

MODELOS DE PREDICCIÓN DE DAÑOS EN FRUTA Y SISTEMÁTICA PARA LA EVALUACIÓN DE EQUIPOS HORTOFRUTICOLAS

Barreiro P. *, Ruiz-Altisent M. *, Steinmetz, V#.

*ETSIA. Dpto. Ingeniería Rural. Avda Complutense s/n. 28.040 Madrid

#CEMAGREF. División de equipos agrícolas y de ingeniería de proceso de frutos. 361 Rue Jean Francois Breton. 34.033 Montpellier

Resumen: Se han desarrollado en laboratorio distintos modelos de predicción de daños, para las especies y variedades más exportadas, con el fin de determinar la potencial aceptabilidad o rechazo de daños de acuerdo con la normativa comunitaria. Se han desarrollado modelos de predicción para cargas quasi-estáticas (compresiones) y dinámicas (impactos) que abarcan completamente el periodo de maduración comercial de los frutos.

Se ha efectuado un proceso de simulación que integra la información obtenida en laboratorio a través de los modelos de predicción de daños con la correspondiente a la calibración de distintos frutos electrónicos (IS-100 y DEA-1, para cargas de impacto y compresión respectivamente).

Se ha diseñado una metodología de evaluación que recoge tanto las propiedades mecánicas de los frutos en sus distintos estados de madurez como los registros correspondientes a los frutos electrónicos. La sistemática de evaluación permite determinar el estado actual tanto de la maquinaria como de los procesos de manipulación de fruta.

1. INTRODUCCION

El estado actual de la fruta fresca en los mercados minoristas empeora de día en día. El consumo de fruta fresca decrece debido a la ausencia de calidad en los mercados. Investigaciones recientes (Kamp y Pedersen, 1990) han demostrado que menos de un 10% de los frutos etiquetados como categoría I cumplen la normativa comunitaria debido fundamentalmente a la presencia de daños mecánicos.

Por otra parte, los procesos de manipulación así como los equipos mecánicos se hacen cada vez más complejos. Por ello se hace evidente la necesidad de una normalización a la hora de evaluarlos y compararlos. Con este propósito se han venido desarrollando sensores denominados frutos electrónicos (Halderson y Skrobacki, 1986; Brown et al., 1990) capaces de registrar las cargas a las que se ven sometidos los frutos. Sin embargo, las propiedades mecánicas de los frutos tienen también un gran efecto sobre la susceptibilidad a daños mecánicos de los frutos (Chen y Zongnan, 1981; Chen et al., 1987; García y Ruiz, 1988; Rodríguez et al., 1990; Ruiz Altisent, 1990). En consecuencia, es necesario integrar ambas informaciones a la hora de realizar una evaluación correcta.

Hasta ahora, tan sólo se han efectuados comparaciones discretas entre los registros de los frutos electrónicos y las propiedades mecánicas de los frutos (Brown et al., 1989; Sober et al., 1990;

Schulte et al., 1992 & 1993). Día a día aumenta el rango de especies y variedades de fruta que son procesadas con los mismos equipos, incrementándose asimismo los tipos de tratamientos pre y post recolección empleados.

En investigaciones previas (Barreiro y Ruiz, 1993) se han estudiado tanto las propiedades mecánicas de distintas especies y variedades de fruta, desarrollándose así mismo modelos estadísticos previos de predicción de daños. Sin embargo, las características de los sistemas de modelización neuronal (Robert et al., 1989; Ros et al., 1993; Steinmetz y Delwiche, 1993) han llevado a considerar la posibilidad de adaptarlos a la modelización de daños mecánicos en frutos.

En este contexto, los objetivos fijados para el presente estudio fueron:

- 1) buscar modelos óptimos de predicción de daños mecánicos en frutos,
- 2) integrar la información tanto de las propiedades mecánicas de los frutos como de los registros de los frutos electrónicos para poder simular la aparición de daños, y
- 3) diseñar una sistemática de evaluación con el fin de establecer el estado actual de los procesos de manipulación y de los equipos mecánicos en relación a la normativa comunitaria.

2. MATERIAL Y METODOS

Los datos empleados en la presente investigación se obtuvieron a lo largo de las campañas 1992 y 1993. Con ellos se realizó previamente un estudio exhaustivo de las propiedades mecánicas y de la susceptibilidad a daños (Barreiro y Ruiz, 1993). En dicho estudio se emplearon tanto los tratamientos más frecuentes de almacenamiento en frío como los tipos de carga más habituales (compresión e impacto). A través de un estudio de mercado, se seleccionaron las especies y variedades más relevantes en la exportación:

- manzana: "Golden Delicious",
- pera: "Conferencia" y "Decana de Comicio",
- melocotón: "Maycrest" y "Springtime", y
- albaricoque: "Búlida" y "Canino".

2.1. Selección de las variables para la modelización

El primer paso para el desarrollo de los modelos de predicción fue la selección de la variable que habría de representar los daños mecánicos. La legislación comunitaria establece el máximo daño admitido para la Clase I (mínima categoría exportable) en términos de superficie externa dañada: 1cm² y 0.5 cm² para frutos de pepita y hueso respectivamente. Sin embargo, la superficie externa dañada depende del tamaño de la superficie de contacto entre dos cuerpos durante una carga, función asimismo de los radios de curvatura de ambos cuerpos (Horsfield et al., 1972). Por otra parte, cuanto menor es el radio de curvatura, mayor es la profundidad del daño. Así es posible encontrar daños con un volumen de tejido magullado equivalente y diferente superficie externa magullada, y por tanto diferente evaluación según la normativa. Por todo ello, se estableció en primer lugar un nuevo parámetro denominado "sección de magulladura" (Ec. 1) capaz de integrar ambos efectos. Con esta expresión, las unidades de la sección de magulladura resultan las mismas que para la superficie externa magullada.

$$b. s. = \pi \frac{w}{2} d (mm^2) \quad (1)$$

La sección de magulladura aparece definida en la Ec. 1, donde w es la anchura de magulladura (mm) y d es la profundidad (mm); esta expresión representa un valor igual al doble del área de la sección magullada.

