

ENSAYO DE ÁRBOL CÍTRICO MODELO EN TÚNEL DE VIENTO

José Cataldo^a, Rodolfo Pienika^a, Pablo Pais^a, Alfredo Gravina^b,

^a *Grupo de Eolodinámica, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República Oriental del Uruguay, J. H. y Reissig 565, 11300 Montevideo, Uruguay, jcataldo@fing.edu.uy, <http://www.fing.edu.uy/imfia>*

^b *Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay, Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay*

Palabras Clave: frutos cítricos, daño por viento, turbulencia, pequeñas escalas, túnel de viento.

Resumen. En este trabajo se presenta un análisis llevado a cabo en un túnel de viento atmosférico de interacción entre el viento y un árbol de cítricos. Se simularon flujos atmosféricos con velocidades medias entre 1 m/s y 3 m/s con turbulencia de diferentes contenidos energéticos de pequeña escala. La modelación del flujo atmosférico se realizó utilizando rejillas y grillas de diversas dimensiones. Se encontró que para un flujo con determinada velocidad media de viento, si el contenido energético de las pequeñas escalas de la turbulencia resulta elevado (en términos del parámetro de las pequeñas escalas de la turbulencia mayor a 3000), se registra un mayor movimiento de las hojas respecto a si dicho contenido resulta bajo (parámetro anterior inferior a 1000). Al haber un mayor movimiento de las hojas se incrementa el tiempo durante el cual las hojas se alejan de los frutos. El movimiento de las partes del árbol de grandes dimensiones como tronco y ramas no presentan un cambio sensible en su movimiento ante el cambio en el contenido energético de las pequeñas escalas de la turbulencia. Este comportamiento descrito llevaría a sugerir que en flujos de elevado contenido de energía en las pequeñas escalas de la turbulencia, se reduciría el tiempo en que hojas y frutos están en contacto y, por lo tanto, se reducirían las solicitaciones mecánicas que darían lugar a laceraciones en la envoltura de los frutos. Como consecuencia se reduciría el daño exterior de los frutos.

1 INTRODUCCION

En Uruguay, entre el 10% y 40% del daño de frutos cítricos es causado por la acción del viento, lo que resulta en el descarte de las frutas para exportación, provocando grandes pérdidas económicas (Gravina, 1998; Martínez, 1995). Las principales fuentes de dicho daño, que afecta la apariencia de la fruta, son los golpes, el frotamiento y los cortes producidos por ramas y hojas moviéndose debido al viento, dejando manchas y cicatrices en la piel del fruto.

En 2004, el Departamento de Producción Vegetal de la Facultad de Agronomía, junto con el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería, ambos de la Universidad de la República – Uruguay, comenzaron un programa de investigación con el principal objetivo de describir el daño por viento en cítricos, desde los puntos de vista físico y biológico. Como resultado, se diseñó un sistema de protección y se desarrolló un modelo teórico para describir el movimiento de las distintas partes de un árbol. En particular fue necesario entender los mecanismos de interacción entre el viento y los árboles.

Según Green (1968), el daño en frutos cítricos causado por el viento, está asociado a elevados valores de velocidad media (mayores a 5 m/s). Para solucionar este problema, los productores generalmente instalan mallas vivas de protección (Owen-Turner & Hardy, 2006), que consisten en filas de árboles altos (eucaliptus o casuarinas) situados alrededor de los cuadros de plantación. Estas mallas disminuirían la velocidad media, sin embargo, esta estrategia no implica realmente una reducción en el porcentaje de fruta dañada. En forma alternativa, otros productores utilizan mallas plásticas con pequeños orificios (Freeman, 1976; Green, 1968; Owen-Turner & Hardy, 2006), pero tampoco se obtienen buenos resultados.

A partir de observaciones del movimiento de los árboles, se podrían identificar diferentes escalas de movimiento, asociadas a las hojas, ramas y troncos. A su vez, estas escalas de movimientos se podrían asociar al daño producido en diferentes etapas de crecimiento de los frutos. En frutos jóvenes (de tamaños menores a 1 cm) sus pieles presentan irregularidades en las cuales las hojas adyacentes tienden a frotar (movimiento de pequeña escala). Mientras que en frutos adultos (de tamaños mayores a 3 cm) el daño estaría asociado al movimiento de las ramas (de gran escala) que golpean los frutos. El daño producido en las primeras etapas de crecimiento ha sido reconocido como el más importante, como se menciona en Brodrick (1970), Campbell (1967), Dodson (1966), Freeman (1976) y Gravina et al. (2005). Por lo tanto resulta importante describir la interacción entre el viento y las hojas.

Varios autores han estudiado y descrito las grandes escalas de la turbulencia generadas por la interacción entre el viento y los árboles, entre los cuales se puede citar a Brunet et al. (2003), Finnigan & Brunet (1995), Gardiner (1995), Ruck & Adams (1991), Scarabino (2005) y Shaw (2006). Sin embargo las grandes escalas de la turbulencia estarían asociadas a movimientos de los árboles de gran escala. La interacción entre el viento y las hojas de los árboles, especialmente el efecto de la turbulencia de pequeña escala a bajas velocidades medias, es pocas veces reportada.

Una primera parte del programa de investigación fue dedicado a la caracterización del flujo dentro de un cuadro de plantación de frutos cítricos (Cataldo & Pienika, 2008). Luego se estudió el movimiento de las hojas bajo la acción del viento, mediante ensayos en un túnel de viento. En el presente artículo se describen dichos ensayos y los resultados obtenidos.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del modelo

Se obtuvo de una de las quintas estudiadas una planta joven de naranjas ‘Navelate’. La altura y el ancho del follaje se seleccionaron de manera que la planta pudiera ser instalada en la zona de trabajo del túnel de viento. El túnel del IMFIA es de tipo capa límite atmosférica, en succión y abierto, cuya zona de trabajo posee una sección recta de 2.25m de ancho y 2.10m de alto. Se presenta en la [Figura 1](#) una imagen de la planta modelo dentro del túnel de viento.

