



Patrones de desprendimiento de cítricos y respuesta del árbol bajo recolección mecanizada con sistemas sacudidores de copa

F. Aragon-Rodriguez¹, R. R. Sola-Guirado¹, S. Castro-Garcia¹, J. A. Gil-Ribes¹

¹ G.I. AGR 126 "Mecanización y Tecnología Rural". E.T.S.I. Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Ctra. Nacional IV, km. 396, 14014 Córdoba; scastro@uco.es

Resumen: La recolección mecanizada es una importante alternativa para afrontar los problemas de disponibilidad de mano de obra, los costes de producción y mejorar la rentabilidad de la explotación. La viabilidad de la recolección mecanizada está marcada por la calidad de la fruta y la eficiencia su derribo y para ello es necesaria una adaptación entre máquina y árbol. El objetivo del trabajo es la determinación del patrón de abscisión de naranja dulce con sistema sacudidor de copa en comparación con otros sistemas de desprendimiento y, al mismo tiempo, establecer recomendaciones para alcanzar un elevado porcentaje de derribo. Se ensayaron 4 parcelas de naranja variedad 'Valencia' durante las campañas 2017/2018, empleando un sacudidor de copa Oxbo-3210. El patrón de desprendimiento según el tipo de recolección fue determinado junto el análisis de la vibración en la copa del árbol. La frecuencia de rotura tipo AZ-C predominó en caída natural (89,0%) y la recolección manual (79,5%) y se fue igualando con AZ-A en el sacudidor de copa (58,8%). La zona de contacto con las varas mostró un valor medio de A_{RMS} de 2,3 veces mayor que la zona sin contacto, además de un 85% de desprendimiento frente a un 27%. Se definió que la forma de seto ancho debe ser adaptado para facilitar el acceso de las varas y que la máquina debe ajustarse entre el valor A_{RMS} y el tiempo mayor de 300 ms² para lograr un desprendimiento del 100%.

Palabras clave: Citrus sinensis (L.) Osbeck, abscisión, vibración, eficiencia de recolección

1. Introducción

En todo el mundo se produjeron 146 millones de toneladas de cítricos en 2016, incluyendo naranjas, pomelos, limones, mandarinas y otros cítricos [1]. España es el sexto productor mundial de cítricos, con una producción aproximada en 2017/18 de más de 7 millones de toneladas. En España, predominan las plantaciones de cítricos configuradas para la recolección manual, con orientación hacia el mercado en fresco. Las plantaciones que se recogen manualmente están experimentando problemas debido a la disponibilidad de mano de obra y a los altos costes de operación. Dentro de estos costes de operación, la recolección es una fase de enorme importancia económica debido a su alto impacto en el coste final de producción. La recolección manual en el sur de España representa entre el 25 y el 35% del coste final de producción [2].

El desprendimiento de frutos puede producirse por causas naturales o por la acción de un agente externo. El proceso natural de abscisión del fruto es una estrategia de la planta para descartar el fruto maduro o dañado, así como para dispersar las semillas. La cosecha de los cítricos tiene lugar durante la fase de maduración del fruto, antes de que se produzca la caída natural [3].

Se emplean diferentes métodos manuales y mecanizados para separar la fruta del árbol. Sin embargo, ninguno de los sistemas mecanizados ha sido capaz de igualar la flexibilidad y la capacidad de selección de frutos de la cosecha manual [4]. Por lo tanto, actualmente los cítricos, ya sea para consumo en fresco o para procesamiento industrial, se cosechan principalmente a mano.

El mercado de frutas frescas requiere que la piel y el interior de la fruta no estén dañados y que el cáliz esté intacto, para conservar sus propiedades organolépticas y antifúngicas. Sin embargo, los cítricos para procesamiento industrial pueden tolerar ciertos tipos de daños externos [5]. Para el mercado en fresco, el método más utilizado es el corte manual, cortando por el pedúnculo y manteniendo el cáliz. Cuando la fruta está destinada a la industria, el método manual de recolección por tirón, sin tijeras, es uno de los más frecuentes: la fruta se despega girando el tallo del fruto y tirando de él manualmente [3]. En la actualidad, los sistemas mecánicos de recolección se utilizan para la fruta procesada, empleando principalmente vibradores de tronco [6] y sacudidores de copa [7]. Ambas tecnologías realizan una vibración forzada, que se transmite al fruto y provoca su desprendimiento [8]. Los sacudidores de copa son los sistemas comerciales que permiten realizar un trabajo continuo y alcanzando altos valores de eficiencia en el desprendimiento de la fruta (>90%) si la plantación está adaptada y los operarios están entrenados [9].

Los sistemas sacudidores de copa producen una vibración de la copa de forma continua a la fila de árboles. Las varas penetran en la copa y alcanzan un alto valor de desprendimiento del fruto en las zonas donde hay contacto directo de las varas con las ramas. Sin embargo, el uso del sacudidor de copa puede generar una mayor caída de hojas, brotes y ramas que la recolección manual [10]. La adaptación de la máquina a la variabilidad de la copa del árbol permite reducir los daños en los árboles en comparación con otros sistemas. Por este motivo, la mejora de estas máquinas se ha basado en un doble objetivo: aumentar la eficiencia de desprendimiento de frutos maduros y la reducción de daños causados a los árboles y frutos.

