



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE NATURALI E  
AMBIENTE  
TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di laurea in Scienze e culture della gastronomia

TITOLO

Applicazioni dell'acustica per la determinazione di  
parametri qualitativi negli alimenti

Relatore:

*Prof. Lorenzo Guerrini*

Correlatore:

*Prof. Marinello Francesco*

Laureando:

*Andrea Tambara*

Matricola n. 2019865

ANNO ACCADEMICO 2023- 2024



*A mia madre, che con amore ed  
intraprendenza mi ha permesso di essere ciò che sono*



## **INDICE**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Abstract</b>  | <b>V</b>  |
| <b>1. Introduzione</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. Cosa è il suono e un'onda sonora</b>   | <b>2</b>  |
| 2.1 Come si propaga un'onda sonora nei fluidi ideali   | 3         |
| 2.1.1 Equazione di Eulero  | 3         |
| 2.1.2 Equazione di continuità  | 5         |
| 2.1.3 Equazione di stato   | 6         |
| 2.1.4 equazione d'onda   | 7         |
| 2.1.5 Propagazione delle onde nei fluidi ideali quali gas e liquidi  | 8         |
| 2.2 Riflessione, rifrazione e diffrazione del suono  | 9         |
| 2.2.1 Riflessione e rifrazione del suono   | 9         |
| 2.2.2 Diffrazione del suono  | 10        |
| <b>3. Parametri qualitativi e determinazione: tecniche distruttive</b>   |           |
| <b>4. Applicazione delle proprietà acustiche per la determinazione dei parametri qualitativi</b>                                       | <b>17</b> |
| 4.1 Determinazione indice di maturazione e consistenza   | 17        |
| 4.2 Determinazione parametro qualitativo: croccantezza   | 31        |
| 4.3 Studio sull'uovo: spessore, resistenza e crepe   | 40        |
| 4.4 Monitoraggio acustico degli occhi del formaggio Emmental   | 52        |
| 4.5 Rilevamento di chicchi di grano danneggiati tramite analisi acustica   | 58        |
| <b>5. Applicazione delle teorie acustiche per la determinazione di parametri qualitativi delle noci: un'esperienza del laboratorio</b> | <b>62</b> |
| 5.1 Importanza dell'umidità nelle noci   | 62        |
| 5.2 Metodi e strumenti utilizzati  | 64        |
| 5.3 Ottenimento dei dati tramite PCA e analisi   | 65        |
| 5.4 Risultati e Conclusioni  | 69        |
| <b>6. Conclusioni</b>  | <b>70</b> |
| <b>7. Bibliografia</b>   | <b>71</b> |



## ***ABSTRACT***

La presente tesi esplora l'applicazione dell'analisi acustica nel settore alimentare, focalizzandosi sull'utilizzo delle onde sonore per valutare le proprietà fisiche e la qualità dei materiali alimentari. Attraverso l'approfondimento delle basi teoriche dell'analisi acustica e l'analisi di studi e esperimenti significativi, viene evidenziato il potenziale di questa tecnica nell'ambito della valutazione e del controllo di qualità degli alimenti. Diverse applicazioni pratiche vengono esaminate, dimostrando l'efficacia dell'analisi acustica nel monitoraggio della maturazione del formaggio, nella valutazione della consistenza delle noci e nell'individuazione di difetti in vari prodotti alimentari. I risultati ottenuti da questi studi sottolineano l'importanza e l'impatto dell'analisi acustica nel settore alimentare, offrendo nuove prospettive per l'innovazione e lo sviluppo di metodologie di analisi e controllo di qualità.





## ***1. INTRODUZIONE***

Il suono è una forma di energia che si propaga attraverso onde meccaniche e svolge un ruolo fondamentale in una vasta gamma di contesti, dall'ambito musicale e artistico a quello scientifico e tecnologico. Nel contesto alimentare, l'analisi acustica è diventata un'importante area di ricerca per valutare la qualità e la consistenza di vari prodotti alimentari, come frutta, formaggi e cereali. L'impiego di strumenti e tecniche acustiche consente di ottenere informazioni dettagliate sulla struttura e sulle proprietà fisiche di tali alimenti, fornendo un valido supporto per il controllo di qualità e la valutazione sensoriale. Ad esempio, nel caso dei formaggi, l'analisi acustica ha dimostrato di essere un metodo non distruttivo per monitorare la formazione degli occhi durante la maturazione del formaggio Emmental, consentendo di rilevare diverse fasi della formazione degli occhi e di ottenere risultati coerenti con le informazioni ottenute dalle immagini del formaggio , . Inoltre, l'impiego di dispositivi di impatto e sensori piezoelettrici, unitamente all'elaborazione dei segnali acustici tramite software specifici, ha permesso di acquisire e analizzare impulsi acustici per valutare la consistenza e l'umidità del formaggio durante il periodo di maturazione . Parallelamente, nel campo tecnologico, l'utilizzo di segnali acustici ha dimostrato di essere efficace per rilevare danni o difetti in materiali solidi, come ad esempio i chicchi di grano. L'analisi acustica è stata impiegata per valutare la croccantezza di diverse cultivar di mele, utilizzando l'analisi delle componenti principali (PCA) per esplorare la possibile suddivisione delle mele in base alla combinazione di componenti strumentali meccanico-acustiche , . In questo contesto, l'impiego di modellazione statistica e algoritmi avanzati ha permesso di ottenere risultati precisi e affidabili, aprendo nuove prospettive per l'applicazione dell'analisi acustica in ambiti industriali e di ricerca. In questa prospettiva, l'analisi acustica si configura come un potente strumento non distruttivo per monitorare e valutare la qualità e le caratteristiche di materiali e alimenti, offrendo nuove opportunità per lo sviluppo di metodologie di analisi e controllo sempre più avanzate e affidabili. Questi sviluppi rappresentano un passo significativo verso l'integrazione di tecniche acustiche nell'ambito alimentare e tecnologico, aprendo nuove prospettive per l'innovazione e lo sviluppo di nuove metodologie di analisi e controllo di qualità.

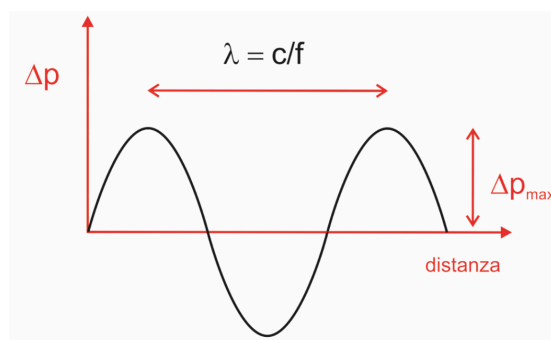
## 2. COSA E' IL SUONO E UN'ONDA SONORA

Il suono è un fenomeno acustico che si propaga sotto forma di onde sonore in un mezzo elastico, che può essere gassoso, liquido o solido. Le onde sonore sono perturbazioni periodiche della pressione che si propagano da un punto all'altro del mezzo. Il numero delle variazioni cicliche di pressione nell'unità di tempo viene chiamato frequenza del suono, e viene misurato in cicli al secondo, ossia in Hertz (Hz). Il campo uditivo dell'uomo si estende da circa 20 Hz fino a circa 20.000 Hz (20 kHz).

Possiamo dare due definizioni di onda:

1. *Trasversale*: quando gli elementi nel mezzo si spostano perpendicolarmente al moto dell'onda.
2. *Longitudinale*: quando gli elementi nel mezzo materiale si spostano parallelamente.

Inoltre, un'onda può essere periodica, ovvero quando ogni elemento del mezzo materiale ripete lo stesso movimento a intervalli di tempo regolari. La distanza minima dopo la quale un'onda periodica torna a riprodursi identica a se stessa è definita *lunghezza d'onda* ( $\lambda$ ). La differenza tra il valore massimo della grandezza che oscilla e il valore di equilibrio è chiamata *ampiezza* ( $a$ ). (Figura 1)



**Fig. 1.** Profilo dell'onda

Il suono è un'onda longitudinale che si propaga in un mezzo materiale, generando successive compressioni e rarefazioni del mezzo stesso. Il suono non può propagarsi nel vuoto, in quanto necessita di un mezzo materiale per propagarsi.

### ***2.1 Come si propaga un'onda sonora nei fluidi ideali***

La propagazione del suono avviene a causa della vibrazione delle particelle del mezzo attorno alla loro posizione d'origine. Il mezzo deve essere elastico, quindi deve essere in grado di generare una forza interna che tenda a riportare le particelle alla loro posizione di equilibrio. Inoltre, il mezzo deve avere un'inerzia, riuscire a trasferire energia da una particella all'altra.

Le variabili del moto sono la velocità di oscillazione e lo spostamento, entrambe grandezze vettoriali. Il moto delle particelle crea, come citato in precedenza, delle compressioni e rarefazioni del mezzo, che si traducono in variazioni di pressione e densità.

La variazione di pressione rispetto alla pressione di equilibrio prende il nome di "pressione sonora" e si definisce come:

$$p_s = p - p_0 \tag{1.0}$$

dove:

$p_s$  è la pressione sonora (in Pa)

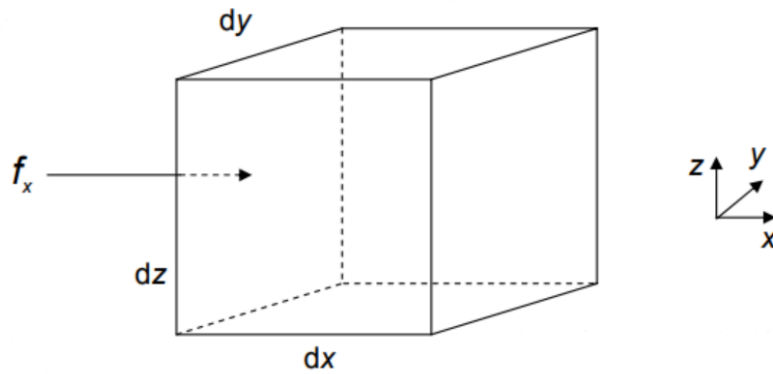
$p$  è la pressione totale (in Pa)

$p_0$  è la pressione relativa al campo senza perturbazioni (in Pa)

Partendo da questo concetto è possibile descrivere l'equazione dell'onda sonora unendo le equazioni di Eulero, l'equazione di continuità e l'equazione di stato del fluido preso in considerazione.

#### ***2.1.2 Equazione di Eulero***

Applicando la seconda legge di Newton ad un corpo di volume elementare  $V_0$  (Figura 2) contenente un fluido ideale non dissipativo di massa  $\rho V_0$ , si è in grado di poter descrivere come si propaga il moto al suo interno.



**Fig. 2.** *Volume elementare*

Sul volume elementare  $V_0$  agiscono forze che corrispondono alle variazioni di pressione acustica. Supponendo che la pressione sonora  $p$  cresca in direzione dell'asse  $x$  con un gradiente pari a  $\partial p/\partial x$ , la forza agente sarà:

$$f_x = -\frac{\partial p}{\partial x} dx(dy dx) = -\frac{\partial p}{\partial x} \cdot V_0 \quad (1.1)$$

Tenendo conto che la massa presente in  $V_0$  è definita  $\rho V_0$  ed applicando il secondo principio della dinamica ( $F=ma$ ):

$$\frac{\partial p}{\partial x} \cdot V_0 = -\rho \frac{du_x}{dt} V_0 \quad (1.2)$$

Considerando che le variazioni di densità nel mezzo  $\rho$  rispetto alla densità  $\rho_0$  si ha:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{du_x}{dt} \quad (1.3)$$

in cui:

$$\frac{du_x}{dt} = \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial t}$$

(1.4)

in genere il secondo termine è trascurabile per cui:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial u_x}{\partial t}$$

(1.5)

Applicando il concetto appena visualizzato alle tre dimensioni è possibile definire le tre componenti di velocità  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial u_x}{\partial t}; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = -\rho_0 \frac{\partial u_y}{\partial t}; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 \frac{\partial u_z}{\partial t}$$

(1.6)

E' quindi ora possibile definire l'equazione di Eulero in termini vettoriali:

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$$

(1.7)

### 2.1.3 Equazione di continuità

Determina il principio secondo il quale il flusso di massa che attraversa un corpo deve essere uguale alla variazione di massa al suo interno. Usando questa legge sul nostro volume elementare  $V_0$ , l'equazione di continuità in tre dimensioni è così descritta:

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} dx dy dz \\ & -\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} dx dy dz \\ & -\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} dx dy dz \end{aligned}$$

(1.8)

Considerando la variazione di massa nel tempo  $dt$  all'interno del volume elementare, la variazione minima di densità tale che  $\rho = \rho_0$ , è possibile riscrivere l'equazione nel seguente modo:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho_0 \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (1.9)$$

in forma vettoriale:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho_0 \operatorname{div}(u) \quad (1.10)$$

### 2.1.4 Equazione di stato

Ogni fluido dal punto di vista termodinamico ha un determinato comportamento. Supponendo che la perturbazione sonora che prendiamo in considerazione non trasmetta calore e di conseguenza non provochi variazioni termodinamiche; ipotizzando il gas a riposo e in presenza della perturbazione si ha:

$$p_0 V_0^\gamma = P V^\gamma \quad (1.11)$$

quindi:

$$P = p_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^\gamma \quad (1.12)$$

dove:

$P$  è la pressione totale (in Pa)

$\gamma$  è il rapporto tra i calori specifici del gas a pressione e temperatura costante

$p_0$  è la pressione relativa al campo senza perturbazioni (in Pa)

In funzione della densità:

$$P = p_0 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (1.13)$$

Definendo una variazione di densità  $\Delta\rho/\rho_0 \ll 1$  :

$$1 + \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^\gamma \quad (1.14)$$

definendo successivamente la grandezza di condensazione  $s$  :

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (1.15)$$

Si può ora riscrivere l'equazione nel seguente modo:

$$p = \gamma\rho_0 s \quad (1.16)$$

### 2.1.5 Equazione d'onda

Le equazioni precedentemente citate combinate tra loro mi permettono di determinare l'equazione dell'onda acustica secondo il seguente procedimento.

Derivando l'equazione (1.15) in funzione del tempo, si ottiene:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.17)$$

Dalla quale utilizzando la formula (1.9) otteniamo:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = -\rho_0 \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (1.18)$$

Derivando in funzione del tempo:

$$-\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial t} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial t} \right) \quad (1.19)$$

Derivando le equazioni di Eulero si ottiene:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} &= -\rho_0 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} \\ \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} &= -\rho_0 \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial t} \\ \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} &= -\rho_0 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial t}\end{aligned}\tag{1.20}$$

Confrontando con (1.18) si ottiene l'equazione dell'onda:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}\tag{1.21}$$

### ***2.1.6 Propagazione delle onde nei fluidi ideali quali gas e liquidi***

Si determina il fluido ideale in base alle seguenti caratteristiche: omogeneo, isotropo, perfettamente elastico.

L'onda si propaga nel mezzo ad una determinata velocità ( $c$ ); partendo da quella relativa alla propagazione nei gas:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}$$

Si può estendere a qualunque fluido (anche liquido) ponendo:

$$c = \sqrt{\frac{K_s}{\rho_0}}\tag{1.23}$$

dove  $K_s$  è il modulo di elasticità adiabatica del fluido ( $1/K_s$  è la compressibilità adiabatica)

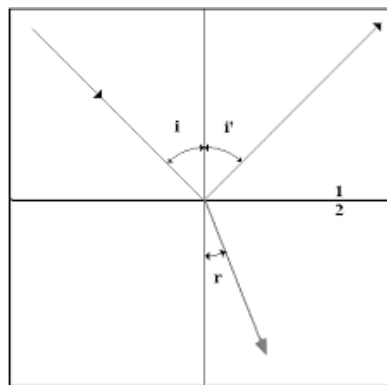


## 2.2 Riflessione, rifrazione e diffrazione del suono

### 2.2.1 Riflessione e rifrazione del suono

La *riflessione* è un fenomeno che si verifica quando un'onda sonora colpisce la superficie di separazione tra due mezzi diversi.