La planta tiene una altura de 106 cm aproximadamente, medida desde la base del tronco (superficie de tierra en la cual se encuentra plantada) hasta la parte superior de la copa. Su tronco presenta un diámetro que varía desde 31.8 mm próximo a la base, hasta 16.3 mm próximo a la copa. Posee varias ramas con diámetros que van desde 4.7 mm a 12.1 mm. Sus hojas también presentan una variada gama de tamaños, siendo las más pequeñas de 50 mm de largo y 28.6 mm de ancho máximo, y las más grandes de 157 mm de largo y 89 mm de ancho máximo.

Se observa que la relación de alturas entre esta planta y los árboles de las quintas es de 1:3, mientras que el tamaño de las hojas no presenta diferencias significativas con el de las hojas de los árboles de las quintas.



Figura 1: Imagen del modelo dentro del túnel de viento

2.2 Simulación del flujo turbulento

El trabajo experimental que se llevó a cabo en el túnel de viento tuvo como principal objeto describir el mecanismo a través del cual las hojas se mueven y se deforman por acción del viento.

Como es sabido, la modelación de flujos turbulentos atmosféricos presenta como principal limitación el que se deba simular una corriente de aire con otra corriente del mismo fluido. Por otro lado, las dimensiones de la instalación resultan una fuerte restricción a la simulación de flujos turbulentos atmosféricos. Los flujos turbulentos se caracterizan por presentar en su seno estructuras turbulentas de muy diversa escala de longitud y de tiempo ([Tennekes & Lumley, 1972](#); [Pope, 2000](#)).

Tal como se mencionara en el capítulo anterior, el árbol modelo, si bien presenta una altura, ancho y troncos que representarían un árbol real a escala geométrica 1:3, las hojas estarían simuladas a escala de prototipo es decir 1:1. Por tal motivo, el árbol constituye un modelo a escala distorsionado de un árbol típico encontrado en una quinta de cítricos.

En la medida que se busca analizar el movimiento de las hojas, más que del tronco y ramas, y conociendo las restricciones que se tienen en la simulación de flujos atmosféricos, se

priorizó la adecuada simulación de las estructuras turbulentas del flujo atmosférico que interactúan principalmente con las hojas, sin perjuicio de lo cual se verificaron todas las escalas de la turbulencia modeladas.

En este análisis se van a denominar como grandes escalas de longitud de la turbulencia, la de las estructuras turbulentas de dimensiones similares a las ramas y mayores, en tanto que se denominarán pequeñas escalas, las escalas de longitud de la turbulencia con dimensiones del orden del tamaño de las hojas y menores.

Del análisis espectral de la turbulencia en las quintas de cítricos estudiadas (Cataldo & Pienika, 2008; Cataldo et al., 2011), se dedujo previamente que los valores del parámetro de las pequeñas escalas (definido por Melbourne (1979) y presentado en la Ec. 1, donde λ_{ss} es la escala de longitud de las estructuras de la turbulencia del orden del tamaño de las hojas, f_{ss} y S_u son la frecuencia y el contenido energético de dichas estructuras respectivamente, y \bar{U} es la velocidad media del flujo) se agrupan en 2 franjas. La primera con valores del parámetro entre 800 y 2000, y la segunda franja que va desde 3000 a 5000. De este análisis también resultó que el flujo presenta una escala integral que es del orden del alto de los árboles en la quinta, siendo este de entre 2.5 m y 3.5 m. Interesa por lo tanto, simular flujos turbulentos cuyo valor del parámetro de las pequeñas escalas se encuentre dentro de alguna de estas franjas. Interesaría también, aunque menos relevante, obtener escalas de turbulencia del orden del alto del árbol modelo, es decir de aproximadamente 1 m.

$$S = \frac{\text{energía}(\lambda_{ss})}{\text{energía}(\text{flujo medio})} = \frac{f_{ss} S_u(f_{ss})}{\bar{U}^2} \quad (1)$$

Se ensayaron diversos sistemas de producción de turbulencia en el túnel de viento, a los efectos de modelar el flujo turbulento dentro de una quinta de cítricos. En todos los sistemas está presente una malla de cierto paso y porosidad, ubicada a una determinada distancia corriente arriba de la zona donde se ubica la planta, para generar el efecto deseado (Batchelor, 1960; Groth & Johansson, 1988; Richardson, 1989; Richardson & Richards, 1995; Farrell & Youssef, 1992). Se desea estudiar el comportamiento del árbol y sus componentes, especialmente las hojas, en flujos de distinta velocidad media. Se seleccionaron dos valores de velocidad media, una primera cercana a 1 m/s y otra cercana a 3 m/s.

Para caracterizar el flujo en el túnel de viento, incidente sobre los árboles, se midió la velocidad en nueve puntos ubicados en un plano normal al flujo y ubicado inmediatamente corriente arriba de la posición donde se instalaría el árbol, y ordenados en una grilla. Esta grilla se posiciona en la zona que ocuparía la copa del árbol a instalar en el túnel, o sea donde se encuentra la mayor cantidad de hojas.

La velocidad se midió con un anemómetro de hilo caliente marca TSI, modelo IFA100 de tres canales. Se utilizó una probeta tipo acodada. Se posicionó el sensor del anemómetro en los distintos puntos mediante una lanceta movida por un robot posicionador de cuatro grados de libertad, que opera en coordenadas polares. Mediante el uso de un programa desarrollado en el IMFIA, se procesaron los datos, habiéndose obtenido valor medio, media cuadrática y se calcularon los espectros según se describe en Newland (1984). A partir de los espectros, se dedujeron parámetros significativos de la turbulencia como ser la escala de longitudes integral longitudinal (Tennekes & Lumley, 1972) y la energía contenida en las pequeñas escalas de longitud (Melbourne, 1979).