El objetivo de este trabajo es la determinación del patrón de abscisión en naranja dulce con un sistema sacudidor de copa y el establecimiento de recomendaciones, a partir del análisis de la interacción de las varas en la copa, en la formación de la plantación con el fin de alcanzar un elevado porcentaje de derribo de frutos. Se determinaron los parámetros de vibración necesarios para separar la fruta y la viabilidad de ésta para ser destinada al mercado en fresco o al procesamiento industrial.

2. Materiales y métodos

2.1. Parcelas de ensayo

Los ensayos de campo se realizaron en Córdoba, al sur de España en 4 parcelas de naranjas dulces comerciales para la producción de zumo (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck cv. 'Valencia') durante las temporadas de cosecha de 2017 y 2018, después de la floración y antes de la caída natural de frutos inmaduros. Los árboles fueron conformados en seto ancho, con tres o más ramas principales en caballones de aproximadamente 0,4 m. Se disponía de distancia suficiente entre filas para permitir la maniobrabilidad del sistema sacudidor de copa. La Tabla 1 muestra los datos de las parcelas de ensayo.

Tabla 1. Características de las plantaciones de cítricos recolectados mecánicamente mediante sacudidor de copa.

	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4
Fecha de plantación	2006	2005	2007	2005
Área de la parcela (ha)	54,7	38,0	33,1	29,0
Árboles por ha	440	330	440	330
Marco de plantación (m)	7x3	7x4	7x3	7x4
Altura del seto (m)	4,0	4,0	4,3	4,4
Anchura del seto (m)	3,9	4,1	4,5	4,6

2.2. Maquinaria de recolección

La recolección mecanizada de los frutos se llevó a cabo con un sistema sacudidor de copa lateral (Ploeger Oxbo Group; Oxbo 3210, Nueva York, EE.UU.), arrastrado por un tractor, trabajando en condiciones regulares, con un rango de velocidad de avance de entre 1 y 1,5 kmh⁻¹. El sacudidor de copa monta 288 varas de metal de 1,4 m de longitud hasta su extremo libre, vibrando a una frecuencia comprendida entre 4,5y 5 Hz. La máquina cosechó ambos lados del seto en pasadas independientes, con una capacidad de trabajo aproximada de 0,4-0,5 hah⁻¹ (Figura 1).



(a)



(b)

Figura 1. Sistema sacudidor de copa arrastrado por tractor (Oxbo, 3210) utilizado en los ensayos de recolección de cítricos. a) Vista frontal antes de la recolección. b) Vista trasera después de la recolección.

2.3. Medidas en las ramas

Se seleccionó un área representativa de la copa del árbol, en la que se concentran los frutos, de entre 4 y 5 m² (Figura 2). La sección transversal se dividió en 16 a 20 sectores de estudio, según el ancho del seto, a intervalos de 0,5 m, tanto horizontal como verticalmente. Antes de la recolección mecánica, se seleccionaron un total de 90 ramas que tenían fruta madura y se distribuían en diferentes sectores. El diseño estadístico estableció un muestreo aleatorio estratificado, cada conglomerado era una parcela y en cada parcela se seleccionaron aleatoriamente de 18 a 24 ramas fructíferas. La muestra garantizaba al menos 3 mediciones en cada sector. A cada rama se le asignó un valor de posición en la sección transversal en un punto cercano a la fruta que pudiese sostener el sensor. La proporción de desprendimiento de los frutos se determinó por el número de frutos de cada rama antes y después del proceso de recolección.

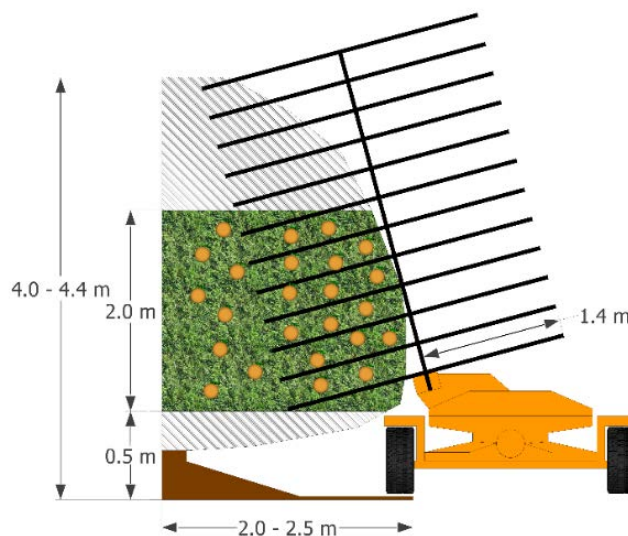


Figura 2. Sección transversal de la copa del árbol con y sin contacto directo con las varas del sistema sacudidor de copa.