Secondo le leggi della riflessione, il raggio riflesso è nello stesso piano del raggio incidente e della normale alla superficie di riflessione nel punto di incidenza (Figura 3). Inoltre, *l'angolo di riflessione ( $\hat{r}$ ) è uguale all'angolo di incidenza ( $\hat{i}$ )*



**Fig. 3** - Rifrazione del raggio di propagazione di un fenomeno ondulatorio tra due mezzi

Il fenomeno di rifrazione ha luogo invece quando la perturbazione ondulatoria passa da un mezzo a un altro avente proprietà fisiche diverse. Le leggi di Snell affermano che il raggio incidente, quello rifratto e la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi giacciono nello stesso piano. Inoltre, il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione ( $\hat{i}'$ ) è uguale al rapporto tra le velocità di propagazione dei due mezzi.

Secondo la legge di Snell:

$$\frac{c_i}{\sin\theta_i} = \frac{c_a}{\sin\theta_a} \Rightarrow \sin\theta_a = \frac{\gamma_i}{\gamma_a} \sin\theta_i$$

(1.24)

Per cui:

$$\cos\theta_a = \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_a} \sin\theta_i\right)^2}$$

(1.25)

dove:

$\theta_i$   $\theta_a$  sono rispettivamente l'angolo di incidenza e l'angolo di rifrazione

$c_i$   $c_a$  sono le velocità del suono nei mezzi

$\gamma_i$   $\gamma_a$  sono le costanti di propagazione complesse dei mezzi

### 2.2.2 Diffrazione del suono

La riflessione e la trasmissione del suono sono stati trattati finora assumendo che le superfici di separazione tra i mezzi fossero infinitamente estese. Tuttavia, nelle applicazioni pratiche, le lunghezze d'onda del suono sono spesso confrontabili con le dimensioni degli oggetti presenti nell'ambiente in cui si propaga. In questi casi, si verifica un fenomeno chiamato diffrazione.

La diffrazione è un fenomeno complesso che può causare la diffusione del suono attorno agli ostacoli.

Un esempio di diffrazione del suono si può osservare nel caso di un'onda piana (Figura 4) che attraversa un'apertura in un muro. Se la larghezza dell'apertura  $d$  è inferiore alla lunghezza d'onda  $\lambda$  del suono, l'onda sonora si propaga solo al di là dell'apertura, senza diffondersi lateralmente. Al contrario, se la larghezza dell'apertura è uguale o superiore alla lunghezza d'onda, l'onda sonora si propaga anche lateralmente, diffondendosi attorno all'apertura.

Questo fenomeno si verifica perché i bordi dell'apertura, interagendo con l'onda incidente, diventano essi stessi sorgenti elementari di onde sonore.

*Esempio: onda piana che attraversa un'apertura in un divisorio di impedenza acustica infinita*



**Fig.4.** Propagazione dell'onda attraverso l'ostacolo

[1]

### **3. PARAMETRI QUALITATIVI E DETERMINAZIONE: TECNICHE DISTRUTTIVE**

I parametri qualitativi sono quelli che consentono di descrivere le caratteristiche di un materiale o di un oggetto senza dover ricorrere a misure numeriche. Essi possono essere determinati attraverso l'osservazione diretta, l'analisi macroscopica o microscopica, o attraverso l'utilizzo di tecniche distruttive.

Le tecniche distruttive sono quelle che richiedono la rimozione di una parte del campione da analizzare. Esse sono necessarie per determinare alcuni parametri qualitativi che non possono essere misurati in modo non distruttivo, come la composizione chimica, la struttura interna o le proprietà meccaniche.

In questo capitolo verranno presentati i principali parametri qualitativi che possono essere determinati attraverso l'utilizzo di tecniche distruttive. In particolare, verranno discusse le seguenti tematiche:

- Struttura interna
- Maturazione

<sup>1</sup> Riferimento bibliografico: 1, 2, 5, 6, 8, 14, 18, 19

- Consistenza e proprietà meccaniche

### ***Struttura interna***

La struttura interna di un materiale è determinata dalla disposizione dei suoi costituenti a livello atomico o molecolare. La conoscenza della struttura interna di un materiale è importante per comprendere le sue proprietà fisiche e meccaniche.

Una delle tecniche distruttive più comuni per la determinazione della struttura interna degli alimenti è la microscopia. La microscopia consente di osservare la composizione interna dell'alimento a livello microscopico; per fare questo è necessario prelevare dei campioni dal prodotto preso in esame.

I tipi di microscopia più comunemente utilizzati per questo scopo sono la *microscopia ottica*, la *microscopia elettronica a trasmissione* (TEM) e la *microscopia elettronica a scansione* (SEM).

La *microscopia ottica* utilizza raggi di luce per illuminare l'alimento e produrre un'immagine. Questo tipo di microscopia è relativamente semplice e poco costoso, ma consente di ottenere solo immagini a basse risoluzioni.

La *microscopia elettronica a trasmissione* utilizza un fascio di elettroni per illuminare l'alimento. Questo tipo di analisi consente di ottenere immagini a risoluzioni molto elevate, fino a pochi nanometri.

La microscopia elettronica a scansione utilizza invece un fascio di elettroni per scansionare la superficie dell'alimento. Questo tipo di microscopia consente di ottenere immagini tridimensionali della superficie dell'alimento.

La *fluorescenza a raggi X* è una tecnica che utilizza raggi X per provocare l'emissione di luce da parte degli elementi presenti nell'alimento. Questa tecnica può essere utilizzata per determinare la distribuzione degli elementi nel campione.

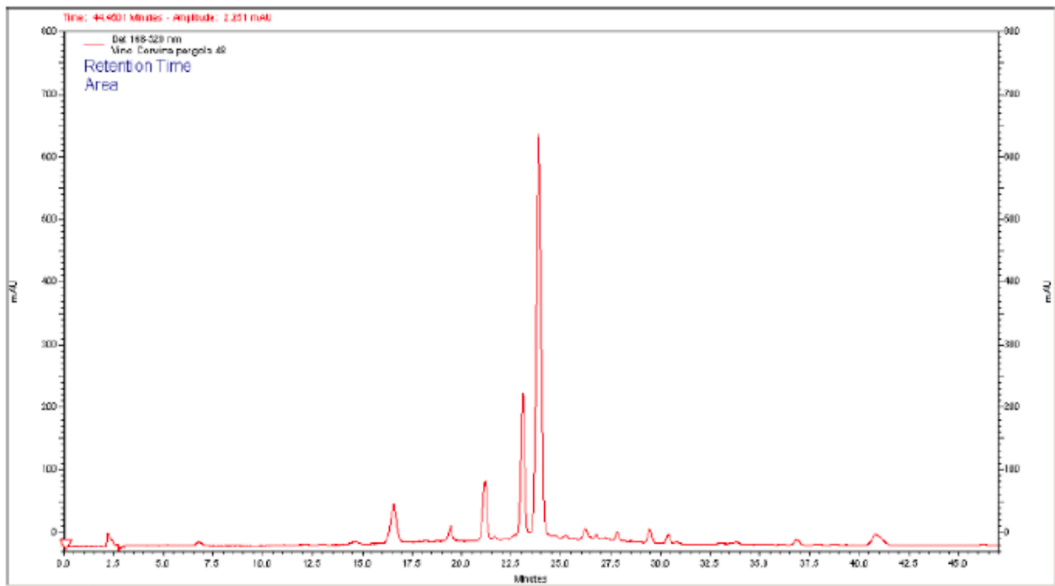
Queste tecniche sono considerate distruttive poiché come citato in precedenza è necessario intervenire sul prodotto per prelevare campioni e inoltre l'utilizzo di questi strumenti come la tecnica di fluorescenza può portare a modifiche di componenti interne successive all'analisi effettuata.

## ***Maturazione***

La maturazione o più specificamente l'indice di maturazione di un prodotto alimentare è un parametro importante per valutare la sua qualità e la sua idoneità al consumo. È determinato misurando la quantità di un composto chimico specifico che si accumula nel prodotto durante la maturazione. I composti chimici più comunemente utilizzati per determinare l'indice di maturazione sono:

- *Zuccheri*: la concentrazione di zuccheri aumenta durante la maturazione di frutta, verdura e cereali.
- *Acidi*: la concentrazione di acidi diminuisce durante la maturazione di frutta e verdura.
- *Aldeidi e chetoni*: la concentrazione di aldeidi e chetoni aumenta durante la maturazione di frutta e verdura.

Strumento molto utile in laboratorio per questo tipo di indagine è lo *spettrofotometro*, il quale è in grado di misurare l'intensità luminosa. Il principio che sta alla base del funzionamento dello spettrofotometro è quello dell'assorbimento di energia luminosa da parte del campione. Quando una soluzione limpida viene colpita con un determinato fascio di luce, una parte di questa luce, a seconda delle caratteristiche del campione, può essere assorbita dal campione stesso; le molecole vengono dapprima separate e poi convogliate verso uno spettrofotometro, il quale misura l'assorbanza della molecola che sta uscendo in quel momento. Di seguito un esempio di spettrofotometria (Figura 5) per la determinazione di antociani nel vino:



**Fig. 5.** Spettrofotometria per la determinazione di antociani nel vino; la misurazione è stata effettuata in corrispondenza di una lunghezza d'onda di 520 nm (il campione è stato colpito da un fascio di luce a 520 nm).

Un'altra tipologia di analisi utilizzata è la cromatografia che permette di determinare la concentrazione di un composto chimico misurando la sua separazione da altri composti in una miscela, basandosi sulla diversa distribuzione di queste molecole tra due fasi non miscibili.

Le due fasi sono:

- *Fase stazionaria*: può essere solida o liquida, e rimane fissa durante la separazione.
- *Fase mobile*: può essere liquida o gassosa, e scorre attraverso la fase stazionaria.

Il principio di separazione si basa sul coefficiente di ripartizione, che è una misura della affinità che una molecola ha per ciascuna delle due fasi.

Ad esempio, gli acidi grassi sono molecole idrofobiche, quindi avranno una maggiore affinità per una fase stazionaria idrofobica rispetto a una fase stazionaria idrofila.

In generale, le molecole con caratteristiche chimiche simili avranno coefficienti di ripartizione simili, mentre le molecole con caratteristiche chimiche diverse avranno coefficienti di ripartizione diversi.

Quindi, maggiore è la differenza tra i coefficienti di ripartizione delle molecole da separare, migliore sarà la separazione cromatografica.

In relazione ai risultati ottenuti sui determinati composti presi in esame è possibile risalire allo stato di maturazione dell'alimento andando però a modificarlo e danneggiarlo rendendo impossibile la sua vendita ed il suo utilizzo.

### ***Consistenza e proprietà meccaniche***

La consistenza di un alimento è una proprietà sensoriale che dipende da una serie di fattori, tra cui la struttura interna, la composizione chimica e le proprietà meccaniche dell'alimento stesso. La determinazione della consistenza di un alimento può essere effettuata attraverso tecniche distruttive, che consentono di misurare le proprietà meccaniche dell'alimento.

Tra le tecniche distruttive più comunemente utilizzate per la determinazione della consistenza degli alimenti si possono menzionare:

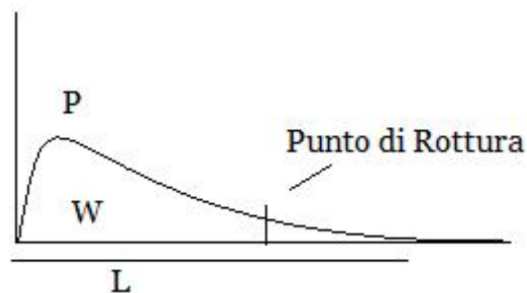
- *Prove di compressione*: questi provini consentono di determinare la resistenza alla compressione dell'alimento.
- *Prove di trazione*: questi provini consentono di determinare la resistenza alla trazione dell'alimento. La resistenza alla trazione è una misura della forza necessaria a strappare l'alimento.
- *Prove di durezza*: consentono di determinare la durezza dell'alimento. La durezza è una misura della resistenza dell'alimento in relazione ad un urto con corpo duro.

La scelta della tecnica distruttiva più appropriata per la determinazione della consistenza di un alimento dipende dalle caratteristiche dell'alimento stesso e dagli obiettivi della misura. Ad esempio, se si desidera determinare la consistenza di un alimento solido, come un frutto o una verdura, le prove di compressione o di trazione possono essere una scelta appropriata. Se invece si desidera determinare la consistenza di un alimento liquido, come una bevanda o una salsa, i test di durezza possono essere una scelta più appropriata.

Le proprietà meccaniche di un materiale, quindi, sono quelle che determinano il suo comportamento sotto l'azione di un carico. Nello specifico, le prove reologiche misurano le proprietà meccaniche dei materiali, come la viscosità, l'elasticità e la resistenza alla rottura.

Queste proprietà vengono misurate applicando una forza al materiale e misurando la sua risposta.

Ad esempio, l'*alveografo di Chopin* permette di valutare la forza e l'estensibilità dell'impasto misurando la pressione d'aria necessaria all'estensione di un campione sottoposto a rigonfiamento per mezzo di un gas. La formazione dell'impasto deve essere eseguita in condizioni standard, rispettando i tempi di impastamento e di riposo dell'impasto in modo tale da poter così confrontare anche campioni di farine differenti. L'impasto viene dunque tagliato per creare delle forme di pasta che vengono portate ad uno spessore ben definito. Un disco di pasta viene dunque posizionato sulla piastra alveografica, dove viene sottoposto alla crescente pressione dell'aria immessa dal basso. Si procede ad insufflare gas al fine di gonfiare l'impasto; la bolla di impasto inizialmente offre molta resistenza, mentre man mano che si assottiglia ne offre sempre meno. Continuando ad insufflare gas, dunque, si arriva allo scoppio della bolla. Dunque, la pressione cade all'improvviso poiché l'aria va in atmosfera e non c'è più una contropressione data dalla bolla stessa. Si ottiene, quindi, un particolare grafico, definito *alveogramma* (Figura 6), sul quale si possono osservare più parametri distinti: *altezza (P)*, *lunghezza (L)* e *area (W)*.



**Fig. 6.** Esempio di alveogramma

Un'altro strumento per determinare proprietà meccaniche può essere il *farinografo di Brabender* che permette di determinare la qualità di una farina misurando la resistenza che l'impasto oppone ad una sollecitazione meccanica costante.

Grazie ad una buretta collocata perpendicolarmente alla cameretta dove è presente la farina, si fa scendere l'acqua che andrà a contribuire alla formazione dell'impasto. Man mano che la



paletta mescola gli ingredienti mentre l'acqua percola all'interno della cameretta; la paletta stessa risconterà una certa resistenza dell'impasto man mano che si forma il reticolo di glutine. Dal momento che il braccio laterale collegato al motore è legato anche ad un dinamometro, viene misurata la "fatica" che compie la paletta per girare e smuovere l'impasto. La formazione del reticolo di glutine richiede energia e tempo affinché i vari componenti del glutine si uniscano ed interagiscano tra loro per dare origine al reticolo. Si ottiene, quindi, un particolare grafico, definito farinogramma (Figura 7), sul quale si possono osservare più parametri distinti: *tempo di sviluppo dell'impasto (A)*, *stabilità (B)*, *grado di rammollimento (C)*, *elasticità (D)*.

