Arboricultura

Peter Sterken

INTRODUCCIÓN

Un método no lucrativo y visual para la evaluación de arbolado fue publicado en Sterken (2006) donde fueron combinados métodos con criterios opuestos. El método visual propuesto demostró cómo las matemáticas (en las que se basan los SIA, V y test de tracción) deberían ser relativizadas. Sin embargo, los criterios de este autor han sido apenas mencionados por la literatura de arboricultura y por las asociaciones, desde su publicación. En cambio otros métodos similares, como los SIA y SIM (Test de tracción Elasto-Inclino de Wessolly & ERB 1998), sí han disfrutado de un reconocimiento mucho más amplio en la literatura de arboricultura.

Algunas recomendaciones extraídas de investigaciones científicas actuales serán ofrecidas al lector, ya que estas investigaciones dibujan las

limitaciones más severas de algunas metodologías, muchas de las cuales no se han mencionado en la arboricultura comercial todavía.

La lentitud con la que la arboricultura absorbe ciertos avances científicos ha sido mencionado ya también por otros autores como Slater & Harbinson (2010). Los anteriormente citados han demostrado que aunque el modelo de inserción de las ramas de Shigo fue *erróneo* desde su principio, el modelo ha sido divulgado sin discusión y a nivel mundial, dentro del mundo de la arboricultura. Aunque tanto la simple observación por parte de cualquiera que haya roto o podado una rama, como las evidencias publicadas por otros autores en contra del modelo de Shigo, deberían haber sido suficientes. Pero, los escasos autores que publicaron evidencias (ya por el 1991) que cuestionaban el modelo de Shigo, conocido como “El Padre de la arbori-

cultura moderna", aparentemente no fueron tenidos en cuenta por la comunidad de la arboricultura (Slater & Harbinson 2010).

En la ciencia, es común que algunos científicos publican atendiendo más a la cantidad que a la calidad con el objetivo de avanzar en su carrera profesional. Es decir, necesitan publicar muchos artículos (aunque con escasos aportes) y conseguir el máximo de citas por colegas afines (en un intercambio de favores). Tanto la arboricultura como el campo de las palmáceas deberían tener cuidado de sumarse a esta tendencia, en la cual algunos autores mencionan, muy ampliamente, a otros autores con los que comparten los mismos intereses económicos o métodos, dejando a los autores no afines en la oscuridad y el olvido. A veces algunas revisiones bibliográficas excluyen a autores críticos o avances científicos que no apoyen a los autores de las mismas. Esto, puede llevar a un grado inaceptable de endogamia, y la endogamia nunca ha sido sana. Éste es un hecho que ha sido descrito ampliamente en áreas donde la ciencia puede marcar la diferencia entre la vida y la muerte (Federal Judicial Center 2000). En esta última publicación se expone lo siguiente sobre el proceso de revisión a pares en revistas científicas: "(este proceso) no funciona bien como una herramienta para elegir entre ideas válidas pero competitivas, en parte porque el editor o árbitro científico es muchas veces un competidor directo de los mismos recursos (publicación en revistas prestigiosas o fondos) a los que aspira el autor".

MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha buscado concienzudamente en publicaciones científicas las evidencias estadísticas que demostrarían una relación positiva entre los resultados de los métodos SIA y SIM y los vientos reales. De la misma forma, hemos buscado avances pioneros sobre la biomecánica de los árboles y palmeras en literatura científica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evidencias estadísticas

No se han encontrado revistas científicas que validen los SIA y SIM: no se sabe si los resultados se ajustan a la realidad. Tampoco se han encontrado evidencias científicas que demuestren que los resultados de estos métodos concuerdan con la compleja interacción entre árboles reales y vientos reales. Sin embargo, en Sterken (2006) sí se reconoce tal limitación en cuanto al modelo V.

Límites

Los límites muy considerables de estos tres métodos (la mayoría de ellos aparentemente desconocidos en la arboricultura comercial) se deben tener en cuenta, ya que no hacerlo podría llevar a graves interpretaciones erróneas con daños o la muerte como resultado. Algunos

han sido publicados ya por Sterken (2006). El lector debería consultar dicha obra si se quisiera estudiar los detalles. Además, Fournier et al. (2013) han publicado un estudio muy avanzado, sobre la biomecánica actual de los árboles que debería ser consultado por el lector ávido en aprender.

Uno de los límites es que los árboles se pueden caer con vientos mucho *menores* que los calculados por los test de tracción debido a las

cargas dinámicas. O sea: mediante estos métodos se predice "que el árbol es seguro" para luego caerse o romperse inesperadamente. En cuanto a este hecho, Baker y Bell, en una famosa revista científica sobre ingeniería eólica, publicaron ya por el 1992 varios descubrimientos pioneros, que James 18 años después (2010) incorporó. Muchos avances pioneros sobre árboles y viento se pueden encontrar en la literatura científica ajena a la arboricultura y pueden ser incorporados.

Cabe mencionar, que todavía no existe todavía ningún método definitivo que pueda predecir el colapso (vuelco o fractura) de un árbol (James et al. 2014). Así mismo, ningún método puede pretender ofrecer garantías contra el vuelco o la fractura del árbol en toda su parte aérea. Éste es un hecho que se tiene que sopesar cuidadosamente cuando se tiene en cuenta el alto coste de mediciones instrumentales. También Peltola (2006) sugiere que todavía no se entienden los procesos que están detrás de los daños en árboles por eventos de viento, nieve, peso propio y cargas estáticas y dinámicas y que, en consecuencia, estos métodos sólo pueden pretender ser una orientación. La evaluación de la estabilidad de un árbol mediante la simulación estática de viento (test de tracción) únicamente no es aceptable y el cálculo de la carga en la copa es muy problemático cuando se desconoce el factor aerodinámico real (la reducción de la copa por el viento) (Peltola et al. 2006).