En cuanto a la selección de las variables explicativas (*), se decidió aplicar el principio de la parsimonia

tanto a los equipos como a los datos empleados de manera que el proceso de evaluación pueda ser llevado a cabo con facilidad. Sobre la base de estudios previos (Chen et al., 1987; Rodriguez et al., 1990; Ruiz Altisent, 1990; Barreiro y Ruiz, 1993) se decidió desarrollar distintos modelos de predicción para cada variedad y tipo de carga (compresión o impacto), incluyendo en todos los casos "a priori" como variables explicativas las siguientes magnitudes: la firmeza de los frutos (FR,1), el nivel de carga (HI para impacto o FZC para compresiones, 2) y tratamiento de almacenamiento (ST,3).

Firmeza de los frutos. El método más extendido de determinación de la firmeza es el ensayo de penetración Magness-Taylor. Este ensayo, sin embargo, tiene dos inconvenientes fundamentales: es un ensayo destructivo (sólo puede ser llevado a cabo sobre una muestra), y su coeficiente de variación es elevado, especialmente en frutos de hueso. Por ello, en los últimos años se ha venido desarrollando un nuevo dispositivo para la determinación de la firmeza de los frutos (Chen y Zongnan, 1981; García y Ruiz, 1988; Ruiz Altisent, 1990, Jarén et al., 1992; Correa et al., 1992). Este elemento emplea impactos de baja energía para la determinación de la firmeza. El dispositivo permite la determinación de gran número de variables relacionadas con la deceleración sufrida por el impactador, incluyendo la duración del impacto. Los resultados de investigaciones previas (Barreiro y Ruiz, 1994; Steinmetz et al., 1995) han demostrado la clara relación existente entre el ratio fuerza-deformación máximas de impacto (FDR) respecto a la fuerza de penetración en el ensayo Magness-Taylor.

El dispositivo impactador presenta como principal ventaja su repetitividad (normalmente un 10% de coeficiente de variación aproximado), respecto al ensayo Magness-Taylor cuyo coeficiente de variación puede superar el 30% en frutos de hueso (Barreiro y Ruiz, 1992). Este ensayo puede además ser llevado a cabo de forma no destructiva para bajas alturas de impacto (Chen y Ruiz, 1994). Por todas estas razones la variable seleccionada para la medida de la firmeza fue la FDR en impacto.

Nivel de carga. Investigaciones previas (Barreiro y Ruiz, 1994) han incluido tanto ensayos de laboratorio como de campo. En los ensayos de laboratorio se han aplicado distintos niveles de carga para cada variedad, tratamiento de frío y tipo de carga (compresión e impacto) con el fin de alcanzar daños por encima y por debajo de los límites comunitarios. En los ensayos de impacto se dejó caer una masa constante sobre los frutos, estableciéndose el nivel de carga aplicado en función de la altura de caída del impactador. El nivel de carga a compresión se

* las variables explicativas han sido numeradas correlativamente a su aparición en el texto

estableció en términos de la fuerza máxima aplicada. Los niveles de carga tanto en compresión como en impacto se incluyeron en los modelos de predicción de daños de forma análoga; la relación existente entre estos parámetros de laboratorio y los registros de los frutos electrónicos se indica en el apartado 4; los frutos electrónicos empleados en el presente estudio han sido un IS-100 (Halderson y Skrobacski, 1986) capaz de registrar impactos, y un DEA-1 (varios autores, 1995) capaz de registrar compresiones.

Tratamiento de almacenamiento en frío. Se emplearon tres modalidades de tratamiento de almacenamiento frigorífico: sin almacenamiento (testigo), almacenamiento en frío con un 80% de H.R. ó con cubierta plástica; empleándose 1°C y 4°C para frutos de pepita y hueso respectivamente. Dado que el almacenamiento frigorífico ha demostrado su influencia sobre la susceptibilidad a daños mecánicos, se decidió incluir esta variable como un parámetro discreto y estudiar posteriormente su significación en la predicción de daños.

En el caso de los frutos de hueso, los datos correspondientes a la modalidad del almacenamiento frigorífico con 80% de H.R. no se emplearon en la modelización de daños, dado que el tratamiento demostró efectos no comercializables, perdiéndose más de un 20% del peso fresco de los frutos.

Particularidades en las variedades de albaricoque. Los cultivares de albaricoque muestran grandes variaciones en sus propiedades mecánicas a lo largo de la campaña de recolección comercial. Este hecho es debido no sólo a sus características biológicas sino a la elevada competencia establecida por las variedades más tempranas de melocotón, que determina la presencia en el mercado de albaricoques inmaduros.

Los albaricoques inmaduros muestran grandes diferencias en sus propiedades mecánicas cuando se comparan con los frutos maduros. Por ello, se creó una nueva variable explicativa discreta, denominada "madurez" (M, 4) con dos modalidades. En el presente estudio, frutos maduros e inmaduros procedentes de tres fechas distintas de recolección comercial fueron ensayados.

Un clasificador de mínima distancia (Judez, 1989) basado en datos centrados y reducidos se empleó para establecer el valor de la variable madurez (M, 4). Las variables empleadas en el clasificador fueron todas las descritas en la sección 2 del apartado anterior.

2.2. Metodología de evaluación de los modelos.

Como primer paso, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) a un 5% de nivel de significación para comprobar que las variables explicativas seleccionadas "a priori" eran efectivamente eficaces en la predicción de daños. Posteriormente se llevaron a cabo distintos ajustes neuronales.