Un primer sistema de simulación está conformado por una malla de 380 mm de paso, de barras de sección rectangular de 120 mm de ancho, ubicada a 165 cm aguas arriba de la grilla, como se muestra en la Figura 2. Este sistema, se utiliza para modelar un flujo en el cual el espectro presenta en las pequeñas escalas una alta energía, con valores del parámetro de las pequeñas escalas entre 4236 y 6513. La intensidad de la turbulencia presenta un valor

promedio de 30% y la escala integral es del orden de 5 cm.



Figura 2: Sistema de simulación de alta energía turbulenta en las pequeñas escalas

Un segundo sistema de simulación está conformado por una malla de 125 mm de paso, de barras de sección circular de 25 mm de diámetro, ubicada a 165 cm aguas arriba de la grilla y 6 agujas (“spires”) de forma triangular, de 132 cm de alto y de 32.7 cm de base distribuidas de manera equidistantes entre sí, y 66 cm aguas arriba de la malla. Este sistema, que se muestra en la [Figura 3](#), modela adecuadamente un flujo en el cual el espectro presenta en las pequeñas escalas una baja energía, ya que se obtuvieron valores del parámetro de las pequeñas escalas entre 671 y 2216. La intensidad de la turbulencia presenta un valor promedio de 18% y la escala integral es del orden de 7 cm.



Figura 3: Sistema de simulación de baja energía turbulenta en las pequeñas escalas

Resultó difícil obtener una escala integral de la turbulencia del orden de la altura del árbol. De todos modos, esto no se consideró un impedimento a los efectos de utilizar los sistemas descritos anteriormente para estudiar el movimiento de las hojas.

2.3 Medición de deformación

Para medir la deformación en las ramas y hojas del árbol se adhirieron medidores de deformación extensiométricos (strain gages) a las mismas. Cada strain gage se conecta eléctricamente en una rama de un puente de Wheatstone equilibrado, es decir en el esquema de cuarto puente. Cuando la componente del árbol a la que se encuentra adherida la strain gage se deforma, la resistencia de la strain gage varía, lo que hace que el puente registre un desequilibrio. Esta señal de voltaje, que se relaciona con la deformación unitaria, es adquirida por un adquisidor marca National Instruments.

Este sistema consiste en un chasis, modelo NI SCXI-1000 al que se acoplan un acondicionador de señales modelo NI SCXI-1600, un transductor modelo NI SCXI-1122 al que se conecta un terminal modelo NI SCXI-1322 que consta de 16 canales en donde se conectan las strain gages. En el presente ensayo se utilizan sólo 5 canales, los cuales son calibrados previamente a la medición.

Se conectan 4 strain gages al árbol, una en el tronco, dos en distintas ramas secundarias y la restante en el pecíolo de una hoja. Se somete al árbol a distintos flujos turbulentos y se adquieren, simultáneamente, datos de deformación con el equipo de National Instruments, y de velocidad de viento en la copa del árbol, con el anemómetro TSI.

Las componentes del árbol analizadas tienen las siguientes características geométricas: El tronco se supone cilíndrico de sección transversal circular de 16.8 mm de diámetro medio y 375 mm de largo. La rama secundaria 1 se supone cilíndrica de sección transversal circular de 7.65 mm de diámetro medio y 200 mm de largo. La rama secundaria 2 se supone cilíndrica de sección transversal circular de 9.15 mm de diámetro medio y 200 mm de largo. El pecíolo de una hoja se supone cilíndrico de sección transversal circular de 3.1 mm de diámetro medio y 32 mm de largo. Dicha hoja tiene un largo de 153 mm y un ancho máximo de 89 mm.

Adicionalmente, se adhiere una strain gage a una pieza de madera, la cual está libre de deformación durante el ensayo, pero sometida a la misma variación de temperatura que las restantes strain gages. Dicha strain gage opera como la referencia, corrigiéndose con esta lectura el valor de cero de las 4 strain gages.

Para la adquisición de datos de deformación se usa una frecuencia de muestreo de 400 Hz, y se obtienen 65536 datos para cada strain gage, lo cual significa una medición de 163.84 segundos. Para los valores de velocidad se utiliza una frecuencia de 1000 Hz y se obtienen 65536 muestras.

2.4 Método de cálculo de la deflexión

Para obtener la deflexión de los diferentes componentes del árbol, a partir de las medidas realizadas con las strain gages y el adquisidor de National Instruments, se sigue el procedimiento que se describe a continuación.

En primer lugar, se calcula el valor de tensión correspondiente a deformación nula (cero), el cual se obtiene a partir de la indicación del puente de Wheatstone, sin imponerle deformación a las strain gages. Esta medición se efectúa tanto al comenzar la medición como al finalizarla, y luego se calcula la media de estas indicaciones. Este último valor de tensión se toma como correspondiente a deformación nula (cero). Tal medición es efectuada también sobre una strain gage de referencia que se instala en una pieza de madera que, si bien es sometida a un intercambio de calor similar al que experimentan las strain gage instaladas sobre el árbol, permanece sin deformación a lo largo de todo el ensayo.

Para cada condición de ensayo se hace la medición de la indicación del sistema correspondiente a cada strain gage, incluida la de referencia. Se hace la hipótesis de que todas las strain gage sufren el mismo corrimiento de cero. Este corrimiento se calcula a partir de la

indicación de la strain gage de referencia, con el cual se corrige el cero de todas las strain gage. Para cada strain gage, restando de la lectura de la indicación el valor de cero corregido, se obtiene una tensión que resulta vinculada a la deformación que sufre la misma.

Luego se aplica la ecuación de cálculo de deformación unitaria (en $\mu\text{m/m}$) a partir del voltaje medido (Ec. 2).

$$\varepsilon = \frac{-4.Cte.}{GF.(1+2V/V_{ex})} \cdot \frac{V}{V_{ex}} \cdot \left(1 + R_i/R_{SG}\right) \times 10^6 \quad (2)$$

Donde:

ε es la deformación unitaria, medida en microstrain ($\mu\text{m/m}$),

Cte. es la constante de calibración del canal utilizado del adquisidor,

GF es el “Gage Factor” o factor de la strain gage (en este caso vale 2.14),

V es la medida en Voltios obtenida por el adquisidor,

V_{ex} es el voltaje de excitación del puente de Wheatstone (en este caso es 3.33V),

R_i es la resistencia eléctrica del cable que conecta la strain gage con el adquisidor (en el ensayo vale 0.785Ω),

R_{SG} es la resistencia eléctrica de la strain gage (en este ensayo es 350Ω).