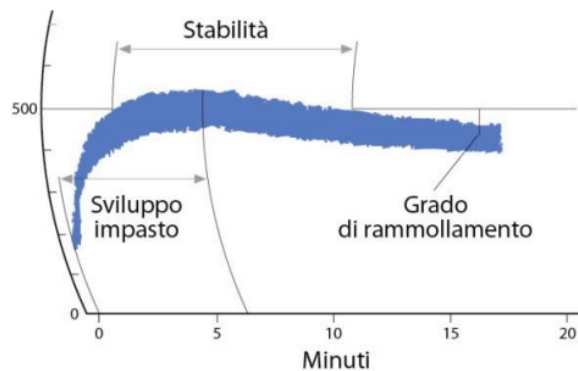


Fig. 7. Esempio di farinogramma

[2]

## **4. APPLICAZIONE DELLE PROPRIETA' ACUSTICHE PER LA DETERMINAZIONE DI PARAMETRI QUALITATIVI**

### **4.1 Determinazione indice di maturazione e consistenza**

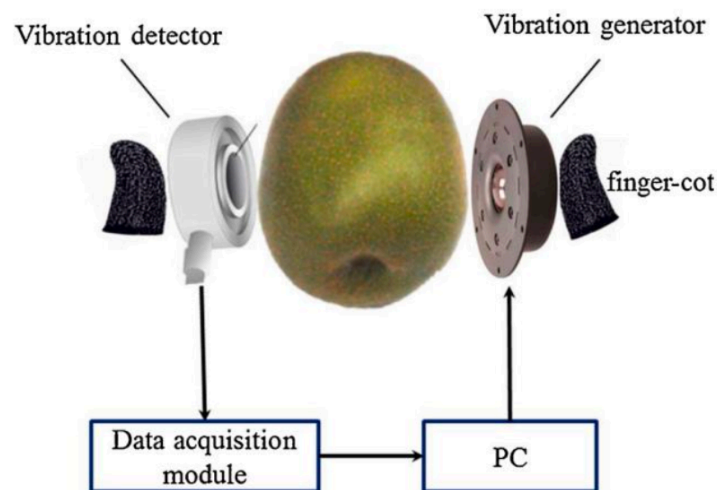
#### **Indice di elasticità dei kiwi**

L'esperimento condotto da Wen Zhang, Bing Shi, Zihan Xu e Lijun Zhang presso la scuola di scienze della vita e ingegneria, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Cina ha coinvolto l'utilizzo di kiwi conservati a diverse temperature al fine di

<sup>2</sup> Riferimento bibliografico: 4, 9

valutarne i cambiamenti di qualità e l'indice di elasticità (EI) mediante un metodo non distruttivo basato sulla vibrazione acustica.

Per la misurazione dell'indice di elasticità, è stato utilizzato un apparato sperimentale (Figura 1) costituito da un sistema di vibrazione acustica non distruttiva, composto da un trasduttore piezoelettrico, un amplificatore di potenza, un generatore di segnale e un oscilloscopio. Il trasduttore piezoelettrico è stato utilizzato per generare una vibrazione acustica sul kiwi, mentre l'amplificatore di potenza ha amplificato il segnale di vibrazione. Il generatore di segnale ha fornito l'input di ingresso al trasduttore piezoelettrico, mentre l'oscilloscopio ha registrato il output di uscita.

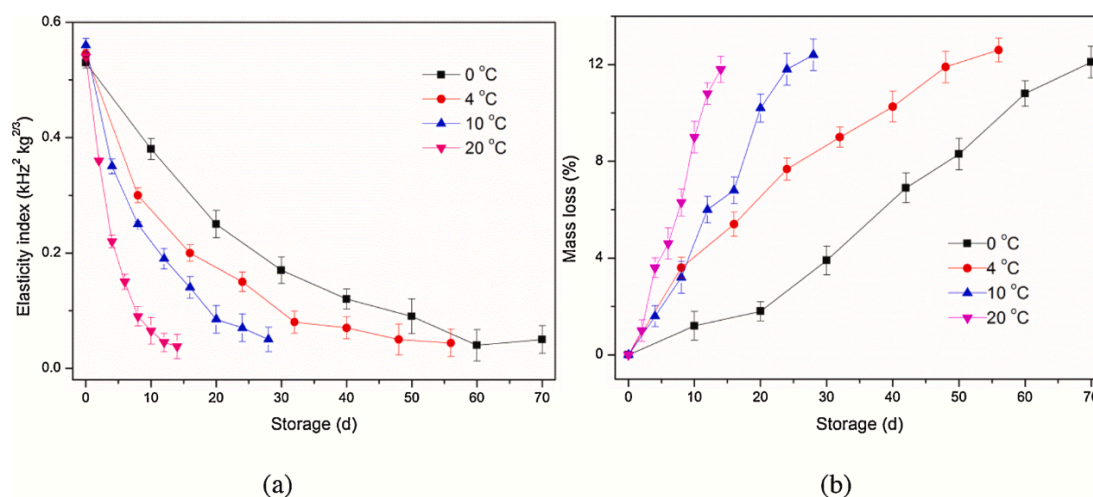


**Fig. 1.** Un diagramma schematico dell'apparato sperimentale per misurare la risposta alle vibrazioni del kiwi. Il segnale di risposta è stato elaborato dall'algoritmo della trasformata veloce di Fourier (FFT) e la frequenza di risonanza è stata estratta dalla curva di risposta ampiezza-frequenza. (De Belie et al., 2000a; Schotte et al., 1999; Zhang et al., 2018).

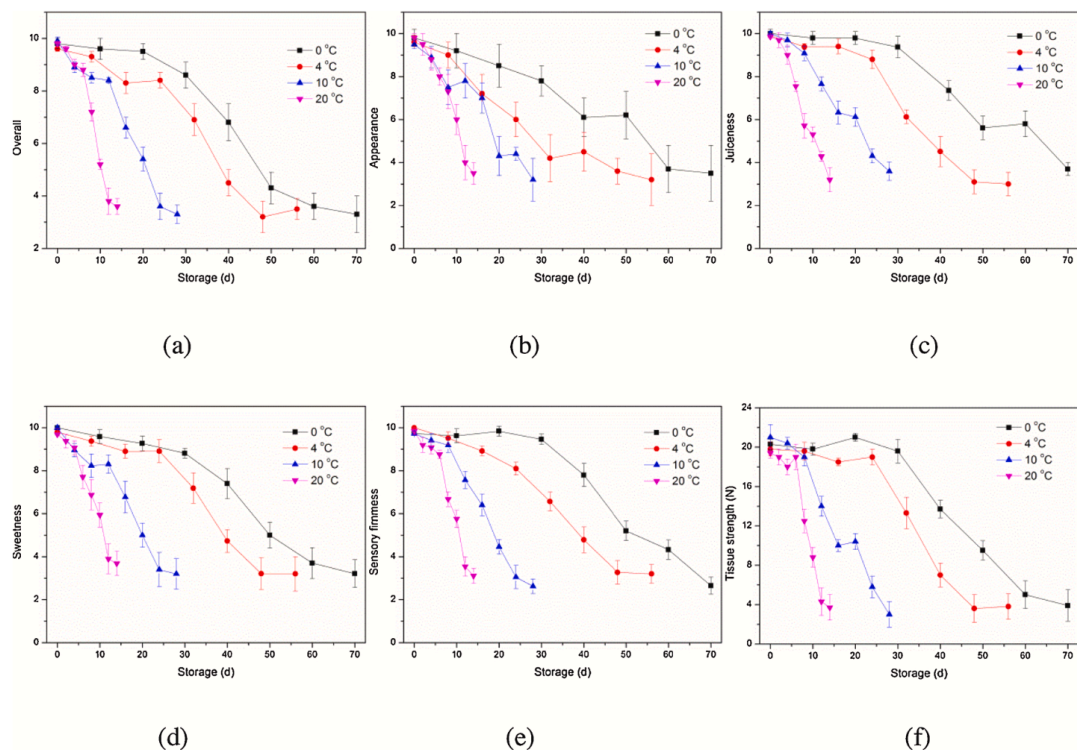
I frutti sono stati conservati a 0, 4, 10 e 20 °C e sottoposti a misurazioni giornaliere dell'indice di elasticità tramite il metodo della vibrazione acustica non distruttiva. Inoltre, sono stati effettuati test di puntura, valutazioni sensoriali e misurazioni strumentali per valutare la succosità, l'aspetto, la dolcezza, la consistenza sensoriale e la forza dei tessuti dei kiwi.

Per la valutazione della succosità, è stato utilizzato un penetrometro per misurare la forza necessaria per penetrare il frutto. Per stimare l'aspetto, sono state effettuate misurazioni della colorazione e della presenza di difetti superficiali. Per la determinazione della dolcezza, è stato utilizzato un rifrattometro per misurare il contenuto di zuccheri solubili. Per la valutazione della consistenza sensoriale, sono state effettuate misurazioni della durezza, della gommosità e della masticabilità. Infine, per determinare la forza dei tessuti, è stato utilizzato un texturometro per misurare la forza necessaria per rompere il frutto.

Sono stati utilizzati diversi modelli cinetici per adattare i cambiamenti nell'indice di elasticità (EI). Questo approccio è stato fondamentale per comprendere e prevedere le modifiche qualitative dei frutti nel tempo e in risposta alle variazioni di temperatura. In particolare, è stato utilizzato il modello cinetico del primo ordine, che ha mostrato le migliori performance nella descrizione dei cambiamenti nell'indice di elasticità (Figura 2). Questo modello è stato valutato attraverso l'analisi dei coefficienti di determinazione ( $R^2$ ) e degli errori quadratici medi (RMSE), che hanno evidenziato la capacità del modello di adattarsi in modo accurato ai dati sperimentali. L'alta precisione del modello di primo ordine suggerisce che i cambiamenti nell'indice di elasticità dei kiwi durante la conservazione possano essere descritti in modo efficace da un processo di cinetica del primo ordine (Figura 3).



**Fig. 2.** Cambiamenti nel corso del tempo dell'indice di elasticità (EI) (a) e della perdita di massa (b) dei kiwi conservati a temperature diverse. L'esperimento è stato condotto ogni 10, 8, 4 e 2 giorni rispettivamente a 0, 4, 10 e 20 ° C. Le barre rappresentano l'errore standard (Hertog et al., 2004 )



**Fig. 3.** Cambiamenti nel tempo nell'accettabilità complessiva (a), nell'aspetto (b), nella succosità (c), nella dolcezza (d) e nella consistenza sensoriale (e) ottenuti dalla valutazione sensoriale e nella forza dei tessuti (f) ottenuta mediante il metodo strumentale prova di foratura. L'esperimento è stato condotto ogni 10, 8, 4 e 2 giorni rispettivamente a 0, 4, 10 e 20 ° C. Le barre rappresentano l'errore standard. (Chauvin et al. , 2010; Li, 2011 )

Inoltre, la dipendenza dalla temperatura della velocità di reazione dell'indice di elasticità è stata modellata utilizzando il modello di Arrhenius (Figura 4). Questo modello ha dimostrato buone prestazioni nella modellazione della velocità di reazione in funzione della temperatura, con valori elevati di  $R^2$  che indicano una forte correlazione tra la temperatura e la variazione dell'indice di elasticità nel tempo.

L'analisi statistica condotta ha permesso di validare l'accuratezza degli schemi utilizzati nel descrivere i cambiamenti nell'indice di elasticità dei kiwi. In particolare, l'analisi dei residui e dei parametri dei modelli ha fornito importanti indicazioni sulla bontà di adattamento dei diagrammi ai dati sperimentali, consentendo di valutare la precisione delle previsioni e di identificare eventuali discrepanze tra i valori previsti e quelli sperimentali (Figura 5).

**Table 1**  
Correlations between the elasticity index (*EI*) and quality indices.

|           | Overall acceptability | Appearance | Juiciness | Sweetness | Sensory firmness | Tissue strength |
|-----------|-----------------------|------------|-----------|-----------|------------------|-----------------|
| <i>EI</i> | 0.816**               | 0.797**    | 0.823**   | 0.813**   | 0.864**          | 0.800**         |

\*\* Represents that the correlation is significant at the 0.01 level.

**Table 2**  
The results of zero-, first- and second-order kinetic models for describing *EI* at different storage temperatures.

| Index     | Temperature (°C) | Zero-order |                |  | First-order |                |  | Second-order |                |  |
|-----------|------------------|------------|----------------|--|-------------|----------------|--|--------------|----------------|--|
|           |                  | $k_0$      | R <sup>2</sup> | RMSE (kHz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) | $k_1$       | R <sup>2</sup> | RMSE (kHz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) | $k_2$        | R <sup>2</sup> | RMSE (kHz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) |
| <i>EI</i> | 0                | 0.665      | 0.881          | 0.056                                      | 0.037       | 0.997          | 0.009                                      | 0.001        | 0.945          | 0.038                                      |
|           | 4                | 0.776      | 0.785          | 0.075                                      | 0.057       | 0.986          | 0.019                                      | 0.002        | 0.981          | 0.022                                      |
|           | 10               | 1.641      | 0.863          | 0.060                                      | 0.091       | 0.993          | 0.014                                      | 0.003        | 0.974          | 0.026                                      |
|           | 20               | 3.199      | 0.839          | 0.064                                      | 0.194       | 0.993          | 0.013                                      | 0.007        | 0.969          | 0.029                                      |

$k_0$ ,  $k_1$  and  $k_2$  are the reaction rates obtained by the zero-, first- and second- kinetic models, respectively.

R<sup>2</sup>: coefficient of determination.

RMSE: root mean square error.

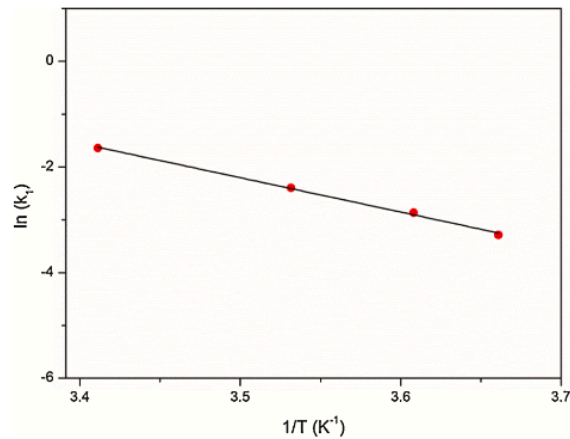
**Table 3**  
Kinetic parameters of elasticity index (*EI*) of kiwifruit obtained by the Arrhenius model.  $k_1$  is the reaction rate obtained by the first-order kinetic models.

| Order of reaction rate | Arrhenius model               |                              |                |                        |
|------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------|------------------------|
|                        | $E_a$ (kJ mol <sup>-1</sup> ) | $k_{ref}$ (d <sup>-1</sup> ) | R <sup>2</sup> | RMSE                   |
| $k_1$                  | 52.666                        | $4.697 \times 10^8$          | 0.999          | $1.521 \times 10^{-3}$ |

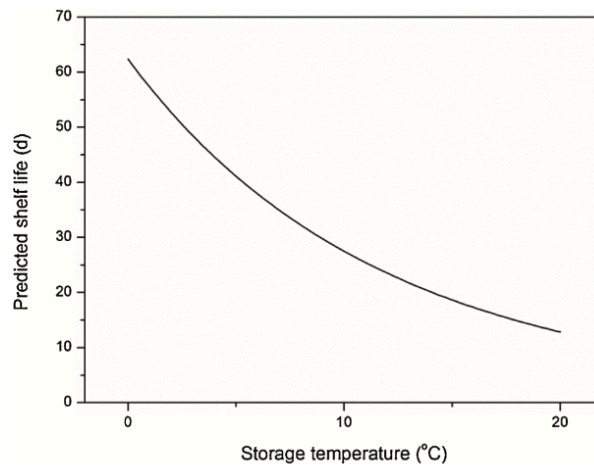
$E_a$ : the apparent activation energy.