La medición de la vibración en las ramas se registró con un conjunto de acelerómetros triaxiales MEMS (Gulf Coast Data Concepts LLC X200-4, Waveland, MS) con un rango de medición de $\pm 2000 \text{ ms}^{-2}$, una resolución de 16 bits, una sensibilidad de $0,06 \text{ ms}^{-2}$ y una frecuencia de muestreo de 400 Hz. El análisis de las señales de aceleración se realizó en el dominio del tiempo utilizando software abierto R [11] y en el dominio de las frecuencias utilizando el software NV Gate v8.0.

En el dominio del tiempo, las variables de vibración estudiadas fueron:

- Tiempo de vibración (T_{vib}): tiempo (s) transcurrido entre el primer y el último valor de A_r medido en la rama, que va desde valores de A_r de 20 ms^{-2} hasta 600 ms^{-2} .
- Aceleración media de pico (A_{pk}): el valor medio de los 10 valores máximos de pico de A_r (ms^{-2}) para T_{vib_20} .

En el dominio de la frecuencia, las variables de vibración estudiadas fueron:

- Frecuencia: número de ciclos por segundo (Hz) de las varas en la copa.
- Aceleración RMS (A_{RMS}): suma vectorial de los valores cuadráticos medios (RMS) de cada eje del acelerómetro a la frecuencia de vibración.

2.4. Medidas en los frutos

Se estudiaron los patrones de abscisión de los frutos para los siguientes métodos de desprendimiento: caída natural, recolección manual sin tijera (conocido como manoteo), sacudidor de copa y prueba de tracción manual. El fruto evaluado de la caída natural fue recogido del suelo durante los períodos de cosecha y no presentaba daños externos visibles. La fruta evaluada por el método manual fue recogida por los operarios agrícolas. La fruta recogida por el método de recolección mecanizada fue cosechada por el sacudidor de copa. El fruto evaluado con la prueba de tracción manual (Mecmesin; Dynamometer CFG +200, Slinfold, UK), se desprendió aplicando una fuerza de tracción creciente continua sobre el fruto cerca del cáliz en la dirección principal de la rama hasta su desprendimiento.

El patrón de abscisión de la fruta fue determinado para 2540 frutos (1034 y 1506 para las temporadas 2017 y 2018, respectivamente). Los frutos analizados mostraron un peso promedio de 182,4 g (Gram-Group; GRAM SPX, Barcelona, España), un porcentaje de zumo del 54,9%, un diámetro ecuatorial de 70,0 mm (Mitutoyo; Absolute CD 20 DCX, Takatsu-ku, Prefectura de Kanagawa, Japón), una tasa de sólidos solubles de 11.32° Brix (Hanna Instruments S.R.L.;

Refractómetro HI96800, Rhode Island, EE.UU.) y una acidez de 0,83 (Hanna Instruments S.R.L.; Acidez Titulable de Jugo de Frutas HI84532, Rhode Island, EE.UU.).

La clasificación de la AZ se realizó para cada fruta de acuerdo con los siguientes grupos (Figura 3):

- Desgarro con cáscara: rotura con una porción de flavedo.
- AZ-C: ruptura entre pedúnculo y fruto, con disco floral. Este grupo se dividió en dos categorías: fruta con y sin cáliz.
- AZ-A: rotura en otra parte del tallo. Este grupo se dividió en dos categorías: rotura en el pedúnculo o rotura en cualquier parte de la rama.

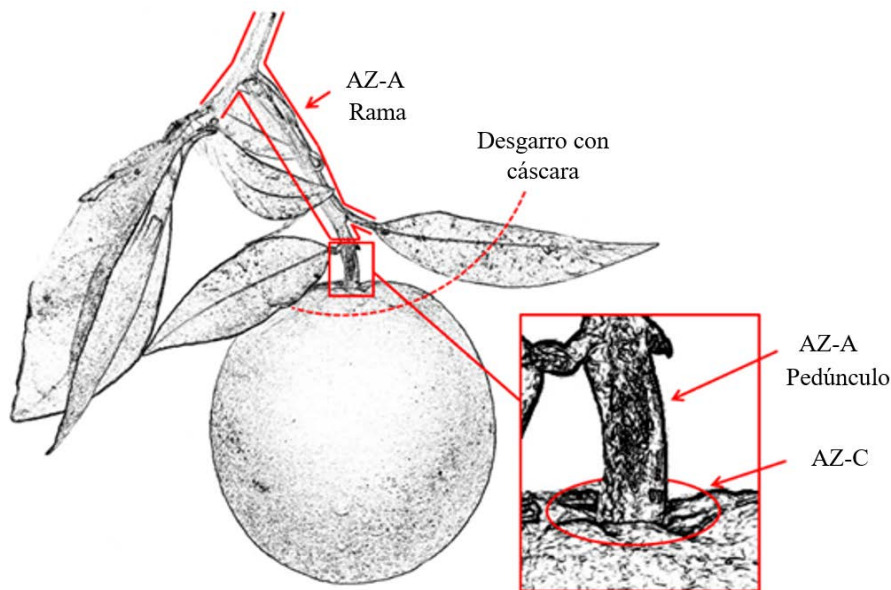


Figura 3. Esquema de zonas de abscisión de cítricos (AZ) bajo diferentes métodos de desprendimiento.