A partir de los datos de deformación unitaria medidos con las strain gages (en $\mu\text{m/m}$), se calcula la deflexión en la componente del árbol estudiada (en mm). Para ello es necesario conocer la relación existente entre la deformación unitaria (ε) y la deflexión (δ) de cada una de las componentes del árbol que se ensaya. Se asume que la relación es lineal y la recta se aproxima mediante pares de valores medidos durante el ensayo de calibración, aplicando distintas fuerzas conocidas sobre el elemento y midiendo la deflexión, obteniéndose así una función $\delta = f(\varepsilon) = m \cdot \varepsilon + n$.

En la [Tabla 1](#) se detallan los parámetros *m* y *n* para cada componente.

Parte del árbol	<i>m</i>	<i>n</i>
Tronco	1.29×10^{-2}	1.84×10^{-2}
Ramas secundarias	1.31×10^{-2}	-7.24×10^{-2}
Pecíolo	-2.91×10^{-1}	1.2

Tabla 1: Parámetros de relación lineal entre deformación unitaria y deflexión

Donde la deflexión δ se expresa en mm y la deformación unitaria ε en mm/m.

Luego, la componente fluctuante de la deflexión (δ'), se calcula mediante la [Ec. 3](#).

$$\delta' = \delta - \delta_m = f(\varepsilon) - f(\varepsilon_m) \simeq \frac{df}{d\varepsilon} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_m) \quad (3)$$

Donde δ_m es la deflexión media, $f(\varepsilon_m)$ es la función que relaciona a la deformación unitaria con la deflexión evaluada en ε_m que es la deformación unitaria media, $\frac{df}{d\varepsilon}$ es la derivada de la función $f(\varepsilon)$.

Posteriormente, se calcula y grafica la densidad espectral de las fluctuaciones de deflexión. Por otro lado, se calcula y grafica la densidad espectral de la componente fluctuante de la velocidad del viento, medida simultáneamente con la deformación en un punto sobre la copa del árbol.

2.5 Cálculo de frecuencias propias

Se realizó un ensayo para determinar las frecuencias propias de las diferentes componentes

del árbol. La curva de deformación en función del tiempo (Figura 4) presenta una forma sinusoidal amortiguada y la frecuencia de las ondas corresponde a la frecuencia propia de tal componente. De las mismas curvas también puede deducirse la razón de amortiguamiento de cada componente. Ambos parámetros se resumen en la Tabla 2.

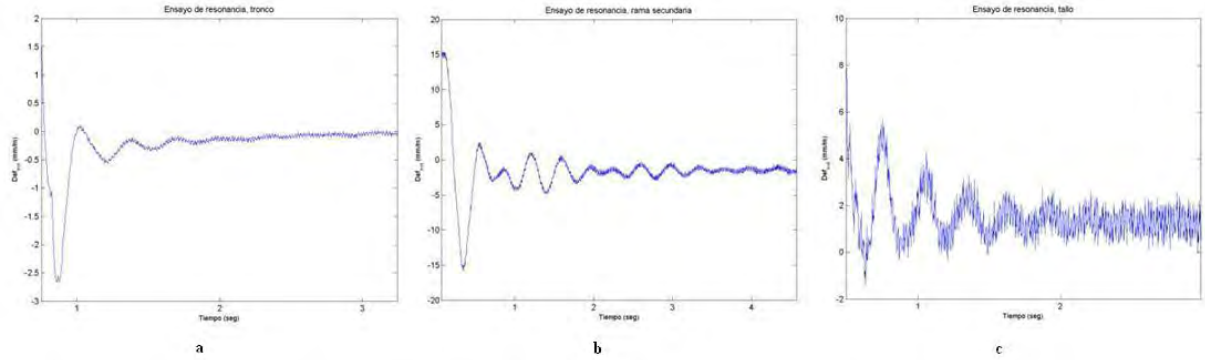


Figura 4: Evolución en el tiempo de la deformación de a) tronco, b) ramas secundarias, c) pecíolo

Parte del árbol	Tronco	Ramas secundarias	Pecíolo
f_{res} (Hz)	1.7	3.3	3.7
ξ (coef. de amort.)	0.144	0.093	0.078

Tabla 2: Frecuencia de resonancia y coeficiente de amortiguamiento

2.6 Relación entre el espectro de deformación y el espectro de velocidad

En Holmes (2001) y Simiu & Scanlan (1986) se proponen relaciones teóricas que vinculan el espectro de las fluctuaciones de la deformación con el espectro de las fluctuaciones de velocidad, para un sistema de un grado de libertad, el cual se podría concebir compuesto por una masa, un resorte y un amortiguador. Dicha relación está expresada en la Ec. 4.

$$S_x(f) = \frac{1}{k^2} |H(f)|^2 \frac{4\bar{D}^2}{\sigma^2} \chi^2(f) S_u(f) \quad (4)$$

Donde k es la constante elástica del elemento que se analiza, $H(f)$ se conoce como la admitancia mecánica (Ec. 5) del sistema dinámico de un grado de libertad, \bar{D} es el valor medio de la fuerza que realiza el flujo de velocidad media \bar{U} sobre el elemento, y $\chi(f)$ es la admitancia aerodinámica (Ec. 6).

$$|H(f)|^2 = \left\{ \left[1 - \left(\frac{f}{f_{res}} \right)^2 \right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{f}{f_{res}} \right)^2 \right\}^{-1} \quad (5)$$

$$\chi^2(f) = \left\{ 1 + \left(\frac{2f\sqrt{A}}{\sigma} \right)^{4/3} \right\}^{-2} \quad (6)$$

Donde A es el área frontal del cuerpo sometido al flujo turbulento.