$k_{ref}$ : the reaction rate at the reference temperature.

(Abbott e Massie (1998); Fumuro et al. (2013); Taniwaki et al. (2009c, 2010) e Zhang et al. (2015b) )



**Fig. 4.** Modellazione della dipendenza dalla temperatura della velocità di reazione ( $k_1$ ) dell'indice di elasticità (*EI*) mediante l'equazione di Arrhenius. ((De Belie et al., 2000a; Schotte et al., 1999; Zhang et al., 2018).



**Fig. 5.** Grafico della durata di conservazione prevista-temperatura di conservazione (tsl-T) del kiwi basato su una soglia di indice di elasticità del protocollo di  $0,05 \text{ kHz}^2 \text{ kg}^{2/3}$ . (De Belie et al., 2000a; Schotte et al., 1999; Zhang et al., 2018).

Complessivamente, l'approccio di modellazione e analisi statistica adottato ha consentito di ottenere una comprensione dettagliata dei cambiamenti nell'indice di elasticità dei kiwi durante la conservazione, fornendo schemi matematici accurati e affidabili per la previsione dei cambiamenti di qualità e della durata di conservazione dei frutti in risposta alle variazioni di temperatura.

[3]

### ***Valutazione della qualità post raccolta dei cachi “Fuyu” e “Taishuu”***

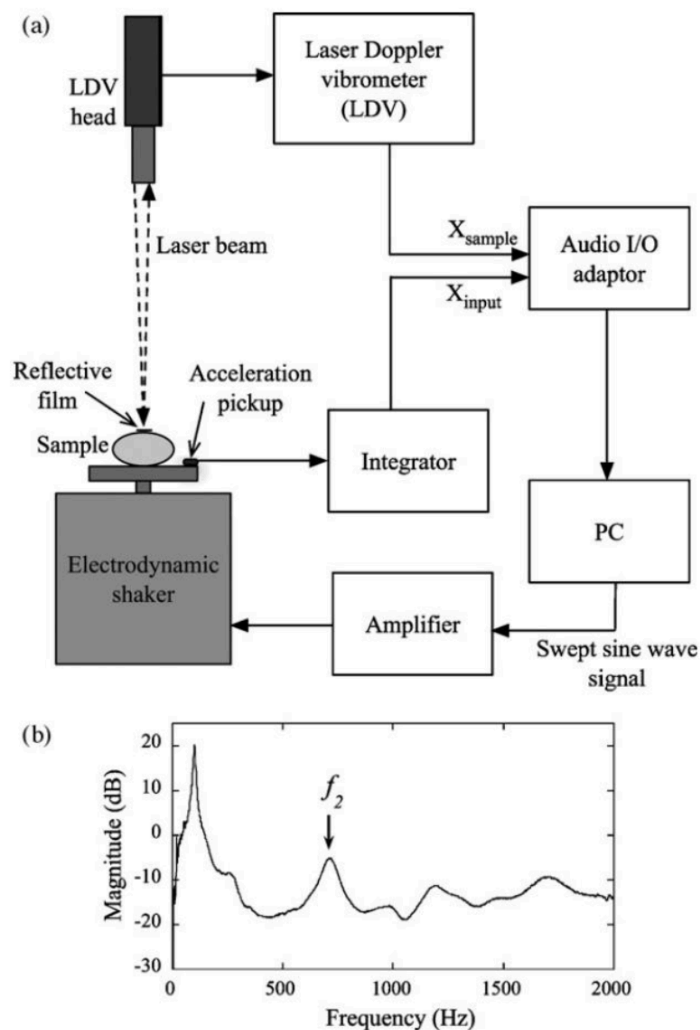
Presso il centro di ricerca collaborativa dell'università di Hiroshima, Higashi-Hiroshima si è condotto l'esperimento per valutare la qualità post-raccolta dei cachi "Fuyu" e "Taishu" che ha coinvolto l'utilizzo di tecniche vibrazionali non distruttive e di vibrazione acustica, insieme a test sensoriali, al fine di analizzare in modo dettagliato le caratteristiche fisiche e sensoriali dei frutti durante il periodo di conservazione.

Per quanto riguarda i materiali e i metodi impiegati, i cachi "Fuyu" e "Taishu" sono stati sottoposti a valutazioni utilizzando un dispositivo di misurazione della texture (Figura 6) basato su vibrazioni, un vibrometro laser Doppler (LDV) e un sistema di registrazione

---

<sup>3</sup> Riferimento bibliografico: 21

acustica. Il dispositivo di misurazione della texture è stato utilizzato per valutare l'elasticità e la consistenza dei campioni di cachi. Questo strumento ha consentito di rilevare le vibrazioni generate dai frutti e di calcolare l'indice di elasticità (EI) e l'indice del test sensoriale. Il vibrometro laser Doppler è stato impiegato per determinare la consistenza dei cachi attraverso la risonanza meccanica, mentre la registrazione acustica è stata utilizzata per valutare la suscettibilità ai danni meccanici.



**Fig. 6.** (a) L'apparato sperimentale per la misurazione non distruttiva dell'indice di elasticità dei campioni di cachi. Un campione è stato eccitato meccanicamente da un

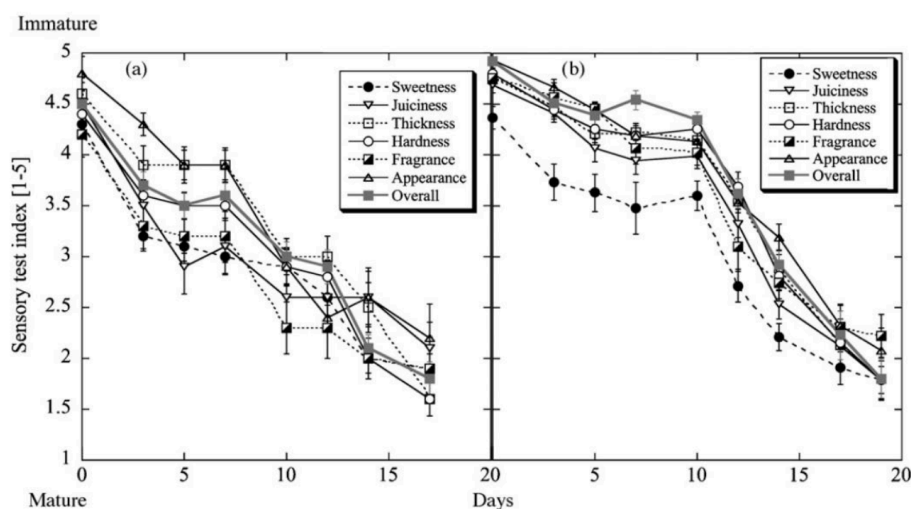
agitatore azionato da segnali di onde sinusoidali spazzate. La risposta è opposta,

il lato dell'eccitazione è stato rilevato da un vibrometro laser Doppler (LDV). (b) Un tipico spettro di risposta di un campione "Fuyu";  $f_2$ : il secondo picco di risonanza utilizzato per determinare l'indice di elasticità.

(Taniwaki, M., et al., Valutazione della qualità post-raccolta dei cachi "Fuyu" e "Taishuu". 2008)

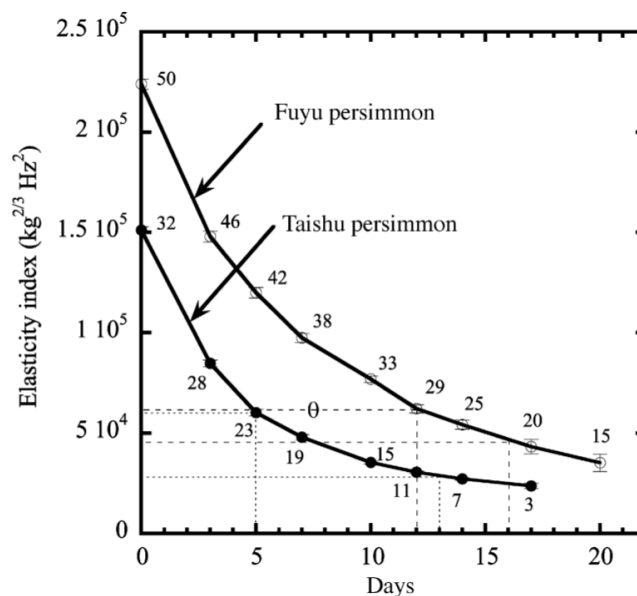
Nel dettaglio, il dispositivo di misurazione della texture è stato utilizzato per applicare una pressione meccanica ai campioni di cachi, generando vibrazioni che sono state registrate e analizzate per valutare l'elasticità e la consistenza dei frutti. Il vibrometro laser Doppler ha consentito di misurare le vibrazioni generate dai cachi e di determinare la loro consistenza attraverso la risonanza meccanica. La registrazione acustica ha fornito informazioni sulla suscettibilità dei frutti ai danni meccanici, contribuendo così a valutare la qualità post-raccolta dei cachi.

I risultati ottenuti sono stati analizzati e interpretati in modo dettagliato. In particolare, è stato osservato che entrambi gli indici di elasticità sono diminuiti gradualmente nel corso del tempo, evidenziando un cambiamento nella consistenza dei cachi durante il periodo di conservazione (Figura 7). Inoltre, l'analisi acustica ha fornito informazioni preziose sulla suscettibilità dei frutti ai danni meccanici, contribuendo così a valutare la qualità post-raccolta dei cachi.



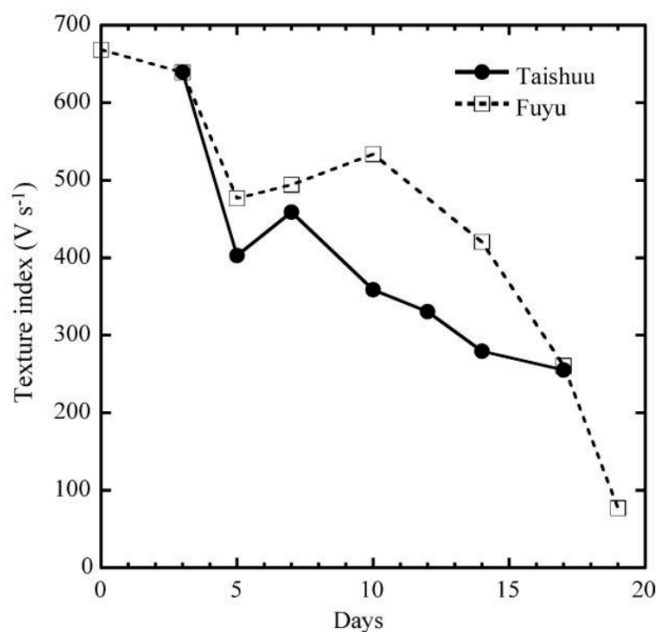
**Fig. 7.** La variazione dei vari attributi dell'indice del test sensoriale dei cachi “Taishuu” (a) e “Fuyu” (b). Le barre rappresentano l' S.E. (n = 20 il giorno 10; n = 16 il giorno 12; n = 18 il giorno 17; e n = 24 in tutti gli altri giorni). (Taniwaki, M., et al., Valutazione della qualità post-raccolta dei cachi “Fuyu” e “Taishuu”. 2008)





**Fig. 8.** L'andamento temporale dei cambiamenti nell'indice di elasticità (EI) di "Taishuu" e "Fuyu" cachi determinati con il metodo descritto in Fig. 2. Le barre rappresentano il S.E. I numeri rappresentano il numero di campioni utilizzati per ciascuna misurazione. Le linee tratteggiate servono per determinare la maturazione ottimale per il consumo. (Taniwaki, M., et al., Valutazione della qualità post-raccolta dei cachi "Fuyu" e "Taishuu". 2008)

È stata evidenziata l'importanza dell'indice di elasticità (Figura 8) come predittore del grado di maturazione dei cachi, sottolineando la sua utilità nel valutare la qualità dei frutti in modo non distruttivo. Inoltre, è stata esaminata la correlazione tra l'indice di elasticità e l'indice del test sensoriale per valutare la consistenza e la suscettibilità ai danni meccanici dei cachi. E' stato successivamente approfondito anche l'impiego delle diverse tecniche di valutazione, evidenziando i vantaggi e le limitazioni di ciascuna. Ad esempio, è stato sottolineato come l'utilizzo del dispositivo di misurazione della texture abbia consentito di valutare in modo accurato l'elasticità e la consistenza dei cachi, mentre il vibrometro laser Doppler ha fornito informazioni cruciali sulla risonanza meccanica dei frutti. Inoltre, la registrazione acustica è stata riconosciuta come un metodo efficace per valutare la suscettibilità dei cachi ai danni meccanici.



**Fig. 8.1.** La variazione dell'indice di tessitura (TI) nella banda di frequenza 0–50 Hz. (Taniwaki, M., et al., Valutazione della qualità post-raccolta dei cachi “Fuyu” e “Taishuu”. 2008)

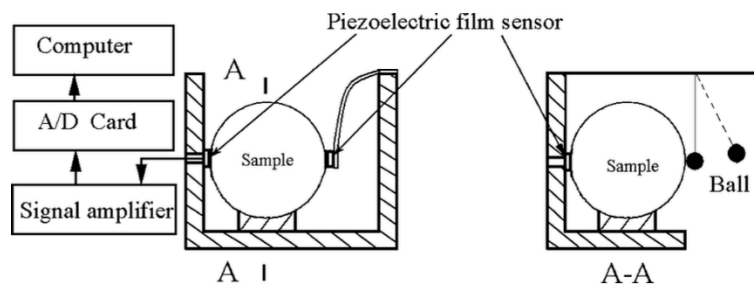
Infine, si è evidenziata l'importanza dei risultati ottenuti per i produttori e i distributori di frutta, sottolineando come l'impiego di tecniche non distruttive possa fornire informazioni preziose sulla qualità dei cachi durante il processo di conservazione e distribuzione. [4]

#### ***Determinazione qualità pomodoro durante la conservazione***

L'esperimento condotto da QiuJun Lu, Jun Wang, Antihus Hernández Gómez e Annia García Pereira presso l'Università di Zhejiang ha lo scopo di valutare la qualità dei pomodori "Heatwave" durante la conservazione utilizzando la risposta impulsiva acustica.

Per svolgere l'esperimento, i ricercatori hanno utilizzato un trasduttore a film piezoelettrico come sensore per rilevare il segnale di risonanza. Inoltre, è stato impiegato un dispositivo di eccitazione a impulsi meccanici, costituito da un pendolo orizzontale con una palla di plastica e un sottile filo di nylon. Sono stati impiegati anche un amplificatore di segnale, un personal computer e un software per controllare l'esperimento e analizzare i risultati (Figura 9).

