. Así, la distribución de tensiones en una sección del tronco sigue un patrón similar al de la Figura 10B. De esta forma, si se superponen las distribuciones de las Figuras 10A y 10B se obtiene la distribución de tensiones de un árbol pretensionado sometido a cargas de flexión por la acción del viento. Con esta estrategia, el árbol consigue reducir considerablemente la tensión máxima de compresión y, por tanto, aumenta su resistencia real a flexión. Por supuesto, el valor de la tensión máxima a tracción aumenta pero justamente la madera tiene generalmente una resistencia a tracción mayor que a compresión [24].

Pero, ¿cómo lo hacen? Inmediatamente después de que las células nacen, empiezan a diferenciarse y

pasan por un largo proceso de “maduración” que dura varios días. Durante la diferenciación, a medida que la lignina se va depositando en la pared celular, la matriz de celulosa amorfa se hincha transversalmente; además, cuando la celulosa cristaliza, las microfibrillas se encogen longitudinalmente. El efecto combinado del hinchamiento transversal y del encogimiento longitudinal da como resultado una contracción longitudinal de las células de madera, que se representa esquemáticamente en la Figura 11 mediante flechas negras [30].

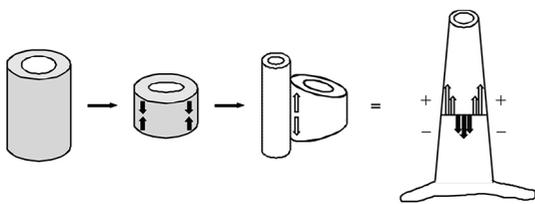


Figura 11. Crecimiento diferenciado del tronco para generar una pretensión longitudinal: capas externas a tracción (flechas blancas) y capas internas a compresión (flechas negras).

Sin embargo, como estas células de madera diferenciadas no pueden contraerse totalmente, ya que están pegadas a las antiguas células rígidas ya lignificadas, originan tensiones mecánicas de tracción en la pared celular (flechas blancas en la Figura 11). Estas “tensiones de maduración”, que se manifiestan en forma de deformaciones residuales a lo largo del eje longitudinal, solo se pueden liberar cortando la madera [33]. En consecuencia, las células de madera que están en la superficie exterior, justo por debajo de la corteza, quedan sometidas a tracción, estirándose longitudinalmente y comprimiéndose en dirección transversal. En contraposición, a medida que se va acumulando madera nueva, año tras año, en la superficie del árbol, las células de madera en el interior del tronco se irán comprimiendo lentamente, hasta que estén completamente sometidas a tensiones de compresión (flechas negras en la Figura 11). A este gradiente de tensiones mecánicas en el tronco, con el exterior a tracción y el interior a compresión, se le llama tensiones de crecimiento y puede ser altamente perjudicial para la calidad de la madera, originando deformaciones de flexión y de torsión de tablas y tablones [30] así como agrietamiento transversal

de troncos que han sido cortados. En la Figura 12 se puede apreciar el uso de grapas transversales para prevenir el agrietamiento, posterior al corte del tronco, debido a las tensiones de crecimiento.

ESTRATEGIAS ESTRUCTURALES DE LAS PLANTAS NO LIGNIFICADAS

A modo comparativo con respecto a los árboles, se presentan a continuación las estrategias estructurales de las plantas no lignificadas.

Presión de turgencia

A diferencia de los animales o los ingenieros, las plantas no producen masas sólidas de material estructural. En contraposición, las plantas podrían describirse como sólidos celulares, ya que su esqueleto está compuesto por las paredes que rodean todas sus células. La pared celular de la planta es en realidad un material compuesto fibroso, formado por microfibrillas de celulosa ubicadas dentro de una matriz que se compone en gran parte de las hemicelulosas y, a menudo, rigidizadas mediante la incorporación de lignina. La pared celular se



Figura 12. Sistema para prevenir el agrietamiento transversal debido a la liberación de tensiones de crecimiento, mediante el uso de grapas metálicas. Foto: G. Vargas.