Además, habría que tener en cuenta el agrietamiento de los contrafuertes formados por las raíces principales y el colapso de la base hueca de un árbol por tal agrietamiento, debido a la fuerza del viento o durante un test de tracción (Claire et al. 2003). Muchos árboles colapsan (por ejemplo la fractura basal por hongos xilófagos) de esta forma.

Algunos de los colapsos estructurales más comunes en los árboles no son siempre predecibles mediante los métodos descritos en este estudio (Sterken 2006 y 2005). Y ésto debido a las complejas combinaciones de flexión, torsión, oscilaciones dinámicas, delaminaciones, deslizamientos, cavidades abiertas hacia el exterior y el colapso de estructuras huecas irregulares.

En cuanto a lo último, Wessolly y Erb (página 233, 2016) reducen la fractura de estructuras arbóreas huecas al pandeo de un tallo herbáceo hueco. Y, al hacer esto, se reafirman en que el valor informativo de su test de tracción es bueno. Esto debería hacer surgir serias dudas en cualquiera que esté familiarizado un poco con las complejas maneras en las que se pueden romper estructuras arbóreas huecas. Además, la hierba no es madera. Pero, y por encima de todo, ellos dicen que su razonamiento se basa en árboles con cavidades cuya forma sea, y se mantenga, regular (*"In areas where struc-*

tural failure occurs earlier, it should be checked once more whether the tree cavity really maintains its regular shape over a greater length." (sic. Wessolly y Erb 2016)). Pero el hecho es que muchísimos árboles dañados no tienen cavidades que tengan, o mantengan, una forma regular. Muchísimos árboles dañados no se parecen a un tubo hueco cerrado y perfecto. ¿Acaso significa esto entonces, que este razonamiento de Wessolly y Erb (2016) no se puede emplear en árboles con cavidades irregulares? Excluir árboles con cavidades irregulares sería una limitación muy seria.

En ingeniería es comúnmente sabido, que el colapso estructural puede ocurrir antes de que la fuerza de compresión axial exceda la resistencia a esta compresión axial en una estructura. Como por ejemplo, las casas de piedra y los puentes y acueductos romanos no se caen porque "se aplasten los bloques" bajo el peso de la estructura. Si no, se caen porque la estructura falla, por ejemplo al deformarse lateralmente llevando al colapso. Los árboles, como estructuras complejas (especialmente los muy dañados estructuralmente y, extrañamente, los que por ello son candidatos a los test de tracción SIM, el SIA, el V,...) no son una excepción a esta regla. Los métodos aquí descritos asumen que un árbol es una viga recta y perfecta con la misma composición isotrópica (el material tendría la misma resistencia y características en todas las direcciones anatómicas, como por ejemplo el acero) y que su fractura se intenta predecir mediante la teoría del límite elástico de las fibras por compresión en sentido axial.

Lo cual nos lleva a hacerle una pregunta al querido lector (y también teniendo en cuenta el razonamiento anteriormente descrito de Wessolly y Erb (página 233, 2016)): los árboles que se pretende evaluar mediante estos métodos: ¿acaso son un tubo perfecto? O, más bien ¿Tienen cavidades excéntricas y/o abiertas, grietas, pudriciones extensas, geometrías irregulares, el tronco curvado.....? La respuesta, creemos, sería invariablemente un "No" a la primera pregunta y un "Sí" a la última, porque si el árbol no estuviera dañado estructuralmente, no se habría considerado para una evaluación mediante estos métodos. Cabe entonces preguntarse, si realmente habría que emplearlos.

Además, se debería proceder con sumo cuidado, ya que los fundamentos de los métodos propuestos por Wessolly y Erb (2016) y sus discípulos (i.e. los factores aerodinámicos, las propiedades de la madera y la famosa curva de vuelco), deberían estar basados en datos científicos. Y no hemos encontrado ninguna referencia clara en Wessolly y Erb (2016) – que apunten a revistas científicas que hayan publicado los datos y procedimientos empleados contrastados científicamente – que apoye su curva de vuelco, su catálogo de Stuttgart y sus factores aerodinámicos propuestos. Así mismo, estamos

dudando todavía si esos tres fundamentos son hipotéticos o no. Se aconsejaría emplear la tabla de las propiedades de la madera publicadas por Niklas y Spatz (2010) ya que esta es muy completa. Y es además muy curioso de observar, como la famosa curva de vuelco de Wessolly y Erb apenas ha sido cuestionada en revistas de arboricultura, cuando su validez ya ha sido cuestionada por otros estudios (por ejemplo Vanomsen 2006).

Se puede añadir lo siguiente al presente análisis: tanto troncos como ramas curvados pueden rajarse y romper antes de que se sobrepase el límite elástico de la madera por compresión axial (Ennos & van Casteren 2009). Esto significa que los tres métodos comparados en este estudio (incluido el Método Elastómetro del SIM) son totalmente inútiles si pretenden predecir este tipo muy común de fractura en troncos curvados, ya que estos métodos se basan justamente en el límite elástico de la madera por compresión axial (Wessolly y Erb 2016).

Los métodos descritos aquí también ignoran las concentraciones de tensión alrededor de fallos (Virot et al. 2016) (por ejemplo alrededor de grietas, nudos por antiguas inserciones de ramas, aperturas de cavidades que no están claramente delimitadas físicamente por una madera fuerte y vigorosa de herida o de compensación) en las ramas, en las ramas principales, el tronco y el sistema radicular. Estas concentraciones de tensión alrededor de estos fallos estructurales pueden ocasionar el colapso imprevisible de la estructura. El árbol y las cargas dinámicas pueden ser modelados como masas insertadas con muelles, a la vez que se debe tener en cuenta la propagación de grietas alrededor de los fallos (Virot et al. 2016).