<sup>4</sup> Riferimento bibliografico: 16

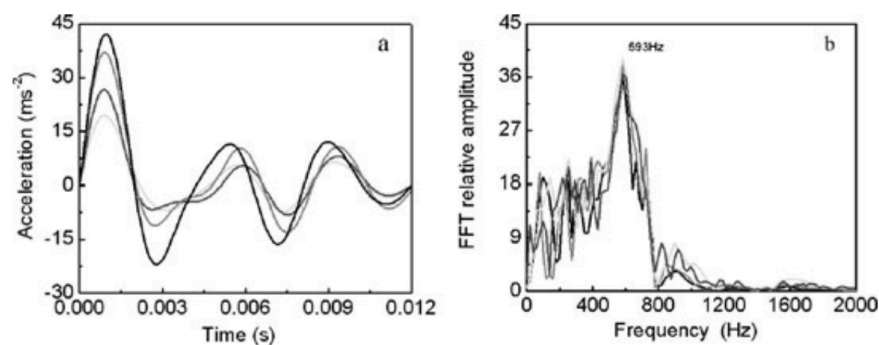


**Fig 9.** Diagramma del sistema sperimentale (Journal of Food Processing and Preservation **33** (2009) 356–370.)

I pomodori "Heatwave" sono stati raccolti manualmente da un frutteto sperimentale e suddivisi in base al colore e al peso. Successivamente, i pomodori sono stati sottoposti a diversi test, tra cui la valutazione sensoriale del colore, la misurazione della massa e della densità, nonché l'esperimento di risposta impulsiva acustica.

L'esperimento di risposta impulsiva acustica è stato eseguito mediante l'utilizzo di un trasduttore a film piezoelettrico per rilevare la frequenza di risonanza o l'indice di fermezza dei pomodori durante la conservazione.

In particolare, il trasduttore è stato posizionato sulla superficie del pomodoro e il dispositivo di eccitazione a impulsi meccanici è stato utilizzato per generare un impulso meccanico sulla superficie del pomodoro. Il segnale di risonanza è stato quindi rilevato dal trasduttore e amplificato dall'amplificatore di segnale. Inoltre, è stata eseguita un'analisi della perdita di acqua e della densità del campione, considerando l'influenza della perdita di acqua sui risultati della tecnica di risposta impulsiva acustica (Figura 10). La perdita di acqua è stata valutata misurando la massa dei pomodori prima e dopo la conservazione.

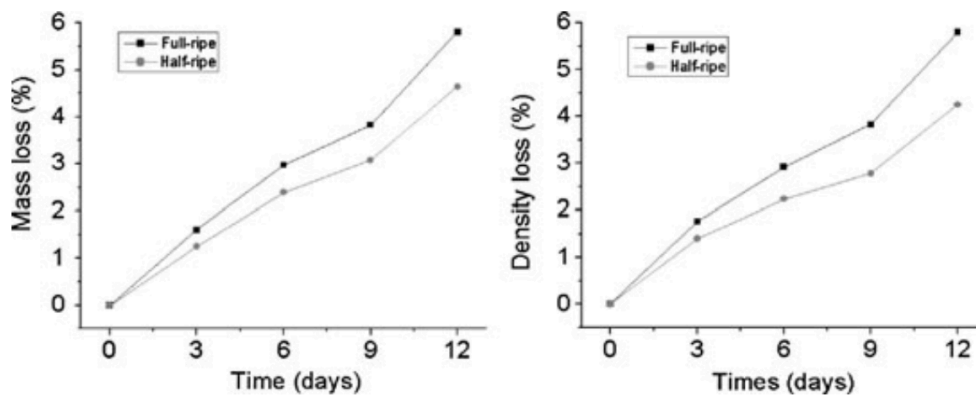


**Fig. 10.** La risposta tipica di un pomodoro a quattro impulsi intorno all'equatore

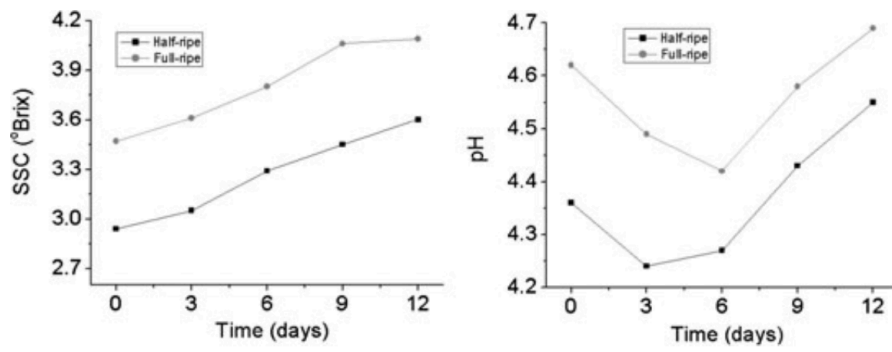
(a) Dominio del tempo. (b) Risposta in frequenza. (Journal of Food Processing and Preservation **33** (2009) 356–370.)

I risultati (Figura 11, 12, 13, 14, 15) hanno mostrato che i parametri della risposta impulsiva acustica, come la frequenza di risonanza, l'indice di fermezza e il coefficiente di elasticità, diminuiscono con il tempo di conservazione dei pomodori. Ciò indica una correlazione tra la qualità dei pomodori e i cambiamenti nella loro fermezza durante la conservazione.

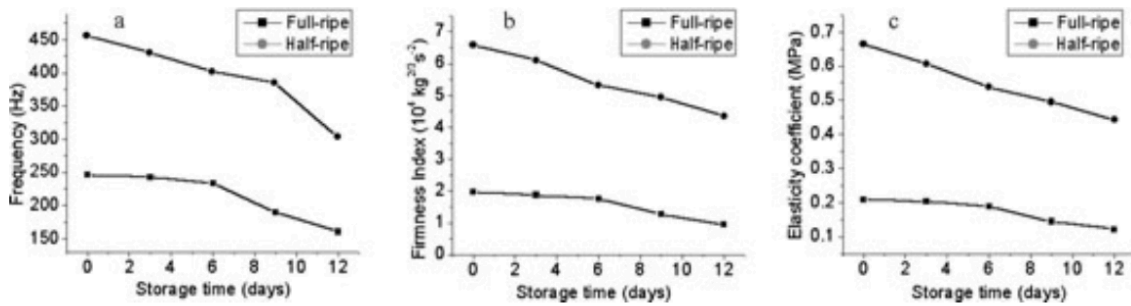
Inoltre, è stato osservato che i parametri della risposta impulsiva acustica non hanno correlazione con il contenuto di solidi solubili o il pH dei pomodori, ma hanno una forte correlazione con la forza di compressione e la forza di perforazione. In particolare, il coefficiente di elasticità ha mostrato una migliore correlazione con la forza di compressione e la forza di perforazione rispetto alla frequenza di risonanza e all'indice di fermezza. Questi risultati suggeriscono che il coefficiente di elasticità potrebbe essere un indice migliore della fermezza dei pomodori "Heatwave" rispetto alla frequenza di risonanza e all'indice di fermezza. Inoltre, la tecnica di risposta impulsiva acustica si è dimostrata promettente per la valutazione non distruttiva della fermezza dei pomodori durante la conservazione.



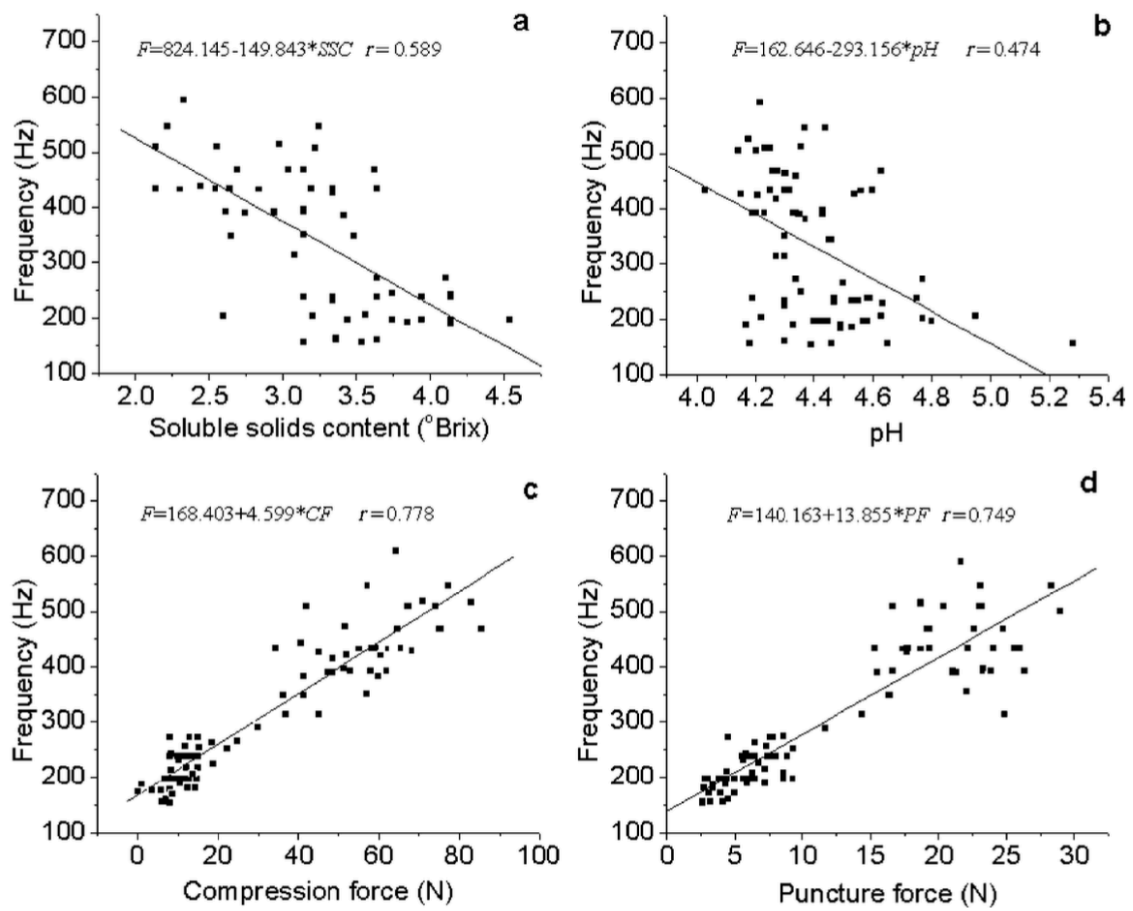
**Fig 11.** Cambio di massa e densità durante la conservazione



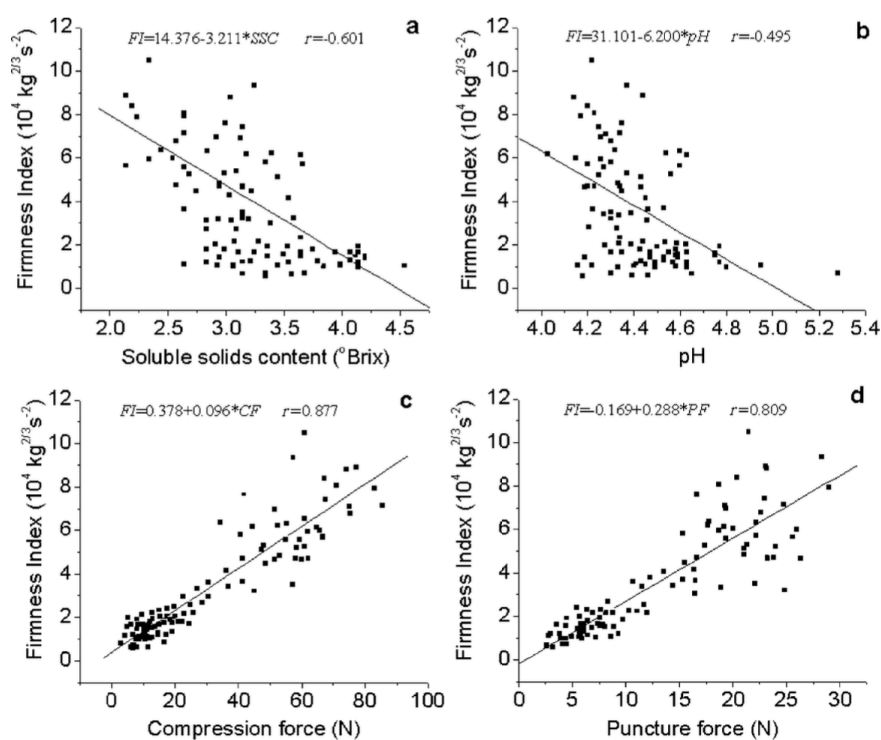
**Fig 12.** Cambiamento dei solidi solubili (SSC) e del pH durante la conservazione (Journal of Food Processing and Preservation **33** (2009) 356–370.)



**Fig 13.** Variazione della frequenza dominante dell'indice di resistenza e del coefficiente di elasticità durante la conservazione. (Journal of Food Processing and Preservation **33** (2009) 356–370.)



**Fig 14.** Rapporto tra frequenza dominante ed indice di qualità. (Journal of Food Processing and Preservation 33 (2009) 356–370.)



**Fig 15.** Rapporto tra indice di resistenza e indice di qualità. (Journal of Food Processing and Preservation **33** (2009) 356–370.)

Infine, i ricercatori hanno sottolineato che la tecnica di risposta impulsiva acustica potrebbe essere utilizzata per monitorare la qualità dei pomodori durante la conservazione in modo continuo e in tempo reale, offrendo nuove prospettive per il monitoraggio dinamico dei prodotti agricoli e la valutazione non distruttiva della loro fermezza. [5]

## 4.2 Determinazione parametro qualitativo: croccantezza

### Valutazione della Texture delle Patatine Fritte

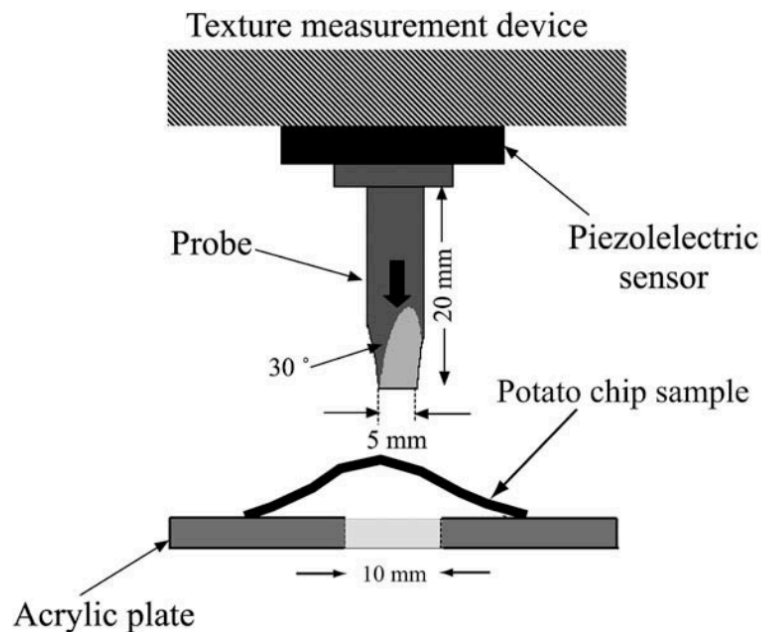
L'esperimento è stato svolto da Mitsuru Taniwaki, Naoki Sakurai e Hiroyuki Kato al Collaborative Research Center presso l'Università di Hiroshima.

Il test si è concentrato sulla valutazione della texture delle patatine fritte utilizzando una tecnica innovativa di analisi delle vibrazioni acustiche.

<sup>5</sup> Riferimento bibliografico: 11

Quattro tipi di campioni di patatine (A) - (D) sono stati forniti da Calbee Foods Co. Ltd. e presentavano diverse spessori e gradi di croccantezza. Il grado relativo di croccantezza è stato determinato dagli autori attraverso una valutazione sensoriale.