arriostra para evitar el colapso por el contenido líquido de la celda, que empuja hacia el exterior con una presión de turgencia de hasta 2 MPa. Por tanto, cada célula está soportada por su propio esqueleto hidrostático. Sin embargo, las células que tienen paredes lignificadas gruesas no requieren presión de turgencia, y pueden proporcionar apoyo, incluso cuando están muertas y sus contenidos celulares han desaparecido [1]. Del mismo modo, para conseguir rigidez estructural, las plantas no lignificadas, aquellas que se caracterizan por tener una estructura no leñosa, dependen del control de esta presión de turgencia dentro de las células, pretensionando las fibras de celulosa dentro de las paredes celulares (normalmente hasta 200 MPa) a expensas de la compresión del fluido [18].

Monocotiledóneas

Son tan grandes las ventajas de ser un árbol, que algunos de ellos han evolucionado a partir de un grupo de plantas con flores, las monocotiledóneas, que hace tiempo perdieron la capacidad de generar crecimiento secundario [3].

Las plantas, a diferencia de los animales, continúan creciendo a lo largo de toda su vida. Este crecimiento se origina en regiones localizadas de tejidos embrionarios permanentes, llamados meristemas. Los meristemas que están en los extremos de las raíces y los tallos se denominan meristemas apicales y están relacionados con la extensión de la planta. El crecimiento que se da a partir de los meristemas apicales se denomina crecimiento primario. El crecimiento secundario, que origina el engrosamiento de los tallos, las ramas y las raíces, se origina a partir de dos meristemas laterales: el cambium vascular y el cortical [34].

De esta forma, el crecimiento de las plantas monocotiledóneas se limita al crecimiento primario, lo que significa que la sección transversal del tallo está más o menos predefinida, con muy pocas posibilidades para la planta de aumentar sus dimensiones transversales, i.e. su diámetro. De este modo, una planta monocotiledónea, al igual que una palmera de gran altura, tiene desde el principio de su crecimiento un gran diámetro del tallo.

Por ejemplo, en palmeras jóvenes (cortas), la rigidez específica a flexión del material es menos relevante

que el diámetro del tallo, ya que dicho tallo está sobredimensionado. A pesar de ello, durante el crecimiento y aumento de la altura de la planta se necesita una adaptación de material que garantice una mayor rigidez del tejido [5]. Así, las palmeras, al carecer de crecimiento secundario, no son capaces de formar nuevo material a lo largo del tallo [3]. De esta forma, tanto los tejidos parenquimáticos como las fibras de soporte permanecen vivos durante toda la vida de la planta. Sin embargo, como estos procesos de adaptación se limitan a un determinado diámetro del tallo, la estrategia de crecimiento de las palmeras para aumentar la rigidez a la flexión es más limitada que la estrategia de los árboles. Esta podría ser una razón importante por la que las palmeras no llegan a las alturas de los árboles [5]. Aunque hay excepciones como la palma de cera del Quindío, *Ceroxylon quindiuense*, una palma nativa de los valles andinos de Colombia que crece hasta 60 m (ver Figura 13).

A pesar de ello, la estrategia de las palmeras tiene dos desventajas [3]: que el diámetro del tallo en la base tiene que ser el mismo que el que tendrá la planta cuando alcance su altura máxima, lo que hace que las palmeras crezcan muy lentamente al principio, en comparación con los árboles, y que las palmeras no tienen capacidad para ramificarse porque tienen solo una yema terminal y por tanto una sola corona de hojas, al igual que los helechos arborescentes.



Figura 13. Palma de cera del Quindío (*Ceroxylon quindiuense*), una especie nativa de los valles andinos de Colombia. Foto: L. Mejía.

CONCLUSIONES

El presente artículo trata sobre las principales estrategias estructurales de los árboles, a la luz de las características de crecimiento, anatomía y morfología de las diferentes familias de plantas arborescentes: gimnospermas y angiospermas. Dichas estrategias son las responsables de que, con respecto a otras plantas, los árboles tengan una ventaja competitiva, la gran altura, para aprovechar la energía solar que garantice el crecimiento y la reproducción de la planta. Para llegar a tener grandes alturas, algunos de hasta 100 m, los árboles deben soportar cargas mecánicas considerables.