Los métodos comparados en el presente estudio únicamente emplean un valor fijo de módulo de elasticidad, densidad y resistencia a la compresión por especie de árbol. Sobre esto, Spatz y Pfisterer (2013) tienen razón cuando sugieren que se debería tener como límite inferior un factor de seguridad de 200%, en vez del 150%. Además, ellos concuerdan con Sterken (2006) cuando este último dijo textualmente que los árboles reales y los vientos reales generalmente no se ajustan a las matemáticas y que los árboles son más bien estructuras dinámicas.

Quisiéramos recalcar, que no está dentro de nuestras intenciones invalidar estos métodos, si no apuntar al hecho de que la evaluación de arbolado y palmeras está todavía en sus inicios. Fiarse ciegamente de ellos podría llevarnos al colapso inesperado del árbol y dañar propiedades o, en el peor de los casos, herir o matar a personas. La correcta interpretación de sus resultados puede salvar vidas y ésta es la razón por la que se ofrecen estas directrices. Se reconoce aquí que el modelo matemático V (Sterken 2006) sufre de las mismas limitaciones que

las descritas en esta publicación. Investigaciones futuras multidisciplinarias podrían aprovechar las (auto) críticas ofrecidas en ésta y muchas otras publicaciones ajenas a la industria de la arboricultura. Esto garantizaría un poco mejor el avance hacia métodos de evaluación de estabilidad de arbolado mejores y más fiables.

Un pensamiento sobre la pared residual

Mattheck et al. (2008) criticaron tanto el SIA como el test de tracción (SIM) y las secciones huecas “seguras” de Wessolly, pero se les pasó por alto un aspecto crítico que habría mejorado sensiblemente sus comentarios, presente en la versión inglesa de las actas del Congreso de la Asociación Española de Arboricultura del 2005, donde los autores Detter et al. (2005) dicen literalmente que: “They also allow for determining the thickness of residual walls without the use of invasive instruments” (traducción: “Ellos (los test de tracción) también permiten determinar el grosor de la pared residual sin el empleo de instrumentos invasivos”). En el artículo de su ponencia se ofrece un diagrama donde, supuestamente, está representado el grosor de pared residual de 4807 árboles. Con esto, su-

gieren que muchos árboles sólo necesitan una pared residual extremadamente fina. El mismo diagrama fue luego publicado por la ISA (International Society of Arboriculture) a través de Bond (2006) también. Wessolly y Erb lo han reproducido igualmente a lo largo de los años con un creciente número de árboles interpretados, dándole el mismo significado y transmitiendo el mismo mensaje.

Sin embargo, el lector debería tener extrema precaución ya que esos diagramas son altamente cuestionables, debido a que el “grado de oquedad permitido” como publicado por Detter et al. (2005) está basado en cuatro fundamentos:

- a. Un módulo hipotético de elasticidad derivada del Catálogo de Stuttgart (Wessolly & Erb, 1998)
- b. El cálculo de la sección transversal del árbol con la ayuda de forcípulas, asumiendo una sección con forma de elipse en vez de la sección real

- c. La medición de la elongación de las fibras con elastómetros mientras se aplica una carga estática al árbol
- d. Formulas sencillas de ingeniería procedentes de libros de texto comunes.

Se ofrece el siguiente razonamiento para esclarecer esta situación:

En primer lugar, las propiedades del material pueden variar en la misma sección transversal, entre partes del mismo árbol y entre árbol y árbol. Incluso cuando son de exactamente la misma especie. Y pueden desviarse fácilmente del valor publicado en las tablas empleadas por el test de tracción.

En segundo lugar, muchos árboles tienen la base de tronco muy irregular, cuando se ve en sección transversal, que no se asemeja ni mínimamente a una elipse. El test de tracción (Elastómetro) emplea forcípulas para medir los mayores diámetros del tronco a la altura del elastómetro (el último generalmente puesto donde se sospecha que está la mayor debili-

dad estructural). Los cálculos posteriores pueden asumir que es una elipse con mucha más madera de la que realmente hay. Así mismo, el módulo resistente asumido es mucho mayor del que realmente hay (el real es una compleja combinación de irregularidades, arranques de raíces principales y espacios vacíos entre ellos). Esta exageración del módulo resistente (la geometría que soporta la carga) lleva a una visión distorsionada de la rigidez y resistencia del tronco.

En tercer lugar, la elongación longitudinal de las fibras mientras se tira del árbol, se mide con elastómetros. Si estos elastómetros no están bien colocados, por ejemplo sobre áreas curvadas o las bases curvadas del tronco, se pueden grabar "deformaciones" que estén por encima de las deformaciones microscópicas reales. Lo cual lleva a resultados engañosos.

Y finalmente, formulas sencillas de ingeniería procedentes de libros de texto comunes son aplicadas, donde el módulo resistente asumido (fácilmente irreal) se combina con el módulo hipotético de elasticidad (que fácilmente podría

estar muy por encima del real en el árbol evaluado y la elongación medida (que podría ser mayor que la real). El resultado es simplemente que los cálculos indican una rigidez mucho menor que la hipotética. “El grosor” de la pared residual después se calcula con una sencilla fórmula basada en la rigidez erróneamente calculada como “baja”.

Y, como todos los fundamentos son cuestionables (excepto la deformación longitudinal medida, y esto sólo en el caso de haber empleado correctamente los elastómetros, ya que su empleo erróneo también resulta en resultados erróneos) desde el principio, la interpretación de los diagramas de “grosor residual en árboles reales” dada por Detter et al. (2005), Bond y Wessolly, es cuestionable también. En consecuencia: los grosores de pared residual como publicados por estos autores no son valores reales, si no interpretaciones hipotéticas. Interpretar sus resultados como que “esos miles de árboles sólo necesitan una pared residual mínima” es un error muy peligroso.