Debe destacarse que las diferentes componentes de un árbol resultan sistemas elásticos amortiguados pero con infinitos grados de libertad y no con un solo grado de libertad como el que se siguió para ilustrar el planteo. Sin perjuicio de ello, el planteo efectuado es válido para este tipo de sistemas, es decir con infinitos grados de libertad, en particular si el mismo oscila en su modo fundamental (Schindler et al., 2009).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la [Figura 5](#) y [Figura 6](#) se presentan curvas de densidad espectral de la velocidad (línea negra) conjuntamente con la curva de densidad espectral de la fluctuación del movimiento (puntos rojos), para el peciolo y el tronco, respectivamente.

En cada figura, a partir de la comparación de ambas curvas se aprecian los efectos de las admitancias mecánica y aerodinámica. Se puede apreciar un pico en las curvas de densidad espectral de la fluctuación de la deformación, que siguiendo el modelo teórico mencionado anteriormente, correspondería a la frecuencia propia de cada componente.

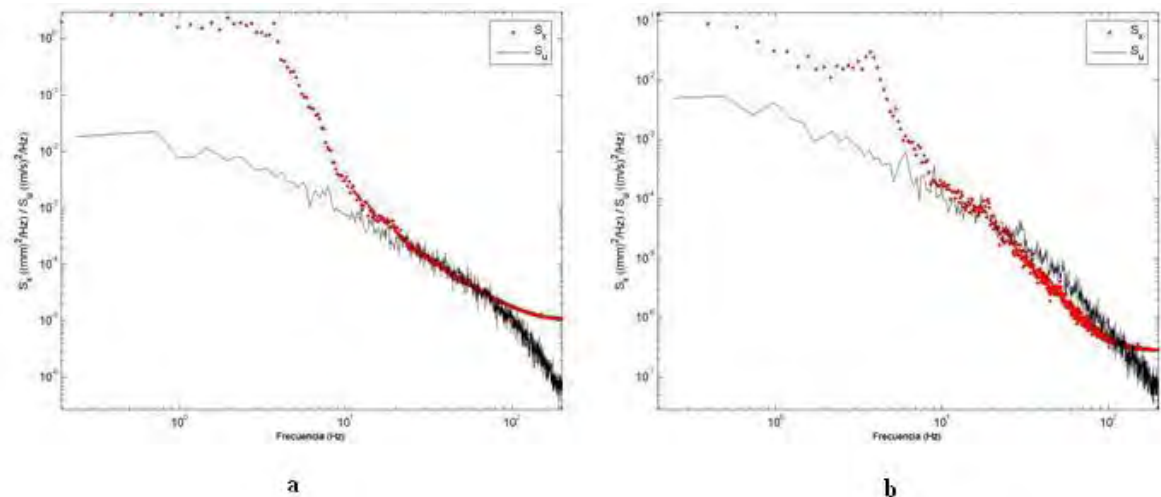


Figura 5: Espectro de velocidad y de deflexión del peciolo, a 1m/s con alta energía (a) y baja energía (b).

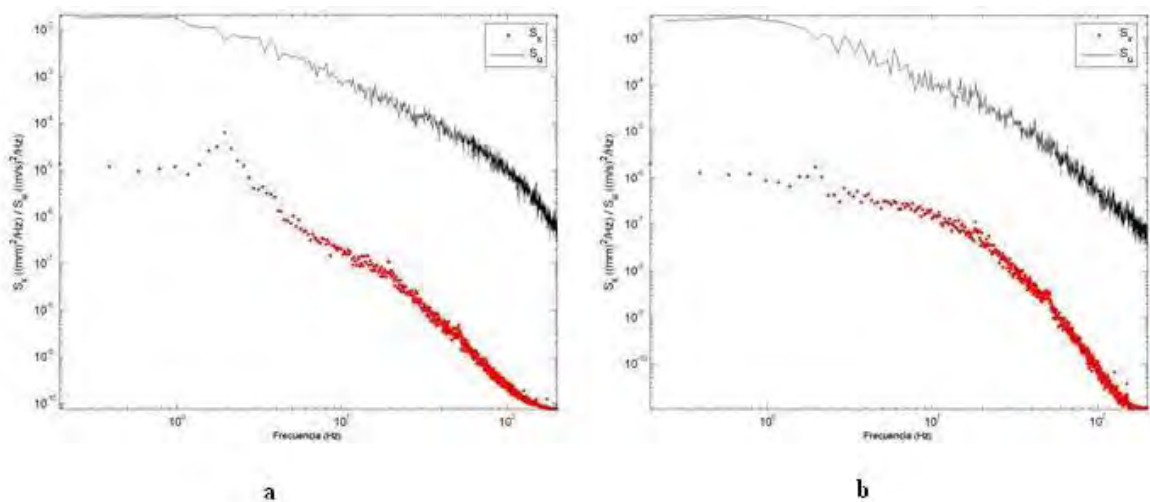


Figura 6 Espectro de velocidad y de deflexión del tronco, a 1m/s con alta energía (a) y baja energía (b).

En las [Tabla 3](#) y [Tabla 4](#) se muestran los valores de frecuencias propias, estimados a partir de las curvas de densidad espectral, y de la media cuadrática de la deformación (σ_x^2), para cada componente del árbol estudiada, parametrizados con la velocidad media (\bar{U}), la media cuadrática de la velocidad (σ_u^2) y el parámetro de las pequeñas escalas (\mathcal{S}). La [Tabla 3](#) corresponde al ensayo de baja energía, mientras que la [Tabla 4](#) al ensayo de alta energía.