El primer aspecto mecánico que trata el artículo es el de la estabilidad estructural de las plantas terrestres, para hacer frente al efecto combinado de las cargas estáticas (e.g. su propio peso, el peso de la nieve) y dinámicas (e.g. las cargas de viento). Posteriormente, se presentan las ventajas estructurales desde el punto de vista de los materiales naturales vegetales, que se deben a la organización jerárquica de los materiales biológicos, y a que en la mayoría de los casos se tratan de materiales compuestos reforzados con fibras o de materiales celulares, o ambos. Se indican además, a modo comparativo, las estrategias mecánicas de las plantas no lignificadas, haciendo énfasis en la presión de turgencia. Para terminar, se presentan las estrategias estructurales de los árboles a partir de un diseño mecánico adaptativo, destacando el papel de la madera de reacción, tanto en gimnospermas (madera de compresión) como en angiospermas (madera de tracción), y del pretensionado longitudinal para compensar que la madera presenta generalmente un peor comportamiento mecánico a compresión que a tracción.

Así, este trabajo busca unir dos áreas de conocimiento complementarias, la botánica y la ingeniería, para explicar conceptos estructurales presentes en las especies arborescentes a partir de fundamentos de la mecánica, ilustrar las principales estrategias mecánicas de los árboles y ofrecer un punto de partida ante la posible utilización de los árboles como referentes mecánicos para el desarrollo de sistemas estructurales artificiales.

REFERENCIAS

[1] A.R. Ennos. "Compliance in plants". En C.H.M. Jenkins (Ed.). *Compliant Structures*

- in Nature and Engineering, pp. 21-37. WIT. Wessex, Inglaterra. 2005.
- [2] M. Ricker y H.M. Hernández. "Especies arbóreas y arborescentes de México: gimnospermas, monocotiledóneas y helechos arborescentes". *Revista Mexicana de Biodiversidad*. Vol. 81, pp. 27-38. 2010.
- [3] A.R. Ennos. "Trees". Natural History Museum. Londres, Inglaterra. 2001.
- [4] T. Speck y I. Burgert. "Plant Stems: Functional Design and Mechanics". *Annual Review of Materials Research*. Vol. 41, pp. 169-193. 2011.
- [5] M. Eder, M. Rüggeberg y I. Burgert. "A close-up view of the growth strategies of arborescent plants at different levels of hierarchy-Mechanical requirements and structural solutions". *New Zealand Journal of Forestry Science*. Vol. 39, pp. 115-124. 2009.
- [6] C. Mattheck, K. Bethge y J. Schafer. Safety factors in trees. *Journal of Theoretical Biology*. Vol. 165 N° 2, pp. 185-189. 1993.
- [7] K.J. Niklas. "The influence of gravity and wind on land plant evolution". *Review of Palaeobotany and Palynology*. Vol. 102, pp. 1-14. 1998.
- [8] G. Greenhill. "Determination of the greatest height consistent with stability that a vertical pole or mast can be made, and the greatest height to which a tree of given proportions can grow". *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. Vol. 4, pp. 65-73. 1881.
- [9] G.A. Vargas Silva y G. Calzada Terrones. "Euler, el matemático". *El Rompecabezas*. Madrid, España. 2010.
- [10] K.J. Niklas. "Plant Height and the Properties of Some Herbaceous Stems". *Annals of Botany*. Vol. 75 N° 2, pp. 133-142. 1995.
- [11] S. Vogel. "Blowing in the wind: Storm-resistant features of the design of trees". *Journal of Arboriculture*. Vol. 22, pp. 92-98. 1996.
- [12] B. Clair, M. Fournier, M.F. Prevost, J. Beauchene y S. Bardet. "Biomechanics of buttressed trees: bending strains and stresses". *American Journal of Botany*. Vol. 90 N° 9, pp. 1349-1356. 2003.
- [13] P. Fratzl y R. Weinkamer. "Nature's hierarchical materials". *Progress in Materials Science*. Vol. 52, pp. 1263-1334. 2007.
- [14] R. Lakes. "Materials with structural hierarchy". *Nature*. Vol. 361 N° 1993, pp. 511-515. 1993.