El diseño estadístico establecido fue el muestreo por conglomerados de dos etapas, en el que cada fila era un conglomerado y cada fila se muestreaba al azar, excluyendo el primer y último árbol de la fila, evitando el efecto de borde. El software utilizado para el análisis estadístico fue IBM SPSS Statistics 25 (International Business Machines Corporation; SPSS Statistics 25, Nueva York, EE. UU.).

La evaluación de la prueba de tracción se midió en el área de la copa cosechable con 11 muestras para cada temporada de recolección (2017 y 2018). Cada muestra incluyó 45 frutos antes de la cosecha mecánica y 45 frutos después de la cosecha mecánica para los frutos aleatorios que quedaban en el árbol.

3. Resultados y discusión

3.1. Respuesta del árbol a la vibración

La mayor parte de los frutos (72,7%) se encontraba en la zona de la copa con contacto directo con las varas, en el rango de altura entre 1 y 2 m desde el suelo, y en un rango entre 0,5 y 2 m desde el tronco. Gupta et al. [12] señalan que el área con mayor fructificación se encuentra en ramas primarias de la zona intermedia de la copa a una altura entre 1,14 y 2,29 m, y a una distancia entre 0,78 y 0,83 m del exterior de la copa.

El diámetro de la rama en el punto de medición de la vibración fue de $7,9 \pm 2,4$ mm (media \pm sd), con una variación que osciló entre 10,2 mm para las ramas más cercanas al tronco y al suelo,

y 5,53 mm para las ramas más externas y altas de la copa. Cada rama tenía un valor medio de $3,7 \pm 1,8$ frutos. Los resultados mostraron una alta variabilidad en la distribución del fruto en la copa y en la morfología de las ramas, tanto en grosor como en longitud. Esta variabilidad es importante para el resultado de los sistemas de recolección mecanizada y fue considerada por Gupta et al. [12] [13] para modelar el árbol y simular el proceso de recolección, con el fin de mejorar el sistema sacudidor de copa. En un intento por mejorar la adaptación de la máquina al árbol, Pu et al. [14] diseñaron y probaron un sistema de sacudidor de copas capaz de aplicar diferentes parámetros de vibración a las partes superior e inferior del árbol. Estos autores mostraron la necesidad de utilizar diferentes parámetros de recolección y lograron un alto índice de desprendimiento de frutos (82,6%) con un bajo daño a los árboles.

La Tabla 2 muestra los resultados de este proceso de vibración medidos en ramas, tanto en la zona de la copa con y sin contacto directo con las varas de la máquina. Para definir el inicio y el final del proceso de vibración, se registraron los valores de aceleración producidos sólo por fuentes naturales, principalmente por el viento y la gravedad, y sin interacción de la máquina. El tiempo de vibración en el que la rama fue excitada por la máquina se definió como el tiempo que transcurre entre los valores de aceleración resultantes superiores a 18 ms^{-2} (T_{vib_18}). El tiempo promedio de vibración (T_{vib_18}) de las ramas fue de $14,3 \pm 2,8$ s. No se encontraron diferencias significativas (Student's t, $p > 0,05$) entre el tiempo de vibración de las ramas ubicadas en el área de la copa con o sin contacto directo con las varas. Esto indica que todas las ramas vibran al mismo tiempo, pero no todas al mismo nivel de aceleración.

Tabla 2. Parámetros de vibración medidos en las ramas, con y sin contacto directo con las varas, durante la recolección mecanizada con sacudidor de copa.

	Ramas con contacto directo con las varas	Ramas sin contacto directo con las varas	Valor medio
Tiempo de vibrado (s)	$14,8 \pm 2,8$ a	$13,8 \pm 2,9$ a	$14,3 \pm 2,8$
Frecuencia (Hz)	$4,1 \pm 0,2$ a	$4,0 \pm 0,3$ a	$4,1 \pm 0,5$
A_{RMS} (ms^{-2})	$29,6 \pm 10,2$ a	$12,8 \pm 6,4$ b	$26,5 \pm 13,6$
Valor máximo de aceleración (ms^{-2})	$616,7 \pm 283,3$ a	$268,1 \pm 164,6$ b	$495,1 \pm 270,9$
Desprendimiento del fruto (%)	$84,7 \pm 30,5$ a	$25,1 \pm 22,2$ b	$69,1 \pm 40,7$

Los valores mostrados son la media \pm desviación estándar, $n=90$. Las mismas letras de la misma fila indican que no son significativamente diferentes (Student's t, $p < 0,05$; Wilcoxon-Mann-Whitney test, $p < 0,05$).