\bar{U} (m/s)	1 m/s		2 m/s		3 m/s	
$\sigma_u^2(m/s)^2$	0.021		0.0932		0.212	
\bar{S}	1116		1075		1126	
Parte del árbol	$f_{res}(Hz)$	$\sigma_x^2(mm)^2$	$f_{res}(Hz)$	$\sigma_x^2(mm)^2$	$f_{res}(Hz)$	$\sigma_x^2(mm)^2$
Tronco	1.9	1.31E-05	1.9	5.92E-05	1.7	6.43E-04
Rama secundaria 1	2.5	1.73E-05	3.2	4.49E-05	3.5	1.73E-04
Rama secundaria 2	1.2	1.52E-05	3.5	4.56E-05	3.5	1.64E-04
Pecíolo	3.7	2.81E-01	3	3.99E+00	3.7	2.18E+01

Tabla 3: Resultados del ensayo de baja energía

\bar{U} (m/s)	1 m/s		2 m/s		3 m/s	
$\sigma_u^2(m/s)^2$	0.132		0.728		1.46	
\bar{S}	6092		7705		7646	
Parte del árbol	$f_{res}(Hz)$	$\sigma_x^2(mm)^2$	$f_{res}(Hz)$	$\sigma_x^2(mm)^2$	$f_{res}(Hz)$	$\sigma_x^2(mm)^2$
Tronco	1.9	1.20E-04	1.5	1.16E-03	1.6	3.06E-03
Rama secundaria 1	3.5	4.55E-05	3.3	8.68E-04	3.1	4.94E-03
Rama secundaria 2	3.3	6.15E-05	3.1	8.13E-04	3.2	2.04E-03
Pecíolo	3.7	1.47E+01	3.5	1.17E+02	4	2.96E+02

Tabla 4: Resultados del ensayo de alta energía

Se presta especial interés a los resultados de los ensayos con velocidad de viento de 1 m/s, ya que es la velocidad media de viento que se presenta más frecuentemente en las quintas, a 3 m del suelo.

Se puede apreciar, observando las tablas anteriores, que la amplitud del movimiento del pecíolo es significativamente mayor cuando los niveles de energía turbulenta de las pequeñas escalas son mayores. En el ensayo de baja energía a 1 m/s, se tiene para el pecíolo que la media cuadrática del movimiento resulta $\sigma_x^2=0.768 \text{ mm}^2$, mientras que en el ensayo de alta energía a 1m/s se tiene que $\sigma_x^2=15.9 \text{ mm}^2$. Asimismo, al aumentar la velocidad media del flujo, se incrementa la diferencia entre los valores de σ_x^2 para baja y alta energía. Por otro lado, se observa que los niveles de movimiento de las demás componentes del árbol, en particular el tronco y las ramas estructurales, no presentan diferencias significativas entre el flujo de baja energía y el de alta energía, a una velocidad media de 1 m/s. Se deduce que entre la baja y la alta energía turbulenta, la única diferencia apreciable en el comportamiento del árbol es el movimiento de los pecíolos, y por consiguiente el movimiento de las hojas.

Interesa tener una noción del tiempo que una hoja se mueve haciendo contacto con el fruto adyacente, bajo los dos niveles de energía. Se supone que si el movimiento de la hoja presenta una amplitud menor al 10% del tamaño del fruto, es decir menor a 1 mm, provocaría un mayor daño sobre el fruto que un movimiento de mayor amplitud, ya que en este último caso el tiempo de contacto sería sensiblemente menor. El tiempo que la hoja se encuentra próxima al fruto, para el ensayo de baja energía, se estima en el 73.9% del tiempo, mientras que en el caso de un flujo de alta energía, el tiempo de contacto se estima en el 21.2% del tiempo. Se desprende pues, que el daño en el fruto provocado por el movimiento de las hojas adyacentes, es mayor con niveles de energía turbulenta de las pequeñas escalas bajos que con niveles altos.

Con el objeto de encontrar las variables más significativas que actúan sobre la respuesta de las hojas, se realiza un análisis dimensional. Primero se plantean todas las variables que intervienen en el movimiento de las hojas, y se calculan los números adimensionados correspondientes. Luego se grafican los distintos valores, obtenidos en los ensayos, de las fluctuaciones de movimiento adimensionados, en función de cada una de las variables independientes, también adimensionadas. En la [Figura 7](#) se muestran las curvas halladas para el adimensionado de las fluctuaciones del movimiento en función del adimensionado de la energía contenida en la frecuencia de resonancia del pecíolo parametrizadas en los adimensionados de los diámetros de cada componente.