Para la comparación de los modelos de predicción de daños mecánicos se empleó el coeficiente de correlación (r) existente entre los daños observados y predichos. Otro procedimiento empleado en la evaluación de los modelos de predicción fue la clasificación de los daños según la normativa comunitaria. El criterio empleado para la aceptación de un modelo fue la obtención de un error en la clasificación inferior a la tolerancia comunitaria (10% para la Clase I).

En la Figura 1 se presenta la comparación de la clasificación de los daños observados y predichos bajo la normativa comunitaria, donde

- A es el porcentaje de frutos no clasificables,
- B es el porcentaje de frutos bien clasificados,
- C es el porcentaje de daños no detectados, y
- D es el porcentaje de daños detectados en exceso; tanto "C" como "D" han de ser inferiores al 10% para que el modelo se aceptable.

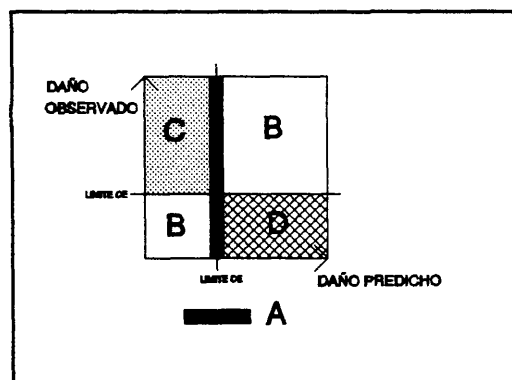


Figure 1. Comparación de la clasificación de daños observados y predichos.

Cada uno de los grupos de clasificación se definió empleando el intervalo de confianza para cada una de las predicciones (5% de nivel de significación). Una predicción habría de mostrar una clasificación homogénea, en todo su intervalo de confianza, e igual a la del daño observado para ser considerada bien clasificada; el porcentaje de daños bien clasificados se incrementa a menor intervalo de confianza, es decir, al aumentar el ajuste del modelo (r^2). Siempre que el intervalo de confianza recogía

clasificaciones aceptables o rechazables (por encima y por debajo del límite comunitario) el daño se consideraba no clasificable, exceptuando el caso en que el daño observado estuviera dentro de una banda igual a $\pm 5\%$ del límite comunitario, ya que el daño observado estaría asimismo en la zona umbral.

2.3. Ajuste de los modelos mediante redes neuronales

Las redes neuronales están basadas en la emulación del cerebro humano. Una red se compone de numerosas neuronas o elementos procesadores (PEs) que están conectados entre sí. Normalmente, las neuronas en el cerebro humano se encuentran estructuradas de forma jerárquica, facilitándose el procesamiento de la información. Sobre esta base se han desarrollado las redes neuronales de propagación hacia delante (Schalkoff, 1992).

Los PEs situados al comienzo de la red (entradas) fueron las variables explicativas seleccionadas previamente, y el PE situado al final (salida) fue la sección de magulladura.

La función de transformación (Ec. 2) puede seleccionarse dependiendo de las características de las entradas y de las salidas. Para la predicción de daños, se seleccionó una función sigmoide; esta función fue obtenida inicialmente de un modelo biológico y se caracteriza porque permite realizar ajustes no lineales.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}} \quad (2)$$

El número de iteraciones (correcciones de los pesos) se fijó de forma empírica en 40.000 para las variedades de pepita y 20.000 para las variedades de hueso; se dispuso aproximadamente de un 30% más de individuos en las variedades de pepita que en las de hueso. Este número se corresponde con el número de iteraciones necesarias hasta alcanzar la convergencia en el proceso de aprendizaje.

En el ajuste neuronal, se emplearon tanto un conjunto de datos de ajuste como un conjunto de datos de comprobación. El conjunto de comprobación contuvo en número aproximadamente la mitad de las observaciones presentes en el conjunto de ajuste; este conjunto se compuso de la segunda repetición de los ensayos realizados en la campaña 1993. El conjunto de datos de comprobación no se empleó en el ajuste de los modelos y por tanto sus resultados son un indicador de la robustez de los mismos.

En la comparación de los resultados obtenidos, entre los conjuntos de datos de ajuste y de comprobación,

en la predicción de daños se empleó el coeficiente de correlación entre los daños observados y predichos. La evaluación de la clasificación de los daños bajo la normativa comunitaria sólo se utilizó con el conjunto de datos de ajuste dado que un bajo número de muestras (≤ 100) produce desviaciones en la clasificación.

En los casos en que con un ajuste "generalista" de los modelos, empleo del rango global de datos, no se obtuvo un resultado satisfactorio desde el punto de vista de la tolerancia comunitaria se decidió comprobar si nuevos métodos de ajuste de la red neuronal podrían redundar en una mejora. Se estudiaron dos posibles métodos:

1) Selección de la muestra. Dado que el conjunto de datos de ajuste contenía un elevado número de individuos, la presencia de grupos de individuos de una características similares podría determinar un efecto desviatorio en el aprendizaje de la red generalista. Por ello, se creó un nuevo conjunto de datos de ajuste siguiendo el criterio de agregación de Ward (Judez, 1989). Se escogió un umbral de inercia por debajo del cual cada uno de los grupos de individuos sería incluido en el conjunto de datos de ajuste como una única observación. El aprendizaje de la red neuronal se efectuó sobre dicho conjunto seleccionado y posteriormente re-entrenado para el conjunto total de datos de ajuste; los coeficientes de aprendizaje para el segundo ajuste fueron menores para evitar oscilaciones.

2) Red especialista. En este caso, fue necesario identificar las zonas donde el aprendizaje fue inicialmente más desviado, para crear una nueva red neuronal capaz de cubrir dicho rango de datos. Una vez que la zona a mejorar había sido establecida, se empleó un clasificador de mínima distancia para determinar bajo cuál de las redes neuronales habían de ser ensayado un individuo anónimo cualquiera.

3. RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS MODELOS DE PREDICCIÓN

3.1. Resultados de los primeros ajustes neuronales

Los ajustes de las redes neuronales se llevaron a cabo empleando el paquete informático "Neuralworks Professional II plus". Las primeras arquitecturas empleadas se muestran en la Tabla 1. En ella, cada red neuronal es identificada mediante tres dígitos correspondientes al número de entradas, PEs en la capa oculta, y salidas.

Tabla 1. Primera arquitectura neuronal empleada.

Modelo		
Variedad	Compresión	Impacto
"Conferencia"	3-1-1	3-1-1
"Decana"	3-1-1	3-0-1
"Golden"	3-1-1	3-1-1
"Maycrest"	3-1-1	3-1-1
"Springtime"	3-1-1	3-1-1
"Búlida"	4-1-1	4-1-1
"Canino"	4-1-1	4-1-1

Los resultados obtenidos con este primer ajuste no alcanzaron en muchos casos el rango de error deseado ("C" y "D" por debajo del 10%, ver Figura 1), incluso incrementando el número de capas neuronales ocultas. Por ello, se decidió comprobar si bien un proceso de selección de la muestra, o bien el empleo de una red especialista podría redundar en una mejora de los resultados, como ya se ha indicado en el apartado 2.5. El método que demostró ser más efectivo fue el aprendizaje especialista, aunque los resultados tampoco satisficieron las restricciones de tolerancia de la normativa comunitaria.

3.1. Empleo de nuevas variables para la optimización de los modelos

Como solución alternativa, se decidió estudiar la introducción de nuevas variables explicativas en la predicción de daños. Sin embargo, este paso establecía complicaciones dado que inicialmente las variables explicativas habían sido escogidas con el principio de la parsimonia como una de las restricciones principales.

La realización de la evaluación de procesos de manipulación o de equipos mecánicos precisa el empleo de los modelos de predicción de daños (ver apartado 5). Dichos modelos necesitan al menos la información del sensor de firmeza y de algún fruto electrónico (IS-100 o DEA-1). Por ello se decidió seleccionar las nuevas variables explicativas entre los parámetros determinados por el sensor de firmeza, evitando así el incremento del número de sensores a emplear en el proceso de evaluación de la maquinaria. A través de la revisión de la bibliografía existente (Chen y Zongnan, 1981; García y Ruiz, 1988; Ruiz Altisent, 1990; Jarén et al., 1992; Correa et al., 1992) se seleccionaron:

- DFI (5), deformación máxima en el impacto
- TPI (6), duración del impacto

- FZI (fuerza máxima del impacto)/TPI (7)
- FZI* TPI (8)
- DFI/TPI (9)
- FZI*DFI (10)
- FZI²/TPI (11)
- FZI/DFI² (12)

Por otra parte, y sobre la base teórica se seleccionaron:

- FZI*TPI² (13); (dimensión de una energía)
- FZC/FR (14); (dimensión de una deformación)
- HI/FR (15); (buscando la analogía con 14 para cargas de impacto)
- (FZI*DFI)/FZC (16); (dimensión de una deformación)
- FZC*DFI (17); (dimensión de una energía)
- FZC²/FR (18); (dimensión de una energía)
- FR*DFI² (19); (dimensión de una energía)

FZI y HI se han relacionado con los registros de los frutos electrónicos (IS-100 y DEA-1) en el apartado 4.

Al conjunto de variables explicativas, numeradas de la 1 a la 19, se le aplicó un regresión paso a paso con el fin de determinar la significación de las mismas en la predicción de daños. Las variables finalmente seleccionadas (Tabla2) mostraron en todos los casos un nivel de significación inferior al 5%. De los datos reflejados en dicha tabla se deduce que el incremento de variables no mejoró los resultados en los modelos de impacto de las variedades "Golden" y "Decana", ni en el modelo de compresiones de "Golden".

Con las variables que aparecen indicadas en la Tabla 2, se crearon nuevas redes tanto generalistas como especialistas (Tabla 3) buscando la optimización no-lineal de los modelos.

Tabla2. Nuevas variables de impacto seleccionadas a través de una regresión paso a paso. Los números refieren a las variables definidas previamente.

Modelo		
Variedad	Compresión	Impacto
"Conferencia"	1,2,3,7,11,12,14	1,2,3,10,11,15
"Doyenne "	1,2,3,5,14,16	2,3
"Golden"	1,2,3	1,2,3
"Maycrest"	1,2,3,13,14	1,2,3,6,15
"Springtime"	1,2,3,5,9,12,14	1,2,3,5,6,15,19
"Búlida"	1,2,4,7,10,14	1,2,4,7
"Canino"	1,2,4,6,10	1,2,4,10,15

Las redes generalistas cubrieron el rango global de madurez comercial. En cuanto a las redes especialistas, en la mayoría de los casos se apreció que la zona de peor aprendizaje se producía para un daño observado superior a doble del límite comunitario. Dado que este valor es muy elevado, se decidió entrenar una red especialista sólo para daños observados inferiores al doble del límite comunitario. Cualquier individuo anónimo, por tanto, habría de ser sometido en primer lugar a un clasificador de mínima distancia. La decisión estaría basada en el daño observado del individuo más próximo.

Tan sólo en los modelos de impacto y compresiones de la variedad "Maycrest" se observó que la zona de aprendizaje erróneo se situaba alrededor del umbral de aceptación comunitario. Por ello, se decidió entrenar una red generalista. Posteriormente, una evaluación de mínima distancia se llevaría a cabo con el fin de determinar si los individuos pertenecían a la zona de aprendizaje erróneo. En caso de pertenecer a dicho area, una red especialista permitiría ofrecer la respuesta final. Los resultados finales obtenidos con los modelos neuronales aparecen reflejados en la Tabla 3.

4. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROCESO DE SIMULACION

Como ya se ha mencionado en el apartado 2.1, fue necesario relacionar los niveles de carga de laboratorio con los niveles de carga habitualmente sufridos por los frutos durante la manipulación y clasificación mecánica. En los últimos tiempos se han desarrollado frutos electrónicos capaces de registrar las cargas a las que se ven sometidos los frutos (Halderson y Skrobacki, 1986; Brown et al, 1990). Con este fin se efectuó un ensayo de calibración tanto para el sensor de impactos IS-100, como para el de compresiones, DEA-1. En ambos casos se estableció una ecuación de calibración entre las cargas de laboratorio y los parámetros de los frutos electrónicos.

En cargas dinámicas (impactos), se determinó la ecuación de calibración (Ec. 3) donde HI es la altura de caída del impactador (cm) de energía equivalente al de IS-100, y AC_{IS-100} es la aceleración máxima registrada por el fruto electrónico. Los resultados mostraron un coeficiente de correlación de 0.98 para 127 muestras (límites de calibración 30-160g).

$$HI = 0.347 AC_{IS-100} - 6.968 \quad (3)$$

Tabla 3. Resultados finales obtenidos con las redes neuronales. Donde: r es el coeficiente de correlación entre los daños observados y predichos por el modelo, y "C" y "D" son los errores de clasificación; "C" y "D" han de estar por debajo del 10% para considerar aceptable un modelo. El rango de valores obtenidos para los coeficientes de correlación es debido a la amplitud de las condiciones modelizadas que cubren el conjunto del periodo de madurez comercial de los frutos.

Modelo		
Variedad	Compresión	Impacto
"Conferencia"	<i>Especialista</i>	<i>Generalist</i>
	r=0.78;n=480	r=0.82;n=480
	C=5.4% D=6.9%	C=7.5% D=2.3%
"Decana"	<i>Especialista</i>	<i>Generalist</i>
	r=0.72;n=400	r=0.79;n=400
	C=8.5% D=4.8%	C=6.8% D=5.2%
"Golden"	<i>Generalista</i>	<i>Generalista</i>
	r=0.82;n=456	r=0.88;n=456
	C=7.5% D=4.8%	C=0.7% D=7.7%
"Maycrest"	<i>Especialista</i>	<i>Especialista</i>
	r=0.79;n=228	r=0.71;n=228
	C=3.9% D=2.7%	C=7.9% D=3.5%
"Springtime"	<i>Generalista</i>	<i>Generalista</i>
	r=0.81;n=238	r=0.80;n=238
	C=1.7% D=9.2%	C=3.4% D=9.7%
"Búlida"	<i>Especialista</i>	<i>Especialista</i>
	r=0.64;n=184	r=0.64;n=184
	C=8.2% D=2.2%	C=4.9% D=2.7%
"Canino"	<i>Especialista</i>	<i>Especialista</i>
	r=0.67;n=139	r=0.68;n=139
	C=7.2% D=2.2%	C=8.6% D=0.0%

Para cargas quasi-estáticas (compresiones), se estableció una ecuación de calibración (Ec. 4) donde, FZC es la fuerza máxima de compresión (N) y R_{DEA-1} es la resistencia eléctrica registrada por el fruto electrónico en (Kohm). Los resultados mostraron un coeficiente de correlación de 0.94 para 252 muestras (límites de calibración 20-0.4 Kohm).

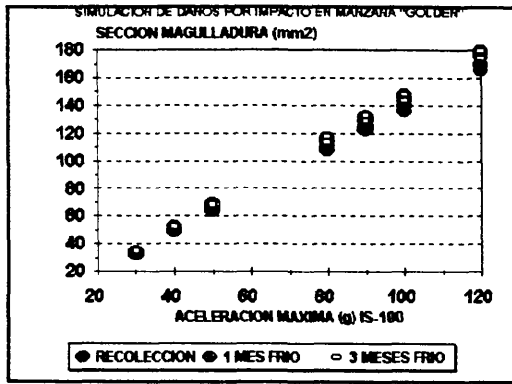


Figura 2. Simulación de daños por impacto en manzana "Golden". Se observa un efecto reducido de la evolución de la firmeza sobre la susceptibilidad a magulladura. Valores de aceleración máxima superiores a 70g producen daños de un tamaño equivalente al límite comunitario para la Clase I (100 mm²).

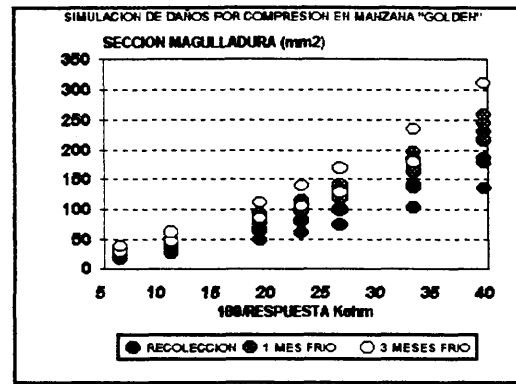


Figura 4. Simulación de daños por compresión en manzana "Golden". Un nivel de resistencia eléctrica de 5Kohm (20*100/R) produce daños de un tamaño equivalente al límite comunitario para la Clase I (100 mm²); 3.3 Kohm (30*100/R) son necesarios en recolección.

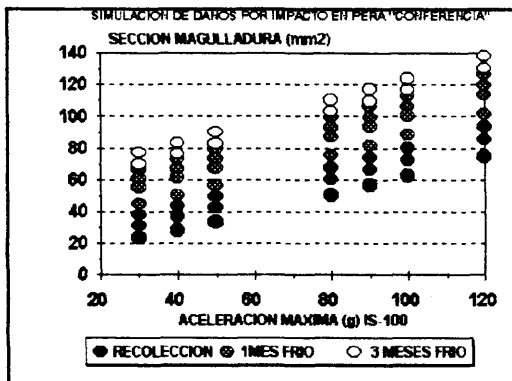


Figura 3. Simulación de daños por impacto en pera "Conferencia". Se observa un gran efecto de la evolución de la firmeza sobre la susceptibilidad a magulladura. Valores de aceleración máxima superiores a 70g producen daños de un tamaño equivalente al límite comunitario para la Clase I (100 mm²); se necesitarían valores superiores de impacto en recolección para alcanzar el límite de daño comunitario.