Las ramas mostraron un valor medio de frecuencia de vibración de $4,1 \pm 0,5$ Hz, apropiado para el desprendimiento del fruto [15]. El valor de la frecuencia de vibración no se correlacionó con la posición de la rama en la copa (Pearson = 0,135, $p > 0,05$). Los valores de las A_{RMS} medidos en las ramas se relacionaron positivamente con la proporción de desprendimiento de frutos. La vibración de la rama se caracterizó por un valor A_{RMS} de $26,5 \pm 13,6 \text{ ms}^{-2}$ para la frecuencia de vibración de la máquina. Las ramas con contacto directo con las varas mostraron un valor medio de A_{RMS} significativamente mayor ($29,6 \pm 10,2 \text{ ms}^{-2}$) (Student t, $p < 0,05$; Wilcoxon-Mann-Whitney, $p < 0,05$) que las ramas sin contacto directo ($12,8 \pm 6,4 \text{ ms}^{-2}$). Pu et al [14] mostraron que los valores más altos de aceleración en las ramas ($31,4 \text{ ms}^{-2}$) fueron proporcionados por el contacto con las varas de la máquina y estas ramas alcanzaron los valores más altos de eficiencia en el desprendimiento de la fruta. Además, las ramas internas, sin contacto directo con las varas, mostraron un 43% del nivel de vibración del A_{RMS} de las ramas externas. Un resultado similar fue alcanzado por otros autores [16], cuyos resultados mostraron una reducción de la aceleración en las ramas internas de la copa del 42% con respecto a las ramas externas.

La interacción de las varas con las ramas se caracterizó por una sucesión de impactos con un alto valor de aceleración de acuerdo con la frecuencia de vibración de la máquina. Estos impactos presentaron un valor medio de A_{pk} de $495,1 \pm 270,9 \text{ ms}^{-2}$. Los valores de A_{pk} en las ramas con contacto directo con las varas ($616,7 \pm 283,3 \text{ ms}^{-2}$) fueron más altos (Student's t, $p < 0,05$) que en las ramas sin contacto directo ($268,1 \pm 164,6 \text{ ms}^{-2}$). Los valores de A_{pk} y A_{RMS} mostraron una correlación lineal positiva (Pearson = 0,70, $p < 0,05$) en la copa del árbol. En ambos casos, el contacto directo de la vara representó un incremento de 2,3 veces los valores de aceleración alcanzados en la rama.

El sistema sacudidor de copa alcanzó un valor medio de desprendimiento de fruta de $69,1 \pm 40,7\%$. Sin embargo, presentaba una alta variabilidad dentro de la sección transversal de la copa. Como era de esperar, alcanzó sus valores más altos en las ramas en contacto directo con las varas. La relación de desprendimiento de frutos se redujo de un valor medio del $84,7 \pm 30,5\%$ en ramas con contacto directo con las varas al $25,1 \pm 22,2\%$ para las ramas sin contacto directo. Savary et al. [17] alcanzó un valor de desprendimiento de fruta del 88% en el exterior de la copa, mientras que en el interior esta cifra se redujo al 57%. Sin embargo, para mejorar la eficiencia de la cosecha, no sólo es necesario que la vara penetre en la copa, sino también que interactúe con la rama. Liu et al [15] analizando el desprendimiento del fruto según el punto de contacto de la vara con la rama, determinó que la operación es más efectiva cuando la vara impacta al 30% de la distancia hasta el extremo libre de la rama.

Los resultados obtenidos de la sección transversal de la copa del árbol han mostrado una alta variabilidad, tanto en la vibración como en los valores del fruto. Para reducir esta variabilidad y mejorar el proceso de recolección mecanizada es necesario conocer los requisitos para separar la fruta del árbol. El análisis de los datos se centró en la discretización de las variables cuantitativas que podían discriminar si existía un desprendimiento de fruta con un valor del 100% y un éxito razonable, empleando una regresión logística. El valor A_{RMS} y el tiempo transcurrido entre una aceleración superior a 300 ms^{-2} (T_{vib_300}) fueron variables significativas para discriminar los eventos de desprendimiento de fruta al 100%. El resultado se definió como una línea recta que separa las condiciones en las que se obtuvo un desprendimiento de fruta del 100% con una precisión medida como el área bajo la curva ROC de 0,95 en el conjunto de validación. La ecuación 1 muestra los valores obtenidos y la figura 4 su representación gráfica.

$$\ln \left(\frac{\text{Probabilidad de desprendimiento del 100\%}}{1 - \text{Probabilidad de desprendimiento del 100\%}} \right) = 7.13417 - 0.52754 T_{vib_300} - 0.17206 A_{RMS} \quad (1)$$

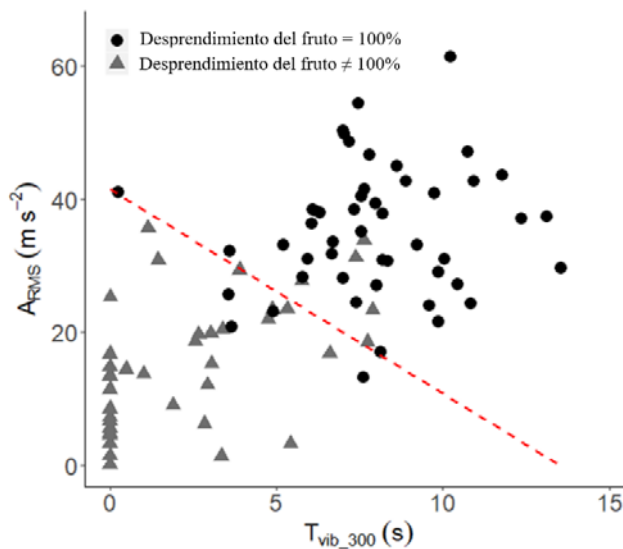


Figura 4. Distribución de valores de desprendimiento del fruto según $A_{RMS} \text{ (ms}^{-2}\text{)}$ y $T_{vib_300} \text{ (s)}$.