Detter et al. (2005) a lo mejor no deberían haber dicho que “2171 árboles en pie tienen un t/R de entre 0,0 y 0,3”, ya que no hemos encontrado ninguna referencia clara en Wessolly y Erb (2016) – que apunten a revistas científicas que hayan publicado los datos y procedimientos empleados contrastados científicamente – que apoye esta exclamación tan ambiciosa. Esa expresión debería formularse de nuevo, porque usuarios podrían ser guiados erróneamente por esto y cometer errores muy peligrosos. Si se hubieran cortado esos 2171 árboles después para después poder medir su t/R real (si realmente hubiera una pared residual concéntrica y cerrada...) y compararlos con los t/R hipotéticos del diagrama, estos autores habrían podido ofrecer las pruebas necesarias para poder validar su enorme ambición. No hemos encontrado referencias en la bibliografía de Wessolly y Erb (2016) que apunten a publicaciones científicas de su mano que muestren los procedimientos seguidos y las fórmulas empleadas. En consecuencia, resulta ser imposible testar su validez científica.

Si Mattheck et al. (2008) hubieran considerado el presente análisis, estos últimos habrían sido capaces de formular mejores críticas contra su histórico adversario. Igualmente, uno puede plantearse la siguiente cuestión ahora: ¿Porqué este simple razonamiento no se ha planteado o publicado jamás, dejando los diagramas completamente sin cuestionar?

En Wessolly y Erb (2016) se ha reproducido el mismo diagrama de nuevo (y dos veces), y esta vez con los resultados de su test de tracción sobre 8140 árboles. El diagrama sugiere que 3729 árboles en pie tienen un t/R de entre 0,3 y 0,0. Y aunque esta vez sí dicen (en una breve frase) que su diagrama es el resultado de mediciones

con el elastómetro convertidas matemáticamente: esta frase ni es una explicación transparente ni es el tan necesario aviso. En consecuencia, sería conveniente que Wessolly y Erb (y los demás autores que hayan publicado este diagrama) que formulen de nuevo tanto esta presentación gráfica como sus conclusiones referente a ésta, ya que ambas pueden llevar a interpretaciones erróneas por parte de personas que trabajan con árboles estructuralmente dañados. Se podría pensar fácil y erróneamente que árboles pueden ser seguros con un ratio t/R tan bajo como casi 0,0. Lo cual llevaría a situaciones muy peligrosas.

Por otro lado, Gruber (2008) ya sugirió que tanto la regla de Mattheck del VTA de $t/R=0,32$ como el diagrama tan famoso que la apoya, estaban falsificadas. Lo cual hace que tanto el diagrama de Mattheck como el de Wessolly y Erb, ambos habiendo sido la base de la evaluación de arbolado, deberían cuestionarse desde la perspectiva científica.

Árboles huecos

Confrontaciones amargas sobre el ratio t/R requerido han acompañado tradicionalmente la arboricultura desde los años noventa. La discusión siempre trata de cuánto de hueco un árbol podría ser, si la pared residual fuese completamente concéntrica y cerrada. Pero..., ¿Cuántos árboles huecos hay con esta característica? ¿Cuántos hay que realmente se parecen a un tubo hueco hecho de material isotrópico, como si fuera el sueño de cualquier ingeniero? Exactamente: muy, muy pocos.

La mayoría de las cavidades pueden ser excéntricas, irregulares, abiertas e incluso pueden estar combinadas con otros defectos estructurales, como más aperturas, grietas, corteza incluida, inserciones de ramas, etcétera... Además, la madera es un material ortotrópico: las propiedades materiales son muy distintas en las tres direcciones anatómicas (axial, radial y circunferencial). Y esto, evidentemente, le confiere un aspecto absurdo a esta histórica discusión sobre el t/R .

De todas formas, se ofrecerán aquí unas palabras para satisfacer a los incrédulos: los criterios aportados en esta publicación, en cuanto a la seguridad de árboles huecos, cobran mayor fuerza con los criterios publicados por Huang et al. (2017). Estos autores publican valores críticos para el t/R , teniendo en cuenta el pandeo de Brazier, el aplanamiento de la sección y, por último, la fractura de un tronco hueco bajo puras tensiones de compresión axial por flexión del tronco. Huang et al. demostraron que las formas de colapsarse el tronco y sus correspondientes ratios de t/R son: pandeo de Brazier ($0 < t/R < 0,06$), agrietamiento tangencial seguido por agrietamiento longitudinal de la pared residual ($0,06 < t/R < 0,27$) y fractura convencional por flexión ($0,27 < t/R < 1$) respec-

tivamente. Estos resultados podrían ser unas directrices extremadamente valiosos para la evaluación de árboles huecos.

Los valores mínimos admisibles del t/R sugeridos por Huang et al. son entonces: 0.06 para el pandeo de Brazier, 0.13 para agrietamiento tangencial seguido por agrietamiento longitudinal de la pared residual y 0.27 para la fractura convencional (la única que es contemplada por los métodos V, SIA, SIM y métodos similares). Los V, SIA y SIM serían entonces sólo creíbles y aceptables cuando el t/R es igual o mayor que el 0.27. Un t/R de menos de 0.27 implicaría que el tronco hueco podría romperse sin ser predecible mediante los métodos V, SIA o SIM.

Lo cual da un poco más de credibilidad al famoso valor de 0.3 de Mattheck (que aparentemente ni siquiera fue de él, sino que lo cogió prestado de un autor anterior llamado Wagoner (1963)).

Es de suma importancia mencionar que estos cálculos no tienen en cuenta cavidades abier-

tas, aperturas en la pared residual y otros fallos estructurales que podrían estar presentes en la pared residual (lo cual es probablemente así en la mayoría de los casos). El tronco hueco se podría romper *antes* de llegar a la carga estimada de fractura, de existir estos fallos estructurales en la pared residual. Esto es: el árbol se rompería sin ser predecible.

Esto se añade a la ingente cantidad de evidencias que deberían relativizar las sugerencias publicadas por Detter et al. (2005), Wessolly y Erb (2016) y otros autores que apoyan el SIA y los SIM test de tracción, y otros métodos similares.