Il dispositivo utilizzato per la misurazione della texture è stato precedentemente descritto da Taniwaki et al. (2006b) e simula i processi percettivi umani di masticazione, rilevamento dei segnali dalla masticazione e analisi della texture. Il dispositivo impiega una sonda corrispondente al dente umano, con una larghezza di 5 mm, lunghezza di 20 mm e angolo di punta a scalpello di 30°. La velocità della sonda è stata fissata a 22 mm/s, stimata entro il range della velocità tipica di masticazione umana. Il sistema di misurazione della texture (Figura 16) è stato applicato per la prima volta a un alimento processato, proponendo una tecnica analitica innovativa per valutare la texture delle patatine fritte. La tecnica ha determinato l'Indice di Texture (TI) utilizzando tre parti selezionate dei segnali di vibrazione acustica: la parte anteriore tra il contatto della sonda con il campione, la parte principale di frattura e l'intero segnale di texture.

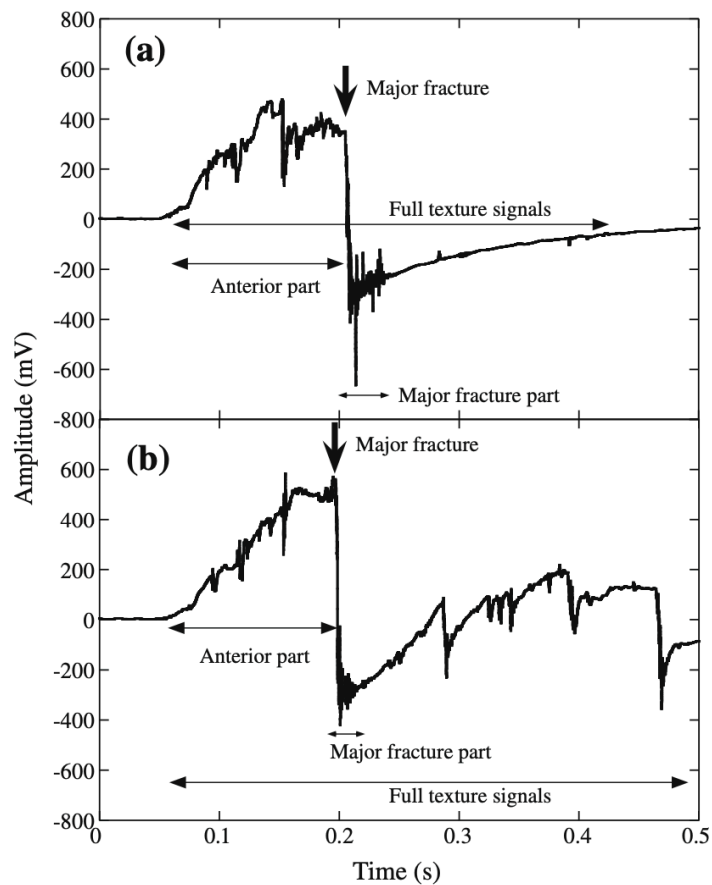


**Fig 16.** Diagramma schematico dell'apparato sperimentale per misurare la consistenza dei campioni di patatine. La sonda è stata realizzata per fratturare completamente una patatina fritta per ottenere segnali di consistenza.

(M. Taniwaki et al. / Food Research International 43 (2010) 814–818 )

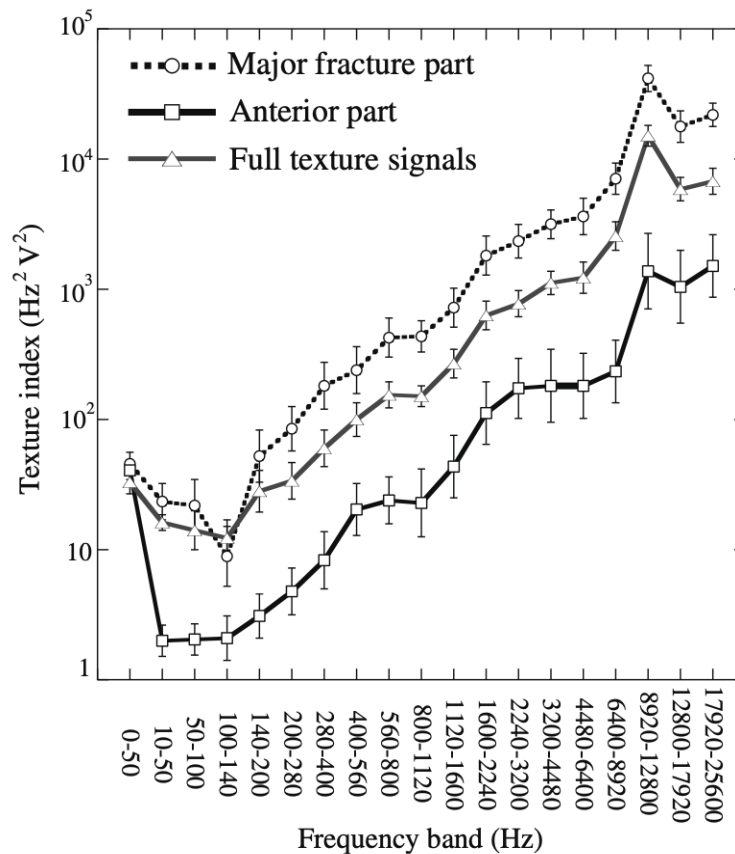


Dopo aver ottenuto i segnali di vibrazione acustica dalle patatine fritte utilizzando la sonda, i segnali sono stati filtrati in 19 bande di frequenza utilizzando un filtro multi-banda. Successivamente, il TI è stato calcolato per ogni banda di frequenza utilizzando i dati di tre parti selezionate dei segnali nel dominio del tempo: la parte anteriore dalla sonda al punto di contatto con la patatina fino alla principale frattura, la parte principale di frattura e l'intero segnale di texture. Le analisi hanno dimostrato che i segnali di texture intorno alla principale frattura di una patatina dovrebbero fornire maggiori dettagli su come effettivamente avviene la frattura di quest'ultima (Figura 17). Inoltre, è stato evidenziato che i segnali dopo la principale frattura sono attribuiti al contatto tra i pezzi frantumati del campione e la sonda (Figura 18).



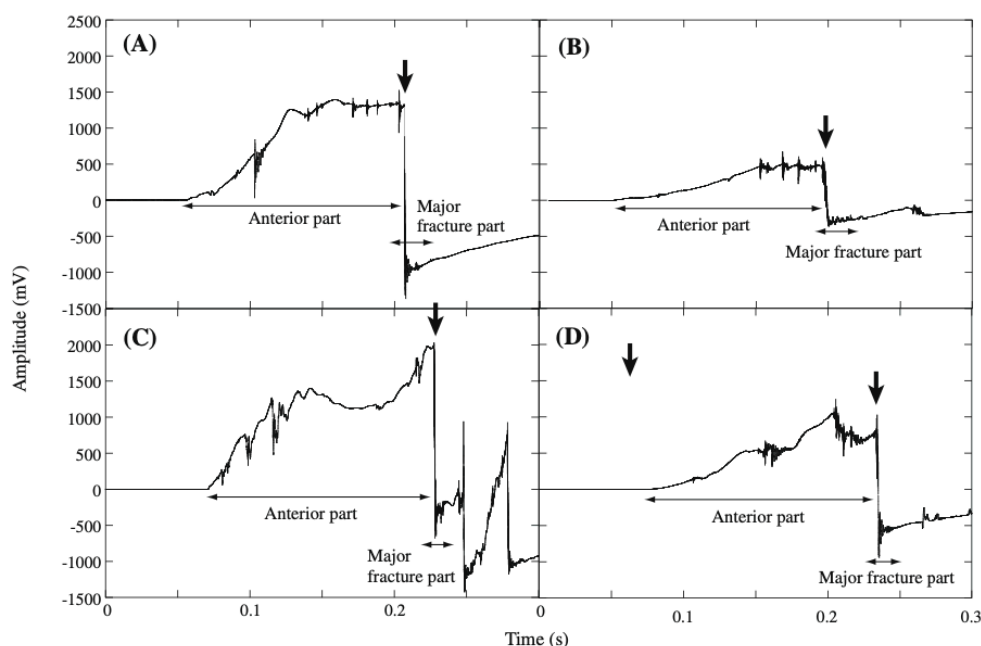
**Fig 17.** Esempi di segnali di struttura di campioni di patatine ottenuti utilizzando il dispositivo di misurazione della struttura. Due esempi (a) e (b) differiscono nello schema dei segnali dopo la frattura maggiore. I segnali sono stati divisi in tre parti per studiare la dipendenza dell'indice di texture (TI) dalle parti dei segnali utilizzati.

Le frecce verso il basso indicano il punto della frattura maggiore. (M. Taniwaki et al. / Food Research International 43 (2010) 814–818 )



**Fig 18.** Indici di tessitura di campioni di patatine (C) utilizzando le tre parti dei segnali di tessitura. La banda di frequenza 0–50 Hz contiene la componente CC (0 Hz) mentre la banda 10–50 Hz no. Le barre indicano SE (n = 10) (M. Taniwaki et al. / Food Research International 43 (2010) 814–818 )

I risultati hanno mostrato che il TI calcolato utilizzando la parte principale di frattura ha fornito la distinzione più significativa tra le caratteristiche di texture delle diverse tipologie di patatine fritte, le quali presentavano diversi gradi di croccantezza e spessore. In particolare, è emerso che il TI sopra i 1600 Hz è stato identificato come un indicatore importante della croccantezza delle patatine fritte (Figura 19). Per valutare la significatività statistica dei risultati, sono stati calcolati gli errori standard (SE) per ogni TI calcolato. Inoltre, è stata utilizzata un'analisi della varianza (ANOVA) per valutare la significatività delle differenze tra i campioni di patatine fritte.



**Fig 19.** Segnali di consistenza tipici dei quattro diversi campioni di patatine (A) – (D) ottenuti utilizzando il dispositivo di misurazione della consistenza. Le frecce verso il basso indicano il punto della frattura maggiore.  
(M. Taniwaki et al. / Food Research International 43 (2010) 814–818 )

L'esperimento ha dimostrato l'efficacia di una tecnica innovativa di analisi delle vibrazioni acustiche per valutare la texture delle patatine fritte. La tecnica ha permesso di determinare l'Indice di Texture (TI) utilizzando tre parti selezionate dei segnali di vibrazione acustica e dimostrato che il TI calcolato utilizzando la parte principale di frattura distinguerebbe in modo più chiaro le caratteristiche di texture delle patatine fritte con diversi gradi di croccantezza e spessore. [6]

### ***Misure strumentali acustico-meccaniche della croccantezza delle mele***

L'esperimento è stato svolto presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Alimentari dell'Università degli Studi di Milano, in Italia dai ricercatori L. Piazza e V. Giovanzana che lo hanno pubblicato sulla rivista Food Research International.

Il test condotto per valutare la croccantezza delle mele è stato strutturato in modo da integrare misure strumentali acustico-meccaniche al fine di ottenere una valutazione completa delle proprietà fisiche e sensoriali delle diverse cultivar di mele coinvolte nello

<sup>6</sup> Riferimento bibliografico: 15

studio. Il materiale e i metodi utilizzati sono stati attentamente selezionati per consentire una valutazione accurata e dettagliata della croccantezza delle mele.

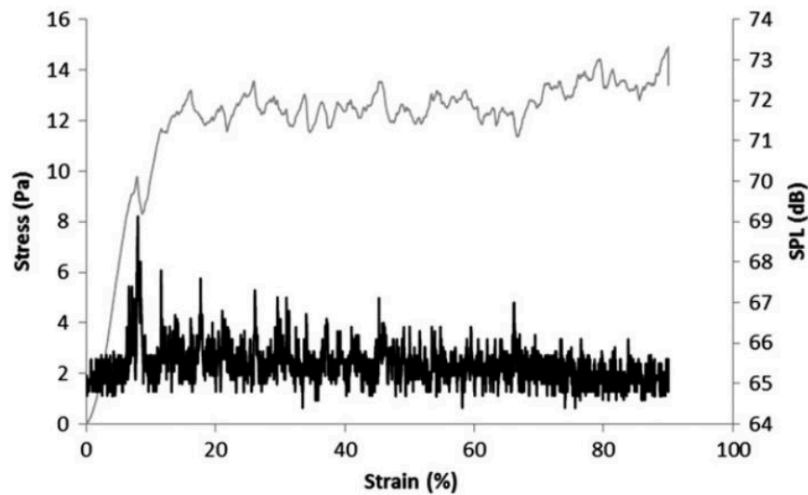
Per condurre l'esperimento, sono state selezionate sette cultivar commerciali di mele con diverse caratteristiche strutturali: Fuji, Golden Delicious, Granny Smith, Pink Lady, Renetta Canada, Royal Gala e Stark. È stato utilizzato un TA.XT.plus Texture Analyser, un dispositivo di prova meccanica, per eseguire un test di compressione sui campioni di mele (Tabella 4). Durante il test, i campioni sono stati sottoposti a una velocità di compressione specifica con una deformazione finale dell'80% dell'altezza iniziale del campione. Inoltre, è stata condotta un'analisi acustica utilizzando un sistema di registrazione per misurare le emissioni acustiche durante il test di penetrazione meccanica e il primo morso della mela.

I parametri meccanici e acustici, tra cui la forza, la deformazione, il livello di pressione sonora e la distanza lineare, sono stati attentamente monitorati e registrati durante i test (Figura 20, 21). Inoltre, è stata effettuata una misurazione del "fluido esprimibile" per quantificare il contenuto di succo della mela utilizzando fogli di carta da filtro posizionati sopra e sotto il campione sotto compressione .