3.2. Patrón de desprendimiento del fruto

La figura 5 muestra los patrones de abscisión según el método de desprendimiento de la fruta. La rotura por desgarro de la cáscara fue mayor con el método manual (7,6%) que con el sacudidor de copa (1%) o la caída natural (0,4%) (prueba post-hoc de Tukey, $p > 0,05$). Sin embargo, los patrones de abscisión de AZ-C y AZ-A mostraron una tendencia opuesta dependiendo del método de desprendimiento de la fruta utilizado.

El AZ-C fue mayor en caída natural (89,0%) y con el método manual (79,5%). Por lo tanto, el método manual causa un desprendimiento en AZ-C similar a la abscisión natural. Nuestros resultados muestran que el AZ-C es el AZ más común, coincidiendo con otros autores [18]. Estos métodos de desprendimiento mostraron diferencias significativas en los valores medios de la fruta para AZ-C (prueba post-hoc de Tukey, $p > 0.05$) en comparación con el sacudidor de copa (58,8%) y la prueba a tracción (45,3%).

En contraste, el AZ-A fue mayor en la fruta con la prueba a tracción (51,8%) y sacudidor de copa (40,2%), y el valor medio disminuyó significativamente para recolección manual (12,9%) y caída natural (10,6%) (prueba post-hoc de Tukey, $p > 0.05$). Utilizando el método manual, hubo un aumento en el porcentaje de frutos con abscisión por desgarro de la cáscara (de 0,4 a 7,6%) y abscisión AZ-A (de 10,6 a 12,9%) en comparación con la caída natural. El sacudidor de copa aumentó la proporción de frutos con la abscisión AZ-A 3,1 veces en comparación con el método de recolección manual.

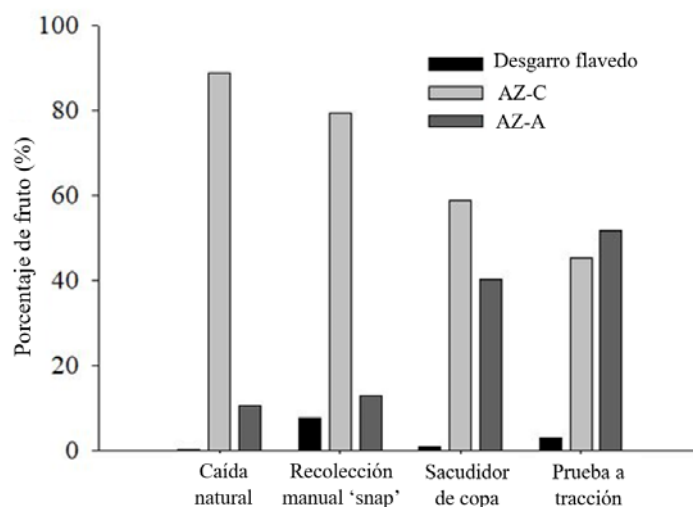


Figura 5. Patrón de abscisión del fruto según zonas de abscisión (AZ) y métodos de desprendimiento.

El porcentaje de frutos con abscisión en AZ-C con cáliz fue mayor con el sacudidor de copa (41,6%) y el método manual (30,2%) que con la prueba a tracción (15,5%) o caída natural (7,3%) (prueba post-hoc de Tukey, $p > 0,05$). El porcentaje de fruta con abscisión de AZ-C y cáliz conservado con sacudidor de copa (41,6%) fue similar a otros resultados obtenidos [19] con vibrador de troncos (41,7%) o vibrador de mano (43,3%). El porcentaje de frutos con abscisión en AZ-A por el pedúnculo fue muy bajo, con un 0,7% para la caída natural, un 0,9% para el método manual, un 3,4% para el ensayo de tracción y un 6,1% para el sacudidor de copa.

El fruto mostró diferencias significativas en la fuerza de retención del fruto (FRF) para el desprendimiento de la fruta según AZ (Figura 6, Antes). El desgarro de la cáscara por rotura del flavedo requirió un FRF medio de 99,3 N, superior al de una rotura AZ-C (88,7 N) y AZ-A (66,6 N; prueba post-hoc de Tukey, $p > 0,05$). El aumento de las roturas por AZ-A con un sacudidor se

relacionó con valores más bajos de FDF. Un resultado similar se obtuvo para los limones [19], donde los valores de FRF con abscisión en AZ-C se redujeron a lo largo de la temporada de cosecha, alcanzando valores para igualar la abscisión en AZ-A, que permaneció constante, al final del período. A diferencia de los limones, la variedad de naranja dulce Valencia tiene un alto contenido de FRF en comparación con otras variedades de naranja [6] [7] lo que facilita la rotura de AZ-A.