- [15] G. Mayer y M. Sarikaya. "Rigid biological composite materials: Structural examples for biomimetic design". *Experimental Mechanics*. Vol. 42 N° 4, pp. 395-403. 2002.
- [16] L.J. Gibson y M.F. Ashby. "Cellular Solids: Structure and Properties". 2ª ed. Cambridge University. Cambridge, Inglaterra. 1997.
- [17] P. Fratzl. "Hierarchical structure and mechanical adaptation of biological materials". En R.L. Reis y S. Weiner (Eds.). *Learning from Nature How to Design New Implantable Biomaterials*, pp. 15-34. Kluwer. Dordrecht, Países Bajos. 2004.
- [18] G. Jeronimidis. "Bioinspiration for Engineering and Architecture: Materials-Structures-Function". En *Silicon + Skin: Biological Processes and Computation. Proceedings of the 28th Annual Conference of the ACADIA*, pp. 26-33, Minneapolis, Estados Unidos. 2008.
- [19] L.J. Gibson. "The hierarchical structure and mechanics of plant materials". *Journal of The Royal Society Interface*. Vol. 9 N° 76, pp. 2749-2766. 2012.
- [20] G. Vargas, J. Trifol, I. Algar, A. Arbelaz, G. Mondragon, S.C.M. Fernandes, F. Mujika y A. Eceiza. "Nanostructured composite materials reinforced with nature-based nanocellulose". En S. Syngellakis (Ed.). *Natural Filler and Fibre Composites: Development and Characterisation*, pp. 75-85. WIT, Wessex, Inglaterra. 2015.
- [21] P. Fratzl. "Cellulose and collagen: from fibres to tissues". *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. Vol. 8, pp. 32-39. 2003.
- [22] J.F.V. Vincent. "From cellulose to cell". *The Journal of Experimental Biology*. Vol. 202, pp. 3263-3268. 1999.
- [23] L.J. Gibson. "Biomechanics of cellular solids". *Journal of Biomechanics*. Vol. 38, pp. 377-399. 2005.
- [24] J.E. Gordon. "Structures, or, why things don't fall down". Penguin. Londres, Inglaterra. 1978.
- [25] H. Lichtenegger, A. Reiterer, S.E. Stanzl-Tscheegg y P. Fratzl. "Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods - A possible strategy of mechanical optimization". *Journal of Structural Biology*. Vol. 128, pp. 257-269. 1999.
- [26] R. Huiskes. "If bone is the answer, then what is the question?". *Journal of Anatomy*. Vol. 197, pp. 145-156. 2000.
- [27] B. Thibaut, J. Gril y M. Fournier. "Mechanics of wood and trees: some new highlights for an old story". *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Series IIB Mechanics*. Vol. 329 N° 9, pp. 701-716. 2001.
- [28] S. Vogel. "Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape". *New Phytologist*. Vol. 183, pp. 13-26. 2009.
- [29] B.F. Wilson y R.R. Archer. "Tree Design: Some Biological Solutions to Mechanical Problems". *BioScience*. Vol. 29 N° 5, pp. 293-298. 1979.
- [30] C. Plomion, G. Leprovost y A. Stokes. "Wood Formation in Trees". *Plant Physiology*. Vol. 127, pp. 1513-1523. 2001.
- [31] P. Fratzl y F.G. Barth. "Biomaterial systems for mechanosensing and actuation". *Nature*. Vol. 462 N° 26, pp. 442-448. 2009.
- [32] J.E. Gordon. "The new science of strong materials or why you don't fall through the floor". 2ª ed. Princeton University. Princeton, Inglaterra. 1976.
- [33] R.R. Archer. "Growth stresses and strains in trees". En T.E. Timell (Ed.). *Springer Series in Wood Science*. Springer-Verlag. Heidelberg, Alemania. 1986.
- [34] P.H. Raven, R.F. Evert y S.E. Eichhorn. "Biología de las plantas". Reverté. Barcelona, España. 2004.