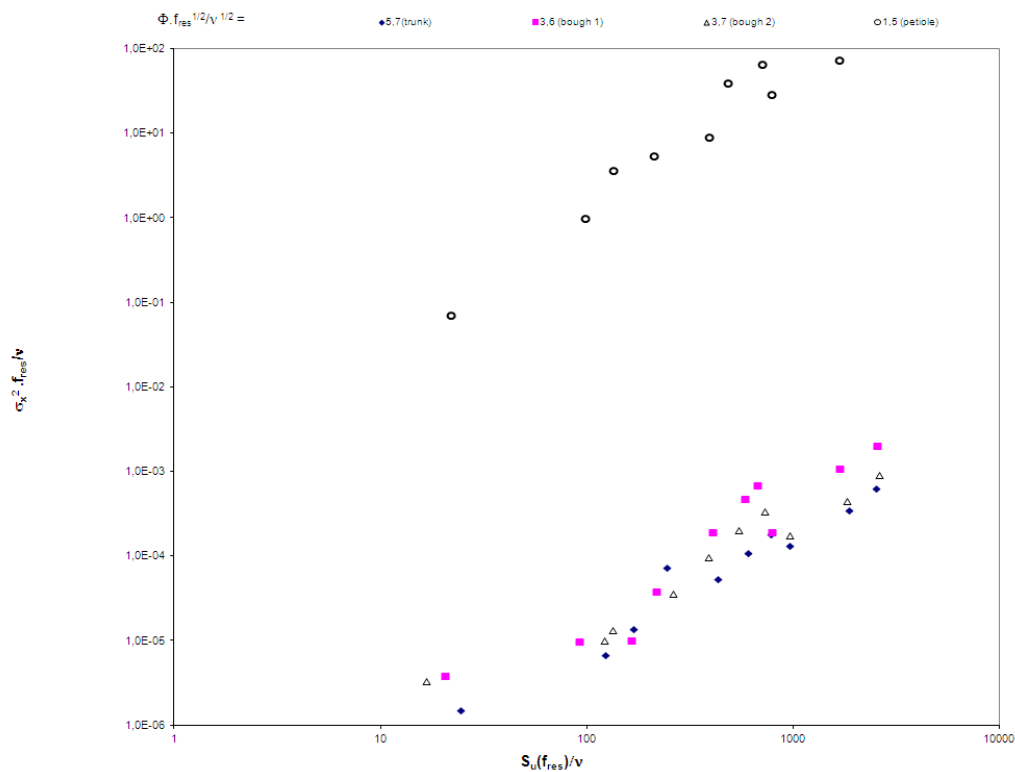


Figura 7: Relación entre el adimensionado de la deflexión y el adimensionado de la energía turbulenta contenida en las escalas correspondientes a la frecuencia de resonancia del pecíolo. Pecíolo (○), rama secundaria 1 (■), rama secundaria 2 (△), tronco (●).

Se aprecia una clara tendencia creciente en el movimiento del pecíolo cuando se incrementa la energía contenida en las estructuras turbulentas de frecuencia igual a la frecuencia de resonancia del mismo. Esta energía se logra aumentar tanto mediante el aumento de la velocidad media como con el aumento de la energía de las pequeñas escalas, siendo éste último el más efectivo en la tarea.

Corresponde ahora analizar cuál es la situación dentro de las quintas. Para ello se traza una nueva gráfica dejando únicamente los puntos correspondientes al pecíolo ([Figura 8](#)). Luego se trazan en los mismos ejes, los valores de $S_u(f_{res}) / v$ correspondientes a las direcciones de viento predominantes en dos sitios de un cuadro de plantación de frutos cítricos, denominados A₄ y A₅. Cada sitio presenta diferentes niveles de energía turbulenta en las pequeñas escalas.

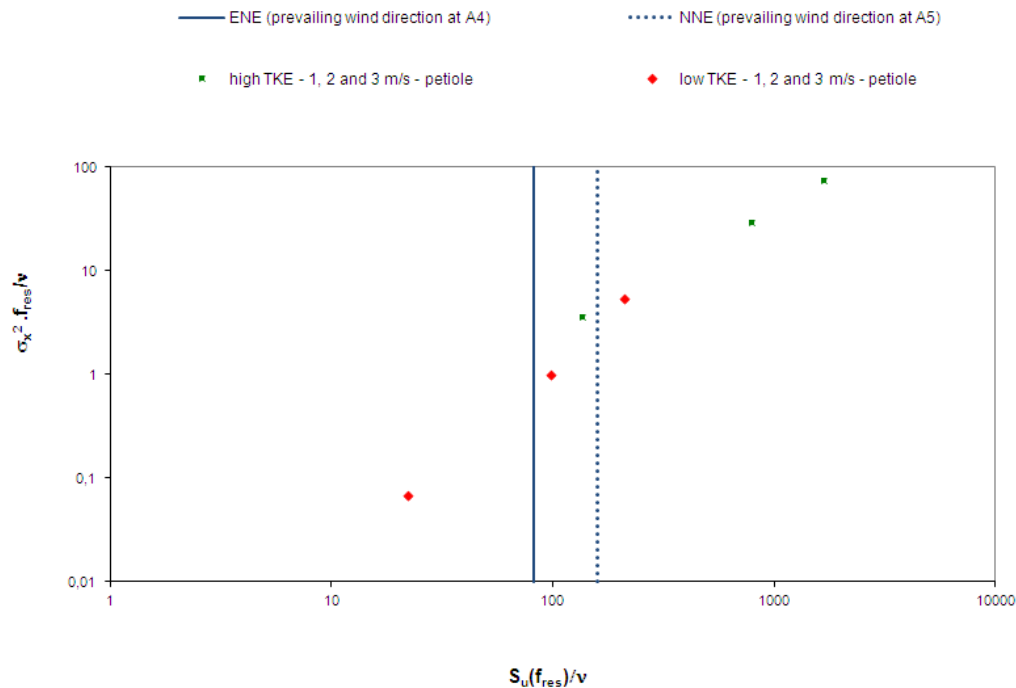


Figura 8: Energía turbulenta en las pequeñas escalas. Comparación entre mediciones en túnel y mediciones en campo

A partir de la figura anterior se puede deducir que el movimiento de un pecíolo de un árbol ubicado en el sitio A₅ tendría una amplitud 10 veces mayor a la correspondiente a un pecíolo de un árbol ubicado en el sitio A₄.

Se encontró menor cantidad de fruta dañada en el sitio A₅ que en el A₄ (Cataldo et al., 2011; Gravina et al., 2011).

4 CONCLUSIONES

Se simularon en un túnel de viento, dos condiciones distintas de flujo características dentro de un cuadro de árboles cítricos, siendo la principal diferencia el contenido de energía en las pequeñas escalas de la turbulencia.

Entre los dos flujos simulados, la principal diferencia en la respuesta del árbol se presentó en el movimiento del pecíolo, siendo mayor cuanto mayor el contenido de energía de las pequeñas escalas.

Por lo tanto, una hoja estaría menos tiempo en contacto con un fruto adyacente, bajo la acción de un flujo de alta energía, significando una menor producción de daño por rozamiento.

Se propuso un modelo teórico para describir la respuesta de las distintas partes de un árbol bajo la acción del viento.

A partir de la identificación de zonas dentro de un cuadro de plantación, con distintos contenidos de energía en el flujo incidente, se podrían identificar zonas donde la producción de daño en los frutos sea más baja que en otras. Más específicamente, las zonas con flujos de bajo nivel energético en las pequeñas escalas serían en las que se presentaría mayor cantidad de frutos dañados.

5 REFERENCIAS

Batchelor, G., 1960. The Theory of Homogeneous Turbulence. Cambridge University Press,

197 pp.