Los tipos de colapso estructural mencionados aquí, pueden ser observados y entendidos fácilmente después de haber trabajado un tiempo con árboles. Por eso es, que el sentido común debería ser un ingrediente vital de la evaluación de arbolado.

Protocolo

Basándose en los cimientos aquí ofrecidos, se podría proponer el siguiente protocolo que

Si el t/R es menor del 0,3 nos adentramos en una zona gris de colapsos estructurales impredecibles.

Se podría proponer que con un t/R de entre 0,2 y 0,3 la pared residual debería de gozar de un factor de seguridad del 250% (Eq.7), pero esto sería simplemente adivinar, sin base sólida que lo avale.

Las aperturas en la pared deberían ser pequeñas en comparación con la circunferencia del tronco (menos del 10%), ser redondas (para disminuir, dentro de lo posible, el riesgo de delaminación longitudinal debida al desplazamiento lateral de la concha bajo flexión) y estar bien delimitadas por una madera fuerte y vigorosa de compensación y de herida, con los bordes de esas aperturas de contornos suaves. Estos criterios disminuirían el riesgo de concentraciones de tensiones y colapsos (como el abrirse lateralmente de cavidades abiertas) que no son predecibles todavía por medio de la teoría de la viga (únicamente en la cual se basan los métodos V, SIA y SIM).

Por último, habría que tener en cuenta los límites de este protocolo y la compleja combinación de cargas y estructuras, pudiendo evaluarse esta última sólo visualmente, ya que no hay ni método instrumental ni software que lo pueda hacer todavía. Cabe mencionar que, naturalmente, para poder llevar a cabo este protocolo se necesita estar entrenado en su uso previamente.

La poda y el cableado deberían de considerarse también como una forma de prevenir el desgarrar de ramas principales del tronco hueco. Esto también reduciría el riesgo de fractura en zonas mecánicamente débiles a lo largo de las ramas. Las reducciones máximas en longitud de las ramas están alrededor de un 30%, ya que podar más podría conllevar una pérdida de vitalidad por la pérdida de superficie foliar correspondiente. Llevar a cabo una poda de reducción en etapas, y a lo largo de varias épocas de crecimiento, reduciendo gradualmente la longitud de las ramas, puede ser de ayuda para que el árbol sobrelleve mejor la pérdida de superficie foliar. La técnica de hacer fracturar la rama (fracture pruning), si hiciera falta una poda de reducción del más del 30%, también podría ser una solución en algunos casos. Un buen ejemplo de cómo la cantidad de poda estructural afecta las deformaciones en el tronco y las ramas principales causadas por la carga del viento se puede encontrar en Gilman et al. (2015). La poda y todas las demás intervenciones, deben ser sopesadas teniendo en cuenta el riesgo que un árbol puede suponer cara a producir daños a propiedades o personas.

El cableado también puede reducir las frecuencias de oscilación de ramas principales esbeltas, y el consiguiente colapso impre-

podría servir como criterio, hasta que se haya encontrado un método fiable para la evaluación del arbolado: si el árbol hueco tuviera una pared residual concéntrica y cerrada y sin fallos estructurales (lo cual, hay que admitirlo, no es muy común), sería razonable adoptar el criterio siguiente:

- Un ratio mínimo de t/R de 0,3 para prevenir los ya mencionados colapsos estructurales.
- Esta pared residual debería tener un factor de seguridad en cuanto al empuje del viento del 200% mínimo. Este factor se puede calcular mediante la ecuación 7 de Sterken (2006).

decible del árbol, durante eventos de cargas dinámicas de viento. Cablear partes estructuralmente defectuosas podría ser una buena opción si el árbol dispone todavía de la suficiente vitalidad tanto para compensar como para compartimentalizar y si el árbol entero se puede considerar como seguro después de las intervenciones. Sin embargo, esta técnica puede ser una peor opción si el árbol ya no tiene ni defensas ni capacidad de compensación. Además, las cargas dinámicas y estáticas en un árbol pueden ser tan severas, que concentraciones de tensiones y de energía destructiva lleven el árbol al colapso mientras que los cables sean incapaces de prevenirlo.

Y finalmente: algunas personas que favorecen algunos sistemas de cableado sintético y dinámico (como por ejemplo Wessolly y Erb 2016) exclaman que esos productos ayudan al árbol a compensar sus defectos, gracias a los dispositivos de absorción que llevan los cables. Pero esto todavía no se ha podido demostrar en revistas científicas, y su utilidad, cara a la compensación del defecto, sigue siendo una simple hipótesis.

La vitalidad de un árbol influye directamente en su capacidad para compartimentar hongos de pudrición y compensar zonas mecánicamente defectuosas y cargas experimentadas. Una evaluación de la vitalidad puede ser llevada a cabo

con la ayuda de varios métodos muy buenos, algunos de los cuales se mencionan a continuación:

- La evaluación visual del crecimiento en diámetro, las fisuras de crecimiento en la corteza y madera de compensación alrededor de zonas estructuralmente débiles.
- Roloff (2001) propone clasificar la vitalidad en cuatro fases, de acuerdo con los patrones de crecimiento (de los últimos 4-14 años) en la parte superior de la copa. Se aconseja estudiar igualmente las observaciones publicadas por Innes (1998) en cuanto a la propuesta de Roloff.
- Drénou et al. (2010) han incluso ido más allá con su método ARCHI. Ellos proponen un método objetivo para evaluar si la disminución de vitalidad es solamente temporal (el árbol todavía puede recuperarse y tener futuro) o si por el contrario el ejemplar ha entrado en una etapa irreversible y se encamina hacia su fin.

El grado de reversibilidad y su evaluación apropiada influyen directamente en las decisiones a tomar: las medidas de intervención y los recursos a destinar.

Por ejemplo: ¿realmente habría que emplear métodos caros cuando el árbol muestra una disminución irreversible de su vitalidad?