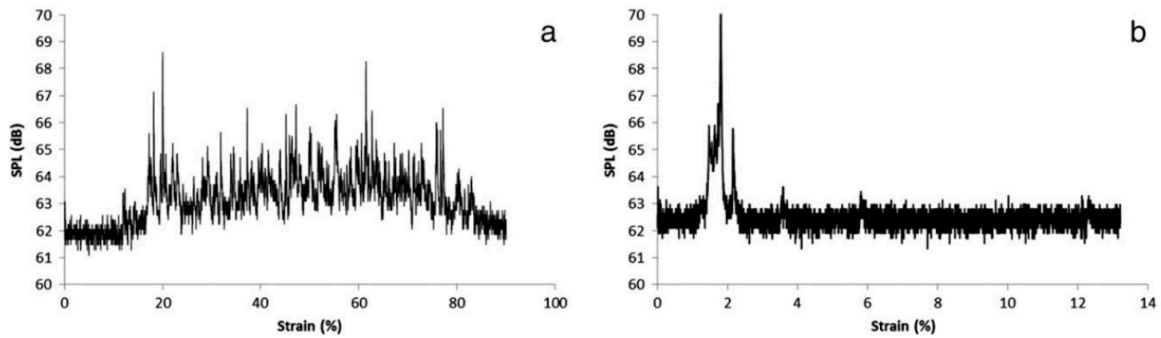
**Tabella 4**

Elenco dei parametri meccanici e acustici considerati nella sperimentazione.

| Tipologia | Nome                                 | Etichetta | Unità          | Descrizione   |
|-----------|--------------------------------------|-----------|----------------|---|
| Meccanico | Modulo di Young                      | MIO       | Nmm $\gamma$ 1 | Modulo di elasticità  |
|           | Viaggio                              | MD        | mm             | Distanza tra il punto di inizio e quello di fine dell'analisi |
|           | La zona                              | MW        | Nmm $\gamma$ 1 | Energia di deformazione totale                                |
|           | Forza finale                         | MEF       | N              | Valore della forza alla fine del profilo                      |
| Acustico  | N, picchi                            | APN       | Adimensionale  | Numero totale di picchi acustici                              |
|           | Distanza lineare                     | ALD       | Adimensionale  | Estensione lineare dello spettro acustico frastagliato        |
|           | Livello medio di pressione sonora    | AAI       | dB             | Valore medio del livello di pressione sonora                  |
|           | Valore massimo picchi acustici Corsa | AMP       | dB             | Valore massimo tra i picchi di pressione acustica             |
|           |                                      | ---       | mm             | Distanza tra il punto di inizio e quello di fine dell'analisi |



**Fig. 20.** Tracce meccaniche (-) e acustiche (-) della mela Granny Smith durante la prova di puntura. (L. Piazza, V. Giovenzana / Food Research International 69 (2015) 209–215 )

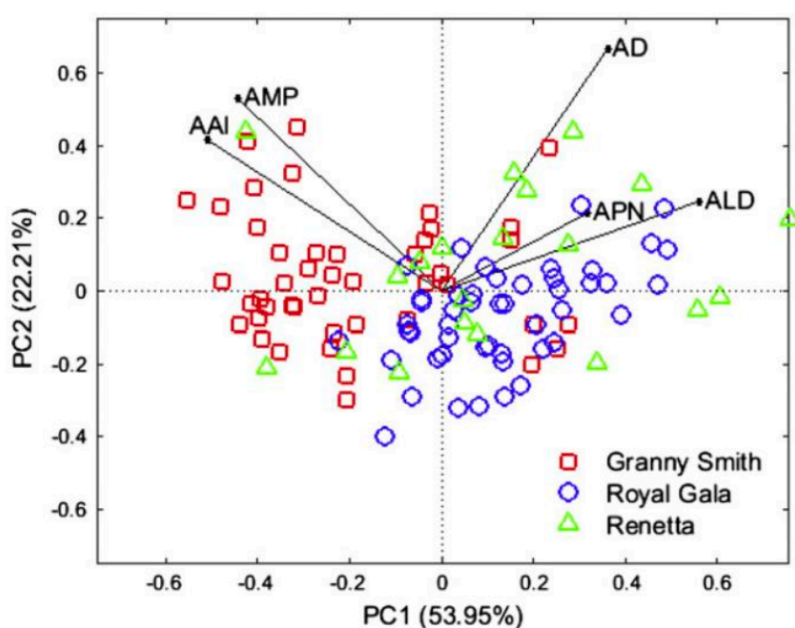


**Fig 21.** Esempio di tracce acustiche da test penetrativo strumentale (a) e test sensoriale (b) su mela Granny Smith. (L. Piazza, V. Giovenzana / Food Research International 69 (2015) 209–215 )

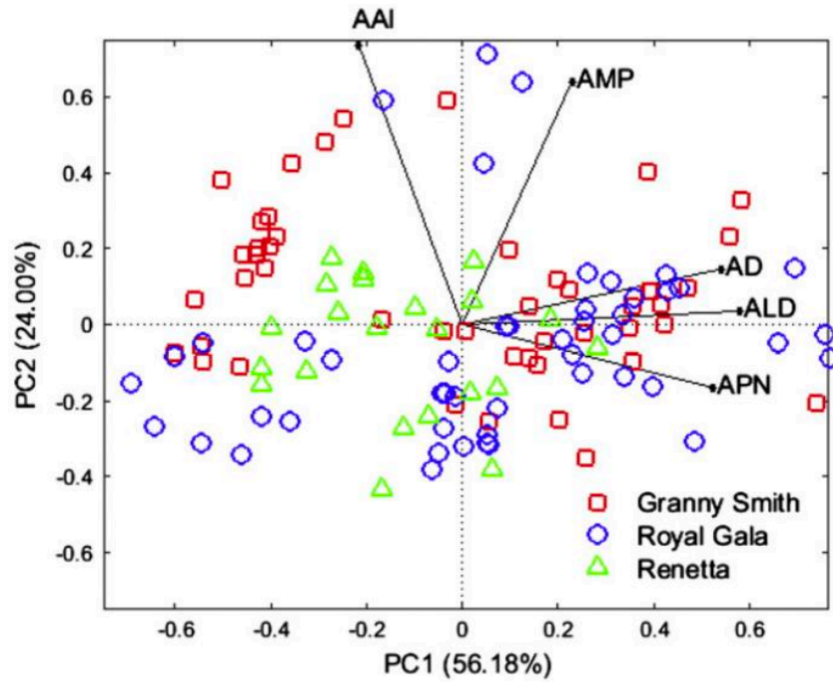
Nell'analisi dei dati, è stata utilizzata l'analisi delle componenti principali (PCA) per esplorare la possibile suddivisione delle mele in base alla combinazione di componenti strumentali meccanico-acustiche per la valutazione della croccantezza. La PCA è una tecnica multivariata che consente di ridurre la complessità dei dati, identificando i modelli nascosti all'interno di un insieme di variabili e visualizzando le relazioni tra i campioni e le variabili (Figura 22, 23, 24, 25).

I risultati dell'analisi PCA sono stati rappresentati graficamente attraverso biplot, che è un tipo di grafico che mostra contemporaneamente i campioni e le variabili in uno spazio bidimensionale. Nel biplot, i campioni (nel nostro caso, le diverse cultivar di mele) sono rappresentati come punti nello spazio, mentre le variabili (parametri acustici e meccanici) sono rappresentate come vettori. Questo tipo di visualizzazione consente di valutare la relazione tra i campioni e le variabili e di individuare eventuali pattern o raggruppamenti.

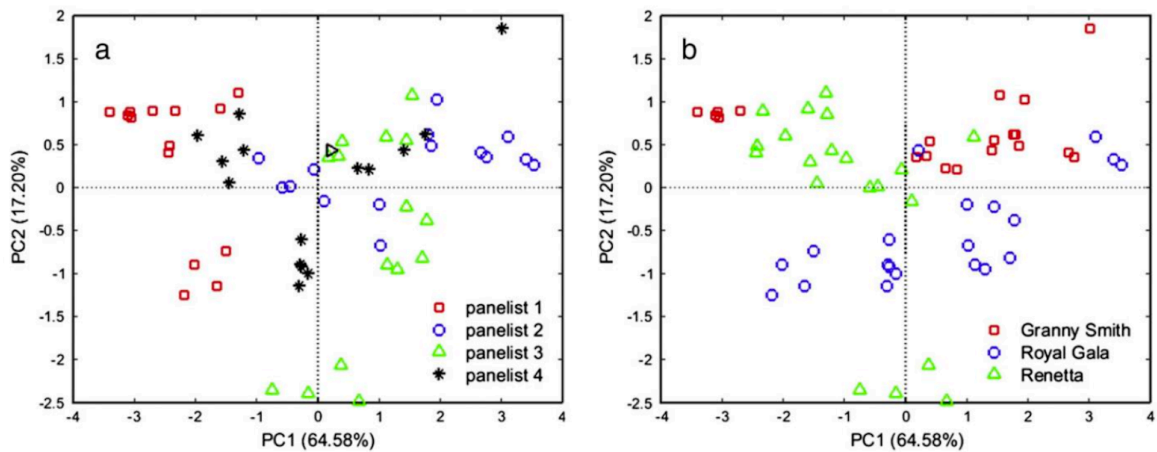
Nel contesto specifico di questo studio, il biplot ottenuto dall'analisi PCA ha evidenziato la relazione tra i suoni emessi durante il morso umano e le diverse cultivar di mele. È emerso che i suoni del morso umano non erano in grado di distinguere in modo efficace le diverse cultivar in base alla loro croccantezza. Tuttavia, l'analisi ha permesso di individuare eventuali raggruppamenti o separazioni tra le cultivar in base alle caratteristiche acustico-meccaniche, fornendo informazioni dettagliate sulla variabilità della consistenza delle mele.



**Fig. 22.** Biplot PCA relativo al set di dati acustici strumentali per le mele Granny Smith, Royal Gala e Renetta Canada. APN = numero totale di picchi acustici; ALD = distanza lineare; AAI (dB) = valore medio tra i picchi acustici; AMP (dB) = valore massimo tra i picchi acustici; AD = distanza tra il punto di inizio e quello di fine analisi. (L. Piazza, V. Giovenzana / Food Research International 69 (2015) 209–215 )



**Fig. 23.** Biplot PCA relativo al set di dati acustici sensoriali per le mele Granny Smith, Royal Gala e Renetta Canada. APN = Numero totale di picchi acustici; ALD = distanza lineare; AAI (dB) = valore medio tra i picchi acustici; AMP (dB) = valore massimo tra i picchi acustici; AD = distanza tra il punto di inizio e quello di fine analisi. (L. Piazza, V. Giovencana / Food Research International 69 (2015) 209–215 )



**Fig. 24.** Grafico del punteggio PCA del raggruppamento di set di dati acustici del morso umano per i quattro soggetti selezionati (responsabili 1–4) (a) e per cultivar (b) di mele Granny Smith, Royal Gala e Renetta Canada. (L. Piazza, V. Giovencana / Food Research International 69 (2015) 209–215 )

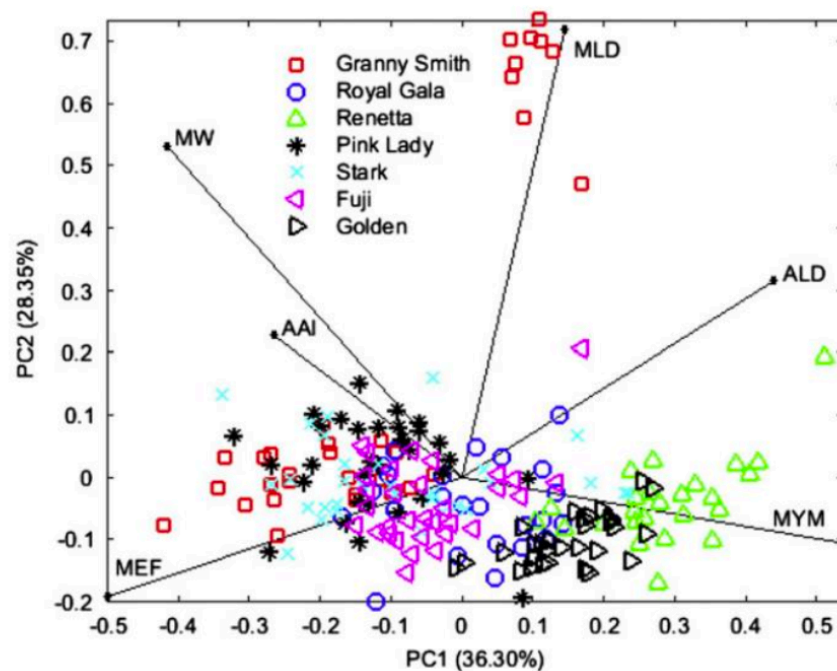


Fig. 25. Biplot PCA relativo al set di dati acustico-meccanici strumentali per Fuji, Golden

Mele Delicious, Granny Smith, Royal Gala, Renetta Canada, Pink Lady e Stark.

MYM = modulo di Young; MD = distanza tra il punto iniziale e quello finale di

analisi; MW = energia di deformazione totale; MEF = valore della forza all'estremità del profilo; ALD = distanza lineare; AAI (dB) = valore medio tra i picchi acustici. (L. Piazza, V. Giovenzana / Food Research International 69 (2015) 209–215 )

In conclusione è stata evidenziata l'importanza dell'approccio acustico-meccanico per la valutazione della croccantezza delle mele. L'analisi dei dati ha permesso di individuare le principali fonti di variazione nei parametri acustico-meccanici e di valutare come tali parametri possano essere utilizzati per distinguere le diverse cultivar in base alla loro croccantezza. [7]

#### 4.3 Studio sull'uovo: spessore, resistenza e crepe

L'esperimento è stato condotto nel 2009 presso il Dipartimento di Ingegneria Agraria della Facoltà di Agraria dell'Università Ain-Shams del Cairo, in Egitto.

Il test aveva come obiettivo la valutazione della resistenza e lo spessore del guscio dell'uovo attraverso la risonanza acustica.

<sup>7</sup> Riferimento bibliografico: 13

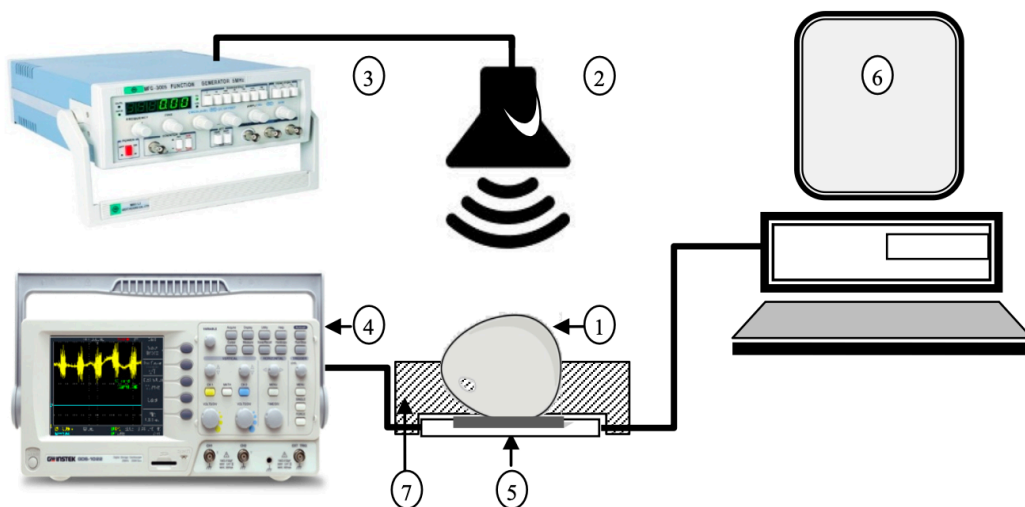


Il materiale utilizzato sono 30 uova di gallina Fayoumi, una razza locale egiziana, raccolte da una gallina di 44 settimane. La massa media dell'uovo è di 60,13 g. Tutte le misurazioni sono state effettuate su uova intatte entro una settimana dalla raccolta.

L'esperimento ha utilizzato due metodi di eccitazione meccanica non dannosi per l'uovo. Il primo metodo consiste nell'utilizzo di strumenti diversi ottenuti da studi precedenti. Il secondo metodo si basa sulla risonanza acustica dell'uovo, che rappresenta la trasmissibilità acustica del guscio dell'uovo, risultante dai componenti interni dell'alimento.

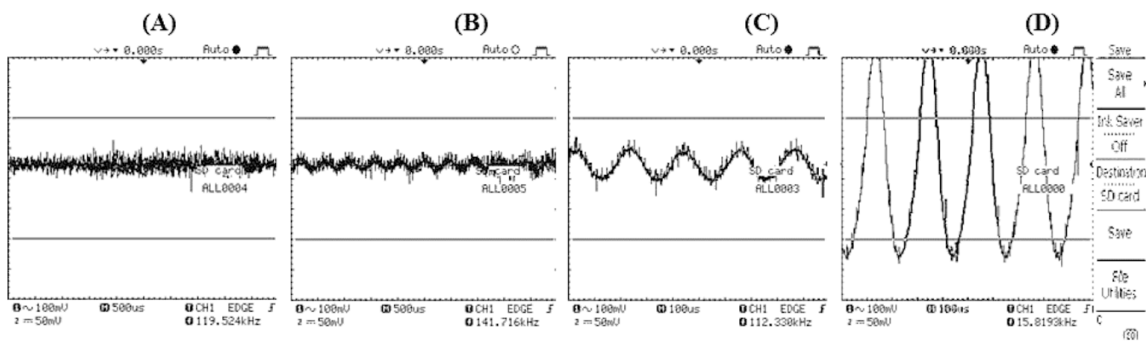
Per la risonanza acustica, l'uovo è stato posizionato su una piattaforma di supporto e sottoposto a un segnale di eccitazione acustica generato da un altoparlante posto a 5 cm sopra l'uovo. Il segnale di eccitazione acustica è stato gradualmente sintonizzato dal generatore di frequenza fino a quando le risposte di risonanza dell'uovo sono state catturate dall'oscilloscopio (Figura 26).