En frutos con abscisión de AZ-C, se encontró una regresión lineal entre el FRF y el diámetro del fruto (Pearson=0,401, $p < 0,01$, $n=991$), el 33% de este fruto se desprendió del cáliz, con valores significativos de FRF más altos (94,0 N) (t-Student, $t=7,087$, $p=0,000$) que en el caso de frutos sin cáliz (78,8 N). Una rotura del pedúnculo en AZ-A requería un FRF (81,8 N) superior al de la rama (65,5 N).

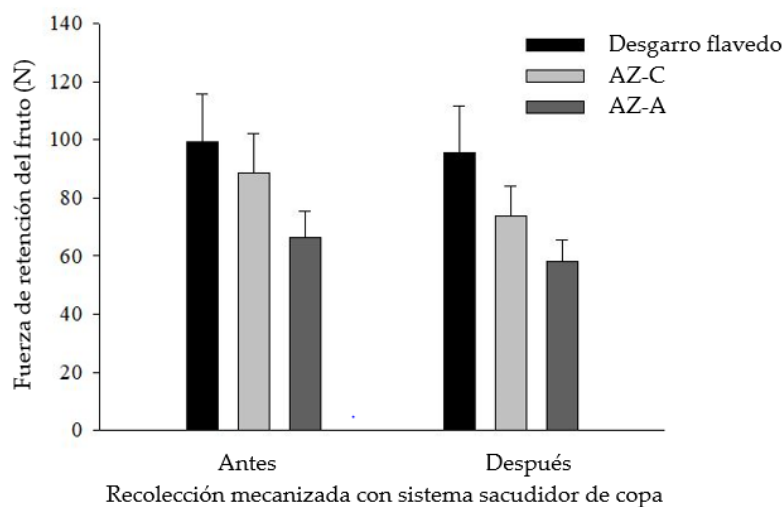


Figura 6. Fuerza necesaria para separar la fruta en la copa del árbol antes y después de la recolección mecanizada con sacudidor de copa de acuerdo con la zona de abscisión del fruto

La fruta desprendida por prueba de tracción con desgarro de la cáscara no mostró diferencias significativas (Student, $t = 1,550$, $p > 0,05$) antes o después de la cosecha mecánica, con un valor medio de 2,42%. Sin embargo, el uso del sacudidor de copa aumentó significativamente la cantidad promedio de fruta con abscisión de AZ-A de 45 a 50% (Student t , $t = -2,05$, nivel de significación $p < 0,1$, $p = 0,54$, $n = 22$) y redujo la cantidad de fruta con abscisión de AZ-C de 50 a 45% (Student t , $t = 1,734$, nivel de significación $p < 0,1$, $p = 0,98$, $n = 22$). Además, los frutos que permanecen en el árbol después de la cosecha mecánica con abscisión de AZ-C tuvieron valores medios de FRF (73,6 N) significativamente más bajos (t Student, $t = 7,63$, $p = 0,000$, $n = 22$) que los frutos con la misma abscisión antes de usar la máquina (87,9 N). Esta reducción en el valor medio del FRF se distribuyó de la misma manera entre los frutos que conservaron el cáliz o no (t Student, $t = 4,70$, $p = 0,000$, $n = 22$). El fruto desprendido en la abscisión AZ-A tuvo valores medios más bajos (Student t , $t = 6,07$, $p = 0,000$, $n = 22$) de FRF antes (68,1 N) y después (59,1 N) de la recolección mecanizada. Este efecto también fue descrito por otros autores [20] los cuales atribuyeron las acciones de torsión y flexión durante la cosecha mecánica como la causa principal del desprendimiento de la fruta. En ambos casos, el fruto separado a través de la abscisión AZ-A requería una fuerza de desprendimiento menor que el fruto separado a través de AZ-C. No obstante, el FRF puede variar dependiendo de la forma en que se realice el método [21], disminuyendo a medida que aumenta el ángulo con respecto al eje del fruto [15]. La evaluación del FRF ha mostrado una aplicación limitada para predecir la eficiencia de la cosecha con un

agitador de dosel. Savary et al. [17] mostraron que el valor máximo de FRF bajo condiciones de laboratorio era sólo el 18% del método tradicional de medición de FRF con la prueba de tracción.

4. Conclusiones

Por la parte del árbol, el proceso de vibración durante la recolección mecanizada con el sacudidor de copa mostró una gran variabilidad en los resultados dependiendo de las diferentes partes de la copa. Las ramas que tuvieron contacto directo con las varas de la máquina mostraron un valor medio más alto de desprendimiento del fruto (84,7%) que las ramas sin contacto (25,1%). La transmisión de la vibración de las ramas externas a las internas en la copa no fue efectiva para desprender el fruto. Durante el proceso de vibración, los valores de desprendimiento del 100% se lograron con una combinación de parámetros de recolección en la rama. Lograr un proceso completo de separación de la fruta es posible si tanto la copa del árbol como la maquinaria se ajustan mutuamente para facilitar el contacto del sistema de sacudida y el tiempo de vibración necesario. Por la parte del fruto, se comprobó que los diversos métodos de separación de la fruta producen diferentes patrones de abscisión. La recolección mecánica con sacudidores de copa mostró un patrón de abscisión en AZ-A mayor que la caída natural y el método manual sin tijera donde predomina el AZ-C. El desprendimiento con el sacudidor de copa mostró una menor FRF en la rama (AZ-A) que en el fruto (AZ-C), aumentando la generación de residuos y la caída del fruto con cáliz. La fruta que permaneció en el árbol después de la recolección con sacudidor de copa mostró un valor de FRF más bajo.

5. Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (INIA, España) con fondos FEDER, a través de los proyectos de investigación RTA2014-00025-C05-03 y RTA2014-00025-C05-05. Se quiere realizar una especial mención al Catedrático Emilio Soria-Olivas y Antonio J. Serrano pertenecientes al IDAL (Intelligent Data Analysis Laboratory) de la Universidad de Valencia por su inestimable apoyo en el análisis y visualización de los datos.

Referencias

1. FAOSTAT. Datos de alimentación y agricultura. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (accedido el 14 de mayo de 2019).
2. Junta de Andalucía. Media de costes de producción. Campaña 2016-17. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/observatorio> (accedido el 14 de mayo de 2019).
3. Ladaniya, M. S. 8 - HARVESTING, Citrus Fruit. Academic Press. 2008
4. Sanders, K.F. Orange harvesting systems review. Biosystems Engineering. 2005, 90, (115-125). h
5. Moreno, R., A. Torregrosa, E. Moltó & P. Chueca. Effect of harvesting with a trunk shaker and an abscission chemical on fruit detachment and defoliation of citrus grown under Mediterranean conditions. Spanish Journal of Agricultural Research. 2015, 13.
6. Torregrosa, A., Ortí, E., Martín, B., Gil, J., Ortiz, C. Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain. Biosystems Engineering. 2009, 104, (18-24).
7. Peterson, D. L. Mechanical harvester for process oranges. Applied Engineering in Agriculture. 1998, 14, (455-458).
8. Castro-Garcia, S., G. L. Blanco-Roldán, L. Ferguson, E. J. González-Sánchez & J. A. Gil-Ribes. Frequency response of late-season 'Valencia' orange to selective harvesting by vibration for juice industry. Biosystems Engineering. 2017, 155, (77-83).
9. Roka, F. M., R. J. Ehsani, S. H. Futch & B. R. Hyman. Citrus mechanical harvesting systems - Continuous canopy shakers. 2014.
10. Spann, T. M., Danyluk, M. D. Mechanical harvesting increases leaf and stem debris in loads of mechanically harvested citrus fruit. HortScience. 2010, 45, (1297-1300).

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

11. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. 2018
12. Gupta, S.K., Ehsani, R. Kim, N.H. Optimization of a citrus canopy shaker harvesting system: Properties and modeling of tree limbs. T. ASABE. 2015, 58, (971-985).
13. Gupta, S.K., Ehsani, R. Kim, N.H. Optimization of a citrus canopy shaker harvesting system: Mechanistic tree damage and fruit detachment models. T. ASABE. 2016, 59, (761-776).
14. Pu, Y., Toudeshki, A., Ehsani, R., Yang, F., Abdulridha, J. Selection and experimental evaluation of shaking rods of canopy shaker to reduce tree damage for citrus mechanical harvesting. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2018, 11, (48-54).
15. Liu, T.H., Luo, G., Ehsani, R., Toudeshki, A., Zou, X.J., Wang, H.J. Simulation study on the effects of tine-shaking frequency and penetrating depth on fruit detachment for citrus canopy-shaker harvesting. Computers and Electronics in Agriculture. 2018, 148, (54-62).
16. Liu, T. H., R. Ehsani, A. Toudeshki, X. J. Zou & H. J. Wang. Experimental Study of Vibrational Acceleration Spread and Comparison Using Three Citrus Canopy Shaker Shaking Tines. Shock and Vibration, 2017.
17. Savary, S.K.J.U., Ehsani, R., Salyani, M., Hebel, M.A., Bora G.C. Study of force distribution in the citrus tree canopy during harvest using a continuous canopy shaker. Computers and Electronics in Agriculture. 2011, 76, (51-58).
18. Merelo, P., J. Agustí, V. Arbona, M. L. Costa, L. H. Estornell, A. Gómez-Cadenas, S. Coimbra, M. D. Gómez, M. A. Pérez-Amador, C. Domingo, Talón, M., Tadeo, F. R. Cell wall remodeling in abscission zone cells during ethylene-promoted fruit abscission in citrus. Frontiers in Plant Science. 2017, 8.
19. Torregrosa, A., Porras, I., Martín, B. Mechanical harvesting of lemons (cv. Fino) in Spain using abscission agents. Transactions of the ASABE. 2010, 53, (703-708).
20. Savary, S.K.J.U., Ehsani, R., Schueller, J.K., Rajaraman, B.P. Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. T. ASABE. 2010, 53, (1373-1381).
21. Pozo, L., Malladi, A., K.-J. John-Karuppiah, Lluch, Y., Alferez, F., Burns, J. K. Daily Fluctuation in Fruit Detachment Force of 'Valencia' Orange Is related to Time of Day, Temperature, Relative Humidity, Fruit Weight, and Juice Percentage. Proceedings of the Florida State Horticultural Society. 2007, 120, (41-44).