Vuelco

Está claro, y teniendo en cuenta los avances científicos publicados, que los métodos que pretenden evaluar el potencial de vuelco están todavía en sus inicios.

El 24 de agosto del 2017, un día sin viento alguno, se cayó un *Pinus pinea* de 12 metros sobre una calle muy concurrida de Plasencia. El árbol estaba muy sano y no se observaron síntomas de defectos. Se había volcado, levantando un cepellón de unos dos metros de diámetro. El suelo alrededor de las raíces estaba húmedo. El ejemplar se había desarrollado, sin embargo, en un parque con un césped bien irrigado. Por lo tanto, se podría razonar que en esta parte calurosa y árida de España, el pino podría haber desarrollado un sistema radicular poco profun-

do y muy cercano al tronco, al no haber tenido la necesidad de explorar el sustrato por agua y nutrientes. De acuerdo con Herms et al. (1997), la intensa fertilización de céspedes también induciría al árbol invertir menos en un sistema radicular estable. Lo cual significaría que el ejemplar preferiría invertir en crecimiento aéreo en vez de invertir en estabilidad radicular y una buena resistencia cara a agentes patógenos.

En términos de evaluación de riesgo de arbolado, esto podría entonces denominarse como "un factor de riesgo" o un posible "defecto". Sin embargo, razonar así llevaría a tachar todos los árboles en todos los espacios irrigados en España y el Mediterráneo como "peligrosos". Pensar así claramente no sería asumible desde la perspectiva de un gestor. Porque, ¿acaso se debería entonces considerar a millones de árboles como "inestables" y proponer su eliminación o costosos test instrumentales (cuyos resultados al parecer siguen siendo hipotéticos)? Esto no sería razo-

nable, aparte de dejar los parques mediterráneos y sus gentes sin árboles y sin dinero... Árboles y césped probablemente se deberían mantener separados en zonas calurosas y áridas.

La cuestión de evaluar el riesgo de vuelco es, así mismo, todavía una pregunta abierta y sin responder. Síntomas visuales de una estabilidad disminuida del sistema radicular pueden ser detectados a menudo. Pero, los árboles también pueden colapsar y caerse sin aviso previo.

Evaluación de palmeras

El método como publicado en Sterken (2008) y citado por Griffith et al. (2008) y Griffith et al. (2013) puede ser mejorado incorporando los avances publicados por Gonzalez y Nguyen (2015). Los dos métodos siguen la misma línea aunque la diferencia más notable está en que estos últimos calculan la deformación de la palmera teniendo en cuenta las variaciones en el módulo de elasticidad encontradas en cada

porción del estípite, mientras que en el primero se tuvo que asumir la igualdad del módulo de elasticidad a lo largo del estípite por razones de simplificación y abaratamiento del modelo. También las ecuaciones para la velocidad crítica del viento de Virost et al. (2016) podrían ser un punto de partida interesante para la evaluación del análisis estructural de palmáceas, ya que aquellas tienen en cuenta la energía elástica, las concentraciones de tensión y las cargas dinámicas por el viento.

El cablear la palmera a otras estructuras puede ser una opción, donde la carga del viento tiene que ser calculada. En Sterken (2008) se propuso un modelo matemático y una hipótesis sobre la evaluación visual de palmeras, con tal fin. Una propuesta anterior del mismo autor fue citada por Fischer (2005). Esta técnica de cablear y apoyar palmeras ya se ha llevado a cabo con éxito. Un ejemplo extraordinario fue publicado por Ivorra et al. (2015) que propusieron una es-

estructura de apoyo para una *Phoenix dactylifera* de varios brazos, catalogado por el Gobierno Valenciano por su singularidad, en Daya-Vieja (Alicante), citando que su análisis de carga de viento estaba basado en, y concordaba con, el de Sterken (2005).

Sin embargo, no hemos encontrado ninguna referencia científica en cuanto a datos y procedimientos empleados contrastados científicamente, que apoyen un método que sea capaz de evaluar si una palmera se puede romper o volcar. Por lo tanto, habría que proceder con sumo cuidado cuando se ofrezca "evaluación de la biomecánica de las palmeras"...

En cuanto al Picudo Rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*), varios métodos comerciales han sido desarrollados, tales como hongos antagonistas, microondas, pesticidas, etcétera... Lo curioso es que las revistas encontradas que han publicado métodos de lucha, no mencionan otros métodos que puedan ser válidos también. Y no hemos encontrado artículos que hayan evaluado todos los métodos existentes a la vez, pudiendo sugerir así mismo una forma concluyente de erradicar esta terrible plaga. Una plaga que fue introducido en Europa (en la costa sur de España, parece) a través de palmeras ilegalmente importadas desde los oasis infestados de Egipto, sobre las alas de la sempiterna avaricia humana.

Mitos versus observación

Es curioso observar, como muchos profesionales de la arboricultura mantienen ideas preconcebidas, que una vez publicadas son rara vez cuestionadas, sobre asuntos de gran importancia.

Para dar un ejemplo: la línea de goteo se mantiene como una gran verdad entre muchos profesionales, que, por inercia pura, sigue rondando. ¿Por qué el agua de la lluvia se tendría que caer en su mayor parte en la zona periférica de la copa, como si fuera un paraguas perfecto? Asumir esta idea, que en algunas ocasiones es si cierta, es asumir que gran parte del sistema radicular (el último aporta la resistencia mecánica cara al vuelo por agarre y fricción entre las raíces y el sustrato) se encuentra en la "línea de goteo". Sin embargo, cualquiera que se haya refugiado debajo de un árbol cuando llueve puede observar como gran cantidad de agua es recogida por las hojas y ramillas exteriores que, sucesivamente, va deslizándose hacia abajo por las ramas, ramas principales y tronco. Las raíces buscan agua, aparte de oxígeno y otras cosas. Y si gran cantidad acaba colándose en la tierra a través de la corteza, entonces podría ser posible que gran parte del sistema radicular se encuentre cerca del tronco. Y, esto podría influir directamente en su estabilidad cara al vuelco y su evaluación.