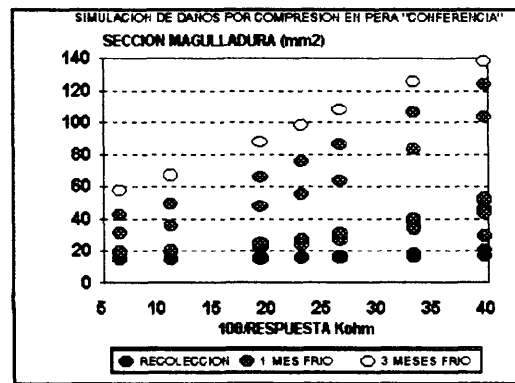


Figura 5. Simulación de daños por compresión en pera "Conferencia". Se observa un gran efecto de la evolución de la firmeza sobre la susceptibilidad a daños. Tras un mes de almacenamiento en frío, un nivel de resistencia eléctrica de 3.3Kohm (30*100/R) produce daños de un tamaño equivalente al límite comunitario para la Clase I (100 mm²). Nótese que no hay predicciones de daños por encima de 200 mm² debido al rango cubierto por el modelo. Sin embargo, tras tres meses de almacenamiento en numerosos casos se producen daños que superan este nivel.

$$FZC = e^{(5.783 - 1.338 \ln(R))} \quad (4)$$

Finalmente, se llevó a cabo un proceso de simulación (Figuras 2 a 5) para determinar el límite de carga necesario para causar daños por encima del máximo daño admitido por la legislación comunitaria (100mm² y 50 mm² para frutos de pepita y hueso respectivamente); el límite de carga se ha

determinado en términos de aceleración máxima para la simulación de impactos, y en términos de resistencia eléctrica para la simulación de compresiones.

Los principales resultados obtenidos para el proceso de simulación pueden resumirse de la siguiente manera:

- se observa un gran efecto de la evolución de la firmeza durante el almacenamiento frigorífico sobre la susceptibilidad de las peras "Conferencia" (Figura

3), así como las variedades de melocotón y albaricoque. La evolución de la firmeza no mostró este efecto en manzana "Golden" (Figura 2) ni en pera "Decana",

- el límite de carga de referencia para impactos, daño por encima del límite comunitario, en frutos de pepita alcanza 70g descendiendo hasta 50g cuando se trabaja con frutos de hueso. Estos valores de referencia varían a lo largo del periodo de maduración comercial dependiendo de la variedad como se muestra en las Figuras 2 a 5, y

- el límite de carga de referencia para compresiones, daños por encima del límite comunitario, en frutos de pepita alcanza 5Kohm. Los frutos de hueso muestran una mayor susceptibilidad a compresiones, siendo su límite de carga de referencia 20Kohm; la resistencia eléctrica disminuye con el incremento de la carga aplicada.

5. RESULTADOS EN LA EVALUACION DE PROCESOS Y EQUIPOS MECANICOS

Una vez obtenida una solución aceptable en la modelización (errores en la clasificación inferiores a la tolerancia comunitaria), se diseñó una metodología de evaluación de procesos y equipos mecánicos de manipulación de fruta. Esta sistemática de evaluación se ha desarrollado con el fin de ayudar a los productores en el conocimiento de la calidad de la maquinaria y procedimientos empleados. Para ello se ha integrado la información referente a la firmeza de los frutos y los tratamientos de almacenamiento, con los registros obtenidos por los frutos electrónicos (IS-100 y DEA-1) con el fin de atribuir la cuantía de daño producible.

Cuatro niveles de carga se establecieron a la hora de realizar la evaluación:

- **cargas aceptables** en aquellos casos en que el daño predicho se encuentra entre 0-80% del límite comunitario,
- **cargas de bajo riesgo** para daños predichos entre un 81-90% del límite comunitario,
- **cargas de alto riesgo** para daños predichos entre un 91-99% del límite comunitario, y
- **cargas rechazables** para daños predichos iguales o superiores al límite comunitario.

Una vez definidas las categorías de cargas, fue necesario diseñar la metodología de evaluación. Los frutos electrónicos registran la información referente a las cargas aplicadas a los frutos. Sin embargo, el número de cargas aplicadas a lo largo de un proceso puede ser muy elevado y con ello el tiempo necesario

para procesar la información. La utilización de la carga máxima exclusivamente en la evaluación acelera el proceso pero merma la cantidad de información. Por ello, se decidió emplear las cuatro cargas máximas (Li) correspondientes a cada uno de los cuartiles del histograma de cargas registradas por el fruto electrónico.

En cuanto al sensor de firmeza, la evaluación se realiza empleando la información de una base de datos mecánicos con el fin de normalizar la comparación entre los distintos procesos y equipos mecánicos de manipulación.

El número de muestras procesadas en la evaluación es por tanto igual a cuatro veces el número de frutos. La predicción de daños se realiza en base a dichos datos, obteniéndose tantas predicciones de daños como muestras; la metodología global de evaluación aparece resumida en la Figura 6.

Sobre el conjunto de daños predichos se diseñaron dos apartados diferentes en la evaluación: una evaluación general del proceso, y una identificación de los elementos deficientes.