- Brodrick, H. T., 1970. Investigations into blemishes on citrus fruits. *S. Africa Citrus J.* 441: 7-31.
- Brunet, Y., Fourcaud, T., Achim, A., Belcher, R., Calmet, I., Caltagirone, J.P., Cleugh, H., de Coligny, F., Delavance, M., Druilhet, A., Finnigan, J.J., Foudhil, H., Gamboa-Marrufo, M., Gardiner, B., Guyon, D., Hughes, D., Irvine, M., Lamaud, E., Lohou, F., Lopez, A., Marshall, B.J., Mestayer, P., Morse, A., Paw, K.T., Raupach, M.R., Selier, D., Shaw, R.H., Soulier, D., Wood, C., Yang, B., 2003. The Venfor Project: Wind and forest interactions from the tree scale to the landscape scale. Proc. of the International Conference: Wind Effects on Trees, 16 - 18 September 2003, University of Karlsruhe, Germany.
- Campbell, M. M., 1967. Windbreaks for citrus trees. *Australia Citrus News* 43(10):10, 15.
- Cataldo, J., Pienika, R., 2008. Estudio y control del daño por viento en frutos cítricos. Primer Congreso Latinoamericano de Ingeniería del Viento, Montevideo, Uruguay, 4 al 6 de Noviembre de 2008.
- Cataldo, J., Pienika R., Durañona, V., Gravina, A., 2011, Dinámica del viento en quintas de cítricos y daños de los frutos, *Agrociencias Uruguay*, vol. 15 2, pp. 16 – 29, julio/diciembre, 2011.
- Dodson, P. G. C., 1966. Damage to citrus fruit by wind. *S. Africa Citrus J.* 393:5-7, 11.
- Farell, C., Youssef, S., 1992. Experiments on Turbulence Management Using Screens and Honeycombs. 30 pp. Prepared for NSF, Project Report No. 338.
- Finnigan, J.J., Brunet, Y., 1995. Turbulent airflow in forests on flat and hilly terrain. *Wind and Trees*, Edited by Coutts, M.P. and Grace, J., Cambridge University Press, 3-40.
- Freeman, B., 1976. Artificial windbreaks and the reduction of windscar of citrus. *Proc. Fla. State Hort. Soc.*, 89:52-54.
- Gardiner, B.A., 1995. The interactions of wind and tree movement in forest canopies. *Wind and Trees*, Edited by Coutts, M.P. and Grace, J., Cambridge University Press 41-59.
- Gravina, A. 1998. Produção de citros para exportação no Uruguai. *ANAIS V Seminário Internacional de Citros - Tratos culturais*. Bebedouro, San Pablo, Brasil: 273-288
- Gravina, A., Espino, M., da Cunha Barros, M., 2005. Evaluación del viento, cortinas de abrigo, sus características y efectos sobre la calidad de los frutos cítricos. II. Análisis del efecto del viento en la calidad externa de los frutos cítricos. 2º Simposio de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Citrus. Montevideo, Uruguay. CD, N° 27: 4p.
- Gravina, A., Cataldo, J., Gambetta, G., Pardo, E., Fornero, C., Galiger, S., Pienika, R., 2011. Relation of peel damage in citrus fruit to wind climate in orchard and its control. *Scientia Horticulturae* 129 (2011) 46-51.
- Green, G. C., 1968. Windbreaks for citrus orchards. *Farming in South Africa*, 44, 6:9-15.
- Groth, J., Johansson, A., 1988. Turbulence reduction by screens. *J. of Fluid Mech.*, vol. 197, 139-155.
- Holmes, J., 2001. *Wind Loading of Structures*. Spon Press, London.
- Martínez, D. 1995. Causas de descarte zafra 1995. *Citrus*, 27: 18-19. C.H.N.P.C., MGAP, Montevideo, Uruguay.
- Melbourne, W.H., 1979. Turbulence effects on maximum surface pressures - a mechanism and possibility of reduction. Proc. of the 5th Int. Conf. on Wind Engineering, Edited by Cermak, J.E., 541-551, Fort Collins, USA, July 1979.
- Newland, D., 1984. *An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis*. Longman Inc., New York, 285 pp.
- Owen-Turner, J., Hardy, S., 2006. Windbreaks for citrus. Citrus fact sheet, compiled by CITTgroups Australia. Available online at http://www.dpi.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0005/137858/Windbreaks-for-citrus.pdf

- Pope, S., 2000. Turbulent Flows. Cambridge University Press, 771 pp.
- Richardson, G., 1989. A Permeable Windbreak: It's Effect on the Structure of the Natural Wind. *J. of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics*, 32 101-110.
- Richardson, G., Richards, P., 1995. Full-Scale Measurements of the Effect of a Porous Windbreak on Wind Spectra. *J. of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics*, 54/55 611-619
- Ruck, B., Adams, E., 1991. Fluid mechanical aspects of the pollutant transport to coniferous trees. *Boundary –Layer Meteorology*, 1991, {bf 56}, 163-195.
- Scarabino, A., 2005. Características de la turbulencia atmosférica en un bosque de coníferas. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería – Departamento Aeronáutica.
- Shaw, R. H., 2006. Observation and simulation of flow in vegetation canopies. In: *Flow and Transport Processes with Complex Obstructions: Applications to Cities, Vegetative Canopies, and Industry* (Ye. A. Gayev and J. C. R. Hunt editors). NATO Science Series, Springer Publ., 2006, v. 236.
- Simiu, E., Scanlan, R., 1986. *Wind Effects on Structures*. A Wiley-Interscience Publication, 589 pp.
- Schindler, D., Fugmann, H., Schönborn, J., Mayer, H., 2009. Responses of Scots pine trees to near-surface airflow. *Proc. of the 2nd Int. Conf. Wind Effects on Trees*, 89-94, Albert-Ludwigs-University of Freiburg, Germany, October 2009.
- Tennekes, H., Lumley, J., 1972. *A First Course in Turbulence*. MIT Press, 299 pp.