Aquellos incrédulos podrían experimentar con lo siguiente: en primer lugar, se podría intentar contar cuántos árboles realmente se asemejan a un "paraguas" que hace colar el agua de la lluvia en la zona de goteo (o sea: la franja exterior de la proyección horizontal de la copa). Encontrar muchos árboles así en las dehesas de Extremadura (en su mayoría pobladas con *Quercus suber*, *Quercus ilex* y *Quercus pyrenaica*) y otras partes de España y Portugal, sería una tarea muy difícil de realizar. Lo mismo para los incontables *Eucalyptus spp.* y las muchas otras especies arbóreas que se pueden encontrar. En segundo lugar, se podría cavar un poco al pie

de un olivo para plantar plantas pequeñas que necesiten de la sombra del olivo para sobrevivir en la parte ajardinada de una finca: encontrarán con mucha seguridad muchas raíces de absorción entre las raíces principales. Y tanto en zonas de secano como lugares irrigados.

Uno podría ahora protestar y decir que estas observaciones podrían ser sólo ciertas para zonas áridas, donde los árboles tienen que sacar el máximo provecho de la escasa lluvia (lo que invalidaría el mito de la “zona de goteo”, tan difundido por muchos arboricultores en países áridos).

Así que, se ofrecen los siguientes hechos científicos para los que gustan de evidencias contundentes: en Innes (1998) se describe este hecho observado en hayas (*Fagus sylvatica*), donde el agua que se fue escurriendo hacia abajo por la corteza lisa del tronco causó que gran parte de las raíces de los árboles estudiados en esa publicación se encontraran cerca del tronco. Su sistema radicular se concentraba alrededor de la base del árbol y a poca profundidad. Por lo cual cabría pensar en una menor estabilidad cara al vuelco de los ejemplares en comparación con un sistema radicular más distribuido y profundo.

Otro ejemplo tan difícil de erradicar en el mundo de la arboricultura, es el decir que las ramas con corteza incluida "se empujan a sí mismas hacia fuera debido al crecimiento en diámetro" y que por ello se caen. Pero... si existe la formación de madera de compensación por parte del árbol para contrarrestar las tensiones que él mismo percibe (tigmomorfogénesis o perturbación mecánica), ¿no estaría el árbol entonces tranquilamente compensando ese "empuje" en el caso que eso existiera? Aceptar lo primero y lo segundo es contradecirse a voces. Y puesto que la tigmomorfogénesis es un fenómeno que realmente existe, el "empuje" podría ser sólo un mito.

Es curioso observar, como muchas veces la simple observación y el sentido común quedan superados a ideas preconcebidas, conllevando tanto interpretaciones equivocadas como actuaciones erróneas en "la cultura del árbol" o arboricultura.

Conclusión

Creemos ensayos de ciencia famosos como Huxley (1890) o Descartes (1637), deberían ser aún literatura obligada. El primero decía que algunas personas confeccionaban, divulgaban y vendían, sin esfuerzo aparente, una mezcla maravillosa hecha de unas verdades sanas y de una ficción muy insalubre. Y hace 380 años, Descartes en su "Discurso sobre el método" describía cómo oradores virtuosos vendían pseudociencia a personas poco críticas, con los últimos intentando trepar hacia arriba como la hiedra alrededor de los primeros. Habría que evitar que esto se pueda decir de la arboricultura en el futuro.

La extraordinaria inteligencia humana ha sido capaz de alcanzar los objetivos más increíbles en la ciencia: en la astronomía, la aeronáutica, la tecnología, la medicina,... Pero nadie dentro de la arboricultura ha sido capaz todavía de desarrollar un método, que sea fiable, para el análisis de estabilidad estructural de arbolado y palmeras. Además, la ciencia debería ser la búsqueda de la verdad y debería evitar convertirse en un vehículo para el lucro desmesurado y la obtención de fondos (sin ánimo de acusar a nadie aquí).

La mayoría de la gente dedicada a la arboricultura hace, día a día, un trabajo maravilloso. Sin embargo, la persistencia de mitos y el desconocimiento general en cuanto a avances pioneros en las ciencias multidisciplinarias como la forestal, la pomología y fruticultura en general, la hidrología, la meteorología, la ingeniería eólica y las matemáticas, entre otras, obstruyen todavía una visión real en cuanto a la evaluación del arbolado.

Por ello, el autor de estas líneas a veces se detiene a pensar en lo siguiente: *"Si los seres humanos fueran árboles o si el campo científico de la medicina sufriera de los mismos malos de los que sufre la arboricultura, el ser humano se habría borrado ya de la faz de la tierra por una simple gripe."*

AGRADECIMIENTOS

Este artículo está dedicado a Extremadura y a sus gentes, que siempre nos han acogido calurosamente.

Un abrazo enorme para nuestro padre y excelente viverista Jan Sterken, por habernos infectado con el "virus de la arboricultura". También quisiéramos expresar nuestra gratitud hacia Wim Peeters, lector en arboricultura en Bélgica, por revisar el manuscrito y por sus extraordinarios comentarios constructivos.

Igualmente, se agradece la ardua labor de revisión del equipo de esta revista.