5.1. Evaluación general

Un fruto precisa la presencia de un sólo daño por encima del límite comunitario para ser considerado rechazable. Por esta razón se decidió emplear en la evaluación general el mayor daño predicho por fruto con el fin de evaluar el posible rechazo del mismo según la normativa comunitaria. Dado que se habían definido previamente cuatro tipos de cargas, los resultados pueden agruparse asimismo en cuatro categorías:

- **AC** como el porcentaje de frutos aceptables
- **LR** como el porcentaje de frutos con bajo riesgo de ser rechazados,
- **HR** como el porcentaje de frutos con alto riesgo de ser rechazados, y
- **RJ** como el porcentaje de frutos rechazables.

El criterio de evaluación (Ec. 5) se definió de acuerdo con la tolerancia comunitaria, 10% en peso o número de frutos para la Clase I. Siempre que el porcentaje de frutos con alto riesgo de rechazo o directamente rechazables supere el 10% es necesaria la realización de una revisión del proceso o la maquinaria en curso. De la misma manera si el porcentaje de frutos bajo cualquier tipo de riesgo de rechazo ($LR+HR+RJ$) supera el 20% la revisión será igualmente necesaria.

si $HR+RJ \geq 10\%$ or $LR+HR+RJ \geq 20\%$
revisar el equipo (5)

5.2. Identificación de los elementos deficientes

Finalmente, se decidió realizar una evaluación individual de las cuatro cargas seleccionadas a través de los porcentajes AC, LR, HR, RJ obtenidos para cada una de ellas.

Se creó un sistema de decisión que puede resumirse de la forma siguiente:

1) si las cuatro cargas (Li) precisan un revisión (Ec.5), todos los registros del fruto electrónico por encima del valor mínimo de Li son identificados con el fin de mejorar los elementos que los han generado. Una vez realizada la mejora, se repite la toma de datos por parte del fruto electrónico,

2) si alguna de las Li está dentro de la tolerancia comunitaria, se efectúa una interpolación para determinar el umbral de carga por encima del cual los registros han de ser identificados y los elementos mejorados. Después de realizada la mejora, la toma de datos y con ello el proceso de evaluación es repetido, finalmente

3) si las cuatro cargas (Li) se encuentran dentro de la tolerancia la evaluación final del proceso o equipo es positiva. Por tanto en este caso el proceso o equipo se ajusta a la normativa comunitaria actual.

6. CONCLUSIONES

Se han desarrollado modelos de predicción de daños mecánicos, usando tanto procesos estadísticos como neuronales, para las principales especies y variedades exportadas: manzana ("Golden Delicious"), pera ("Conferencia" y "Decana de Comicio"), melocotón ("Maycrest" y "Springtime") y albaricoque ("Búlida" y "Canino").

Los modelos de predicción permiten clasificar los daños potenciales (en aceptables o rechazables) según la normativa comunitaria. Los errores cometidos en la clasificación, tanto por exceso como por defecto, están dentro del umbral de tolerancia comunitaria (10% para la Clase I).

Los modelos de predicción de daños integran la información referente a la susceptibilidad de daños en recolección, almacenamiento en frío y posterior maduración a temperatura ambiente; se ha cubierto el rango global de maduración comercial con los modelos.

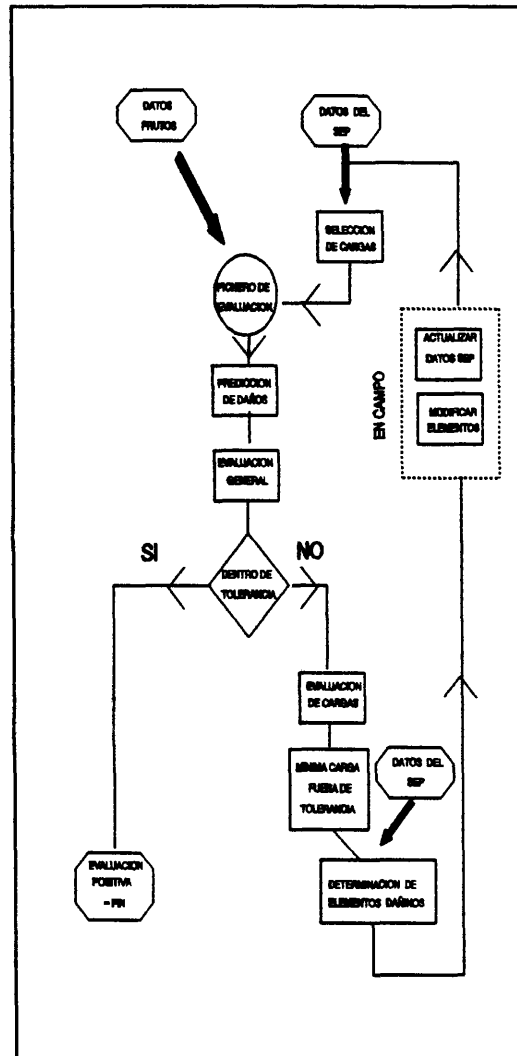


Fig. 6. Algoritmo para la evaluación de procesos de manipulación de frutos y sus equipos mecánicos. La información tanto de los modelos de predicción como de los frutos electrónicos es integrada en su desarrollo.

Los modelos de predicción de daños integran también la información referente a distintos tipos de carga (compresión e impacto), permitiendo simular efecto de la carga bajo diferentes condiciones de susceptibilidad de los frutos.

Se ha llevado a cabo un ensayo de calibración con el fin de introducir la información recogida por los frutos electrónicos (IS-100 y DEA-1) en los modelos de predicción de daños.

Se ha efectuado un proceso de simulación integrando la información de los modelos de predicción de daños y de los frutos electrónicos tanto de compresión (DEA-1) como de impacto (IS-100), determinándose los niveles máximos de carga admisibles de acuerdo con los límites de daños comunitarios.

Se ha desarrollado una sistemática de evaluación de procesos de manipulación y de equipos mecánicos con el fin de determinar el estado actual de las instalaciones en relación con la calidad física de los frutos.

7. AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto CAMAR nº 8001CT91-0206: "Calidad en frutos: desarrollo de ingeniería para la mejora en el mantenimiento de la calidad durante las operaciones de pre y post-cosecha".

Al CEBAS (Murcia) y especialmente a Dr. Fernando Riquelme por su colaboración en la investigación.

A la Cooperativa frutícola de Montoliu (Lérida) y especialmente a D. Jaume Roque Calzada por su colaboración y apertura de instalaciones a la investigación.

A ANECOOP (Valencia) por su colaboración y apertura de instalaciones a la investigación.

8. BIBLIOGRAFIA

Barreiro P.; M. Ruiz-Altisent and F. Riquelme. 1992. *Segregación de variedades de albaricoque y de sus estados fisiológicos de madurez mediante ensayos mecánicos*. 24 International Conference on Agricultural Mechanization. Zaragoza. Vol. IIpp:533-544

Barreiro P. and M. Ruiz-Altisent. 1993. *Bruise susceptibility in pome fruits under different loading and storage conditions*. IV International Symposium on Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering Mechanization, Valencia/Zaragoza. Paper nº 935.22

Barreiro P. 1994. *Modelos para la simulación del comportamiento mecánico y de los umbrales de daño en los principales cultivares de albaricoque, manzana, melocotón y pera*. Tesis Doctoral.

Brown G.K.; C.L. Burton; S.A. Sargent; N.L. Schulte-Pason; E. J. Timm and D.E. Marshall. 1989. *Assessment of apple damage on packing lines*. Applied Engineering in Agriculture Vol. 5(4) pp:475-484

Brown G.K.; N.L. Schulte-Pason and E. J. Timm. 1990. *Impact classification using the Instrumented Sphere*. ASAE paper nº 90-6001

Correa P.; M. Ruiz-Altisent Altisent and J. L. De la Plaza. 1992. *Physical parameters in relation to physiological changes of avocado during ripening (20°C) and cold storage (6°C) in different conditions*. International Conference on Agricultural Mechanization, Uppsala. 1992 Paper nº 9211-16

Chen P. and S. Zongnan. 1981. *Impact parameters related to bruise injury in apples*. ASAE paper nº81-3041

Chen P.; M. Ruiz-Altisent; F. Lu and A.A. Kader. 1987. *Study of impact and compression damage on Asian Pears*. Transactions of the ASAE Vol. 30(4):1193-1197.

Chen P. and M. Ruiz Altisent. 1994. *Effect of impacting mass on firmness sensing of fruits*. ASAE paper nº93-6542

Garcia C. and M. Ruiz-Altisent. 1988. *Impact parameters related to bruising in selected fruits*. ASAE paper nº88-6027 (Rapid City)

Halderson J.L. and A. Skrobacki. 1986. *Dynamic performance of an impact telemetry system*. ASAE paper nº86-3030

Horsfield B.C.; R.B. Fridley and L. Claypool. 1972. *Application of theory of elasticity to the design of fruit harvesting and handling equipment for minimum bruising*. Transactions of the ASAE vol15(4)pp:746-750

Jarén C.; M. Ruiz-Altisent and R. Perez de Rueda. 1992. *Sensing physical stage of fruits by their response to non-destructive impacts*. International Conference on Agricultural Mechanization, Uppsala 1992 paper nº 9111-113

Judez L. 1989. *Técnicas de análisis de datos multidimensionales*. Ed. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, pp:301

Kamp J. and J. Pedersen. 1990. *Quality of imported and domestic fruits and vegetables in the Danish retail trade with special reference to mechanical damage*. Workshop on impact damage of fruits and vegetables. Zaragoza. Vol. IIpp:9-16

Robert P.; D. Bertrand; M. Crochon and J. Sabino. 1989. *A new mathematical procedure for NIR analysis: the lattice technique. Application to the prediction of sugar content of apples*. Applied Spectroscopy 43(6) 1576 GAL 76

Rodriguez L.; M. Ruiz-Altisent and M.R. De Felipe. 1990. *Differences in the structural response of "Granny-Smith" apples under mechanical impact and compression*". Journal of Texture Studies 21(1990) 155-164

Ros F.; A. Brons; F. Sevilla; G. Rabatel and C. Touzet. 1993. *Combination of neural network and statistical methods for sensory evaluation of biological products: on-line beauty selection of flowers*. Proceedings of the International Workshop on Artificial Neural Networks, Spain 1993 pp:726-731

Ruiz-Altisent M. 1990. *Impact parameters in relation to bruising and other fruit properties*. Workshop on impact damage of fruits and vegetables. Zaragoza. Vol. IIpp:27-31

Schalkoff R. 1992. *Pattern recognition. Statistical, structural and neural approaches*. Ed. John Wiley

- & Sons, pp:364.
- Schulte N.L.; G.K. Brown and E.J. Timm. 1992. *Apple impact damage thresholds*. Applied Engineering in Agriculture Vol.8(1) pp:55-60
- Schulte N.; E. Timm and G. Brown. 1993. "*Red Heaven*" peach impact damage thresholds. IV International Symposium on Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering Mechanization, Valencia/Zaragoza. Paper n° 935.18
- Sober S.S.; H.R. Zapp and G.K. Brown. 1990. Simulated packing line impacts for apple bruise prediction. Transactions of the ASAE Vol.33(2) pp:629-636
- Steinmetz V. and J. Delwiche. 1993. *Neural network analysis of rose straightness*. International Conference for Agriculture and Food Equipment and Process control, Nimes pp:253-263.
- Steinmetz V.; Crochon M.; Bellon V.; Barreiro P.; García J.L.;1995. *Sensors for fruit firmness assessment: comparison and fusion*. accepted by the Journal of Agricultural Engineering Research.
- Various authors. 1995. *CAMAR Project n° 8001CT91-0206: "Quality of fruits". Final Report*.