REFERENCIAS

- Baker, C.J. & Bell H.J. 1992. The aerodynamics of urban trees. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Elsevier, 41-44: 2655-2666
- Bond, J. 2006. Foundations of tree risk analysis: Use of the t/R ratio to Evaluate Trunk Failure Potential. *Arborist News*. International Society of Arboriculture. December issue: 31-34
- Claire, B., M. Fournier, M. Franc, O. Prevost, J. Beauchene & S. Bardet. 2003. Biomechanics of buttressed trees. *American Journal of Botany* 90(9): 1349-1356.
- Descartes, R. 1637. *Discours de la méthode*. Pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences.
- Detter A., E. Brudi & F. Bischoff. 2005. Statics Integrated Methods: results from pulling tests in past decades. *Congreso Barcelona* (Asociación Española de Arboricultura).
- Drénou, C., Bouvier M. y Lemaire J. 2010. La méthode de diagnostic ARCHI – Application aux chênes pédonculés dépérissants. *Forêt-Entreprise* Nr. 200.
- Ennos, R. & A. van Casteren. 2009. Transverse stresses and modes of failure in tree branches and other beams. *Proceedings of the Royal Society B*. 277: 1253-1258
- Fischer, J. B. 2005. Biomechanics and vascular system of the stem of Phoenix and other palms. A review of how the palm stem develops and functions. *Fairchild Tropical Botanic Garden*. Coral Gables (Miami), Florida, USA.
- Fournier M., J. Dlouhá, G. Jaouen y T. Almeras. 2013. Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strength. *Journal of Experimental Botany*. Vol 64, No 15: 4793-4815.
- Gilman, E.F. J.W. Miesbauer y F.J. Masters. 2015. Structural pruning effects on stem and trunk strain in wind. *Arboriculture & Urban Forestry* 41(1): 3-10.
- Gonzalez, O.M. & K.A. Nguyen. 2015. Senile coconut palms: Functional design and biomechanics of stem green tissue. *Wood Material Science & Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2015.1048480>
- Griffith, M. P., LR Noblick, JL Dowe y CE Husby, MA Calenje. 2008. Cyclone tolerance in
- New World Arecaceae: biogeographic variation and abiotic natural selection. *Annals of Botany* 102 (4): 591-598.
- Griffith, M. P., E Witcher, LR Noblick y CE Husby. 2013. Palm Stem Shape Correlates with
- Hurricane Tolerance, in a Manner Consistent with Natural Selection. *Palms*. Vol. 57 Issue 3, p115-122.
- Gruber, F. (2008) Untenable failure criteria for trees: I. The residual wall thickness rule. *Arboricultural Journal*, 31:1, 5-18, DOI: 10.1080/03071375.2008.9747514
- Herms, D. y Matson, W. 1997. Trees, stress and pests, in *Plant Health Care for Woody*
- Ornamentals, ISA, Champaign, Illinois pp 13 – 25.
- Huang Y.S., F.L. Hsu, Lee C.M. y J.Y. Juang. 2017. Failure mechanism of hollow tree trunks due to cross-sectional flattening. *R. Soc. open sci.* 4: 160972. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.160972>
- Huxley, T. H. 1890. *Natural Rights and Political Rights*. Collected Essays I.
- Innes, J. L. 1998. An assessment of the use of crown structure for the determination of the health of beech (*Fagus sylvatica*), *Forestry*, Vol. 71, No. 2: 113-130
- Ivorra, S., J. Alvado y M. A. Crespo. 2015. *Steel Pedestrian Bridge to Protect a Unique Tree*. Universidad de Alicante. España.
- James, K.R., G.A. Dahle, J. Grabosky, B. Kane, & A. Detter. 2014. Tree Biomechanics Literature Review: Dynamics. *Arboriculture & Urban Forestry* 40(1): 1-15
- James, K. R. (2010). A dynamic structural analysis of trees subject to wind loading. PhD thesis, Melbourne School of Land and Environments, The University of Melbourne.
- Li, Q.S., L. Zhi y F. Hu. 2010. Boundary layer wind structure from observations on a 325 m tower. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Elsevier, 89: 818-832
- Mattheck C., K. Betge y O. Kraft. 2008. Are the failure criteria of SIA (Statics Integrated Assessment) and pulling tests wrong? *Arboricultural Journal*. Vol. 31, pp. 181-188
- Niklas, K.J & H. Spatz. 2010. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*. 97(10): 1587-1594
- Peltola, H.M. 2006. Mechanical stability of trees under static loads. *American Journal of Botany* 93(10): 1501-1511
- Reference Manual On Scientific Evidence 2nd Ed. Federal Judicial Center, 2000. Bajado de: <http://air.fjc.gov/public/fjcweb.nsf/pages/16>
- Roloff, A. 2001. *Baumkronen, verständnis un praktische bedeutung eines komplexen naturphänomens*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, Alemania.
- Slater D. & C. Harbinson. 2010. Towards a new model of branch attachment. *Arboricultural Journal* 2010 Vol. 33, pp. 95-105
- Spatz, H.C. & J. Pfisterer. 2013. Mechanical Properties of Green Wood and Their Relevance for Tree Risk Assessment. *Arboriculture & Urban Forestry* 2013. 39(5): 218-225
- Sterken, P. 2005. A guide for tree-stability analysis. Second and expanded edition. ISBN: 9090193774
- Sterken, P. 2006. Prognosis of the development of decay and the fracture-safety of hollow trees. *Arboricultural Journal*, 29:4: 245-267.
- Sterken, P. 2008. Modelización de la estabilidad de arbolado y palmeras. *Foresta* 38: 59-67
- Sterken, P. 2008. La Estabilidad Elástica de las Palmeras. *PARJAP. Revista de la Asociación Española de Parques y Jardines Públicos*. Nº50: 17-30.
- Vanomson, P. 2006. Der Einfluss der Durchforstung auf die Verankerung der Fichte hinsichtlich ihrer Sturmresistenz. Tesis doctoral.
- Virost, E., A. Ponomarenko, E. Dehandschoewercker, D. Quéré & C. Clanet. 2016. Critical wind speed at which trees break. *Physical Review E* 93, 023001
- Wagener, W.W. (1963) Judging Hazard from Native Trees in California Recreational Areas: – A Guide for Professional Foresters. USFS Research Paper PSW-PL. 29pp.
- Wessolly, L. & M. Erb. 1998. *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. PatzerVerlag, Berlin, Alemania.
- Wessolly L & M. Erb. 2016. *Manual of tree statics and tree inspection*. Patzer Verlag. Berlin, Alemania.