La massa dell'uovo è stata misurata con una bilancia digitale AcculabV-200 con una capacità massima di 200 g e una ripetibilità di  $\pm 0,01$  g. Per la misurazione della massa del guscio dell'uovo, il guscio rotto risultante dal test di frattura (Figura 29) è stato raccolto e lavato con acqua calda per rimuovere l'albume aderente e asciugato a  $105^{\circ}\text{C}$  per 24 ore. Lo spessore del guscio è stato misurato, utilizzando un micrometro a quadrante, per tre pezzi dall'equatore dell'uovo e equidistanti tra loro sulla stessa metà del guscio

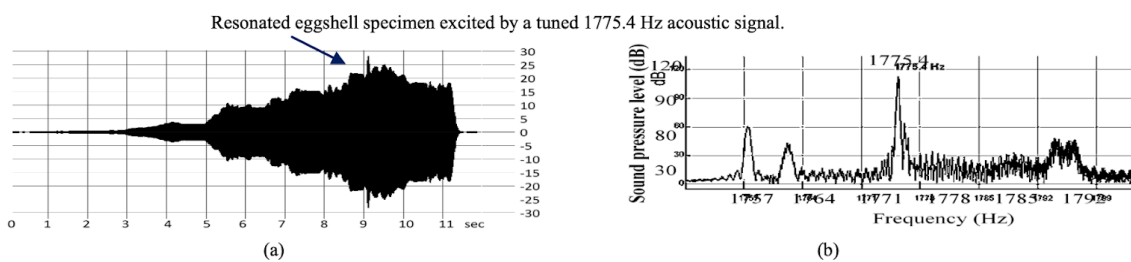


**Fig. 26.** Sistema di risonanza, rilevamento, registrazione e analisi dell'uovo: (1) uovo testato, (2) altoparlante, (3) generatore di funzioni, (4) oscilloscopio digitale, (5) sensore piezoelettrico, (6) computer, (7) spugna di supporto. (International Journal of Biophysics 2014, 4(1): 9-15 )

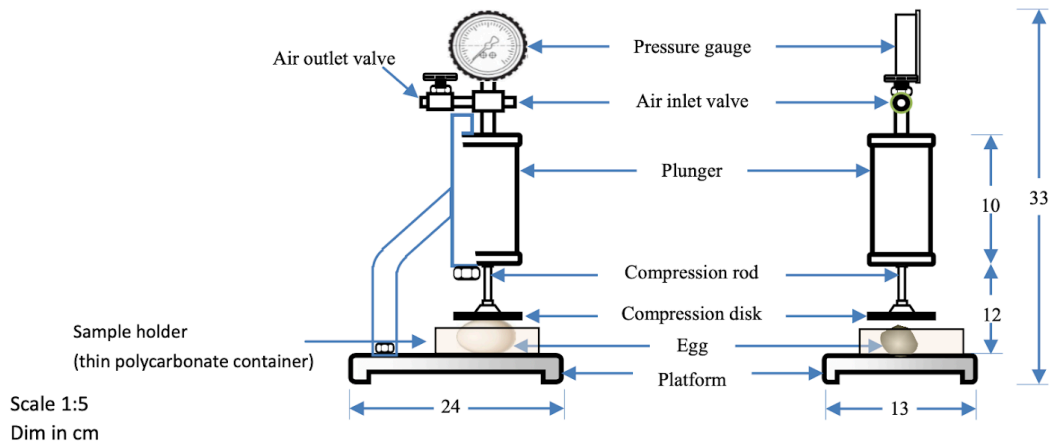
Nell'analisi dei dati e dei risultati, è stata eseguita un'approfondita valutazione delle frequenze di risonanza dell'uovo, del guscio dell'uovo, dell'albume e del tuorlo. Dopo l'eccitazione acustica, le risposte di risonanza dell'uovo sono state trasmesse a un oscilloscopio digitale a doppio canale (modello GW INSTEK, GDS-1022) mediante un sensore di vibrazione piezoelettrico FT-20T-6A1. I dati acustici sono stati registrati, memorizzati e analizzati tramite un computer (Figura 27, 28).



**Fig. 27.** Risposta della vibrazione dell'uovo alle frequenze di eccitazione acustica sintonizzate gradualmente: (a) uovo senza risposta al segnale di eccitazione, (b, c) risposta alla vibrazione dell'uovo e (d) vibrazione dell'uovo con risposta massima (frequenza di risonanza) (International Journal of Biophysics 2014, 4(1): 9-15 )



**Fig. 28.** Risposta alle vibrazioni di un uovo, sottoposto a frequenze incrementali, registrata nei domini del tempo (a) e della frequenza (b) (International Journal of Biophysics 2014, 4(1): 9-15 )



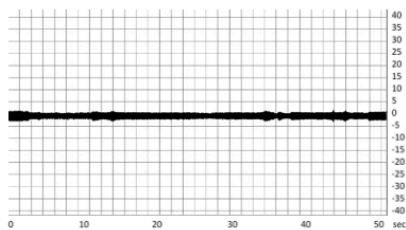
**Fig. 29.** Un apparecchio per misurare la resistenza del guscio d'uovo. (International Journal of Biophysics 2014, 4(1): 9-15 )

Per interpretare i risultati, è stata utilizzata l'equazione di stima della rigidità ( $K_{dyn}$ ) dell'uovo o del guscio dell'uovo, in base alla massa dell'uovo ( $M$ ) o alla massa del guscio dell'uovo ( $m$ ) e alla frequenza di risonanza ( $\omega_n$ ):

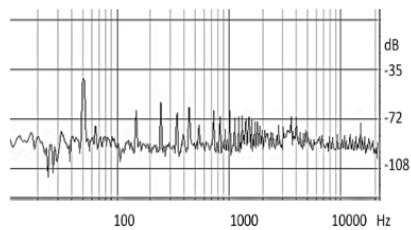
$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{dyn}}{M}} \text{ or } \omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{dyn}}{m}} \tag{1.26}$$

Per analizzare le frequenze di risonanza, sono stati utilizzati filtri passa-banda per estrarre le frequenze specifiche di interesse. I risultati sono stati interpretati in base alle risposte di risonanza dell'uovo e dei suoi componenti. In particolare, sono stati eseguiti i seguenti passaggi:

1. Registrazione del rumore e dei segnali di eccitazione acustica e analisi FFT dei pattern (senza uovo).

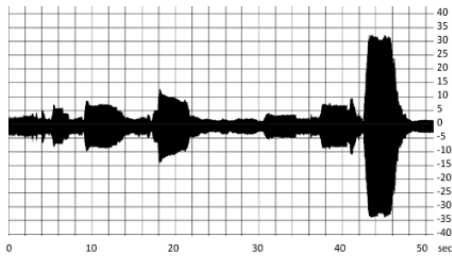


Time in second

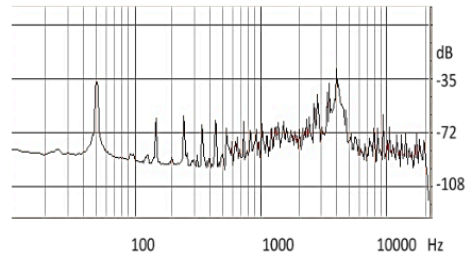


Frequency (Hz)

2. Risposta di risonanza dell'uovo all'eccitazione acustica a diverse frequenze, registrata con il software CoolEdit Pro. *KHz 20 to 20 kHz*.

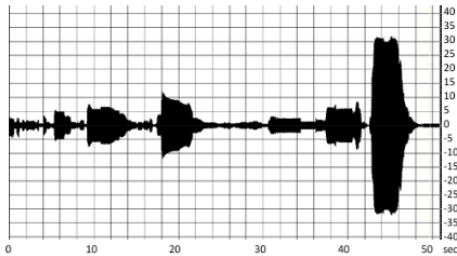


Time in second

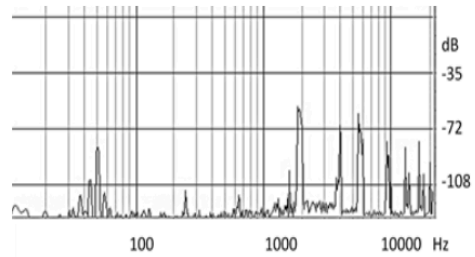


Frequency (Hz)

3. Filtraggio dei segnali di risonanza dell'uovo per ridurre il rumore e le frequenze di eccitazione.

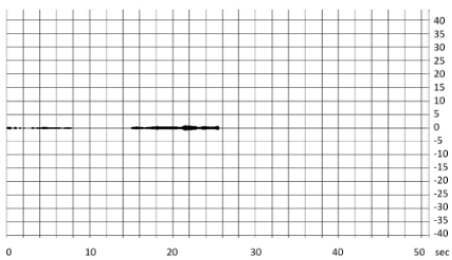


Time in second

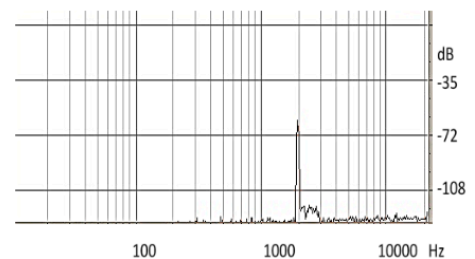


Frequency (Hz)

4. Applicazione di un filtro passa-banda per estrarre la frequenza di risonanza del guscio dell'uovo. *0 kHz to 2 kHz*

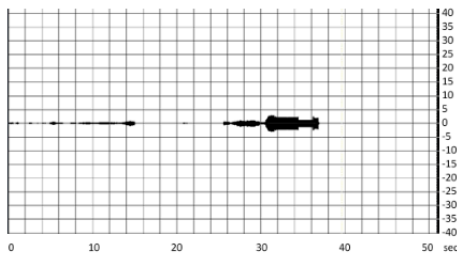


Time in second

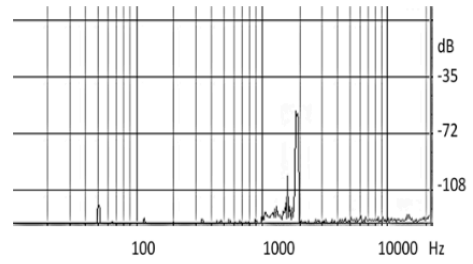


Frequency (Hz)

5. Applicazione di un filtro passa-banda per estrarre la frequenza di risonanza del guscio dell'uovo. 2 kHz to 3 kHz

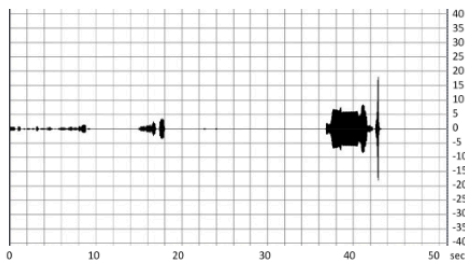


Time in second

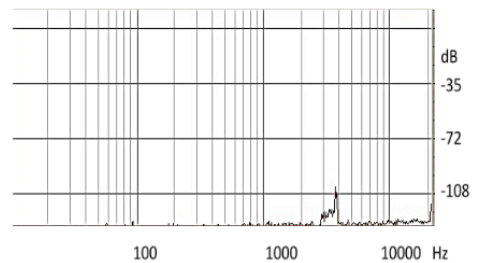


Frequency (Hz)

6. Applicazione di un filtro passa-banda per estrarre la frequenza di risonanza dell'albume. 3.5 KHz to 4 KHz.

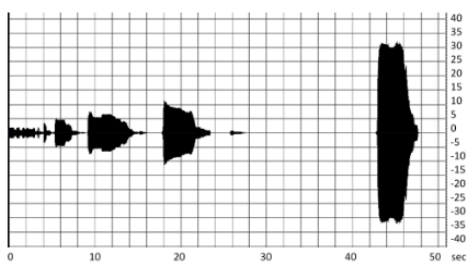


Time in second

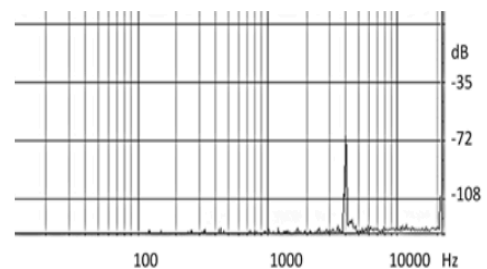


Frequency (Hz)

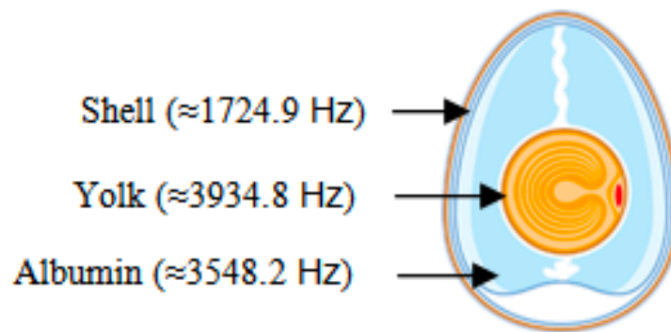
7. Applicazione di un filtro passa-banda per estrarre la frequenza di risonanza del tuorlo. 4 kHz to 4.5 kHz



Time in second



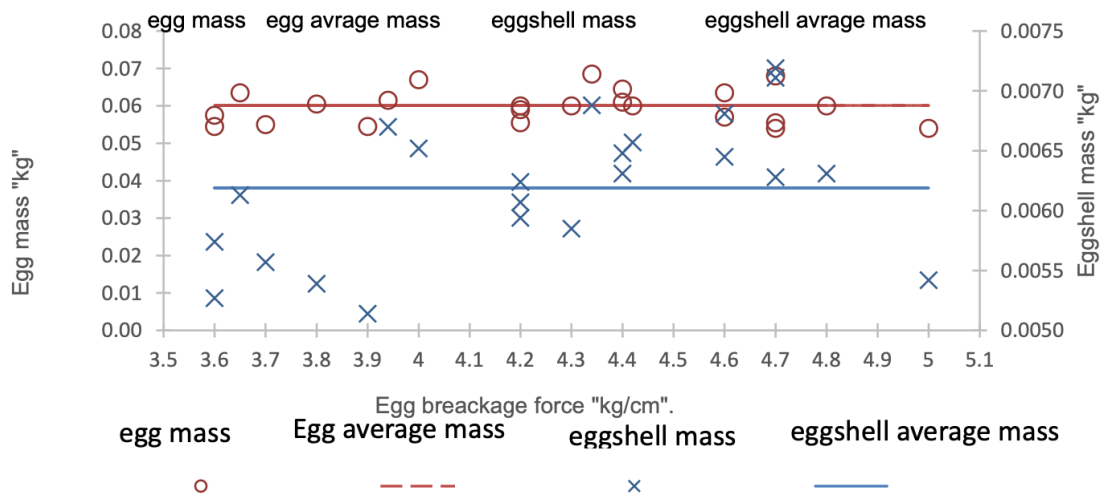
Frequency (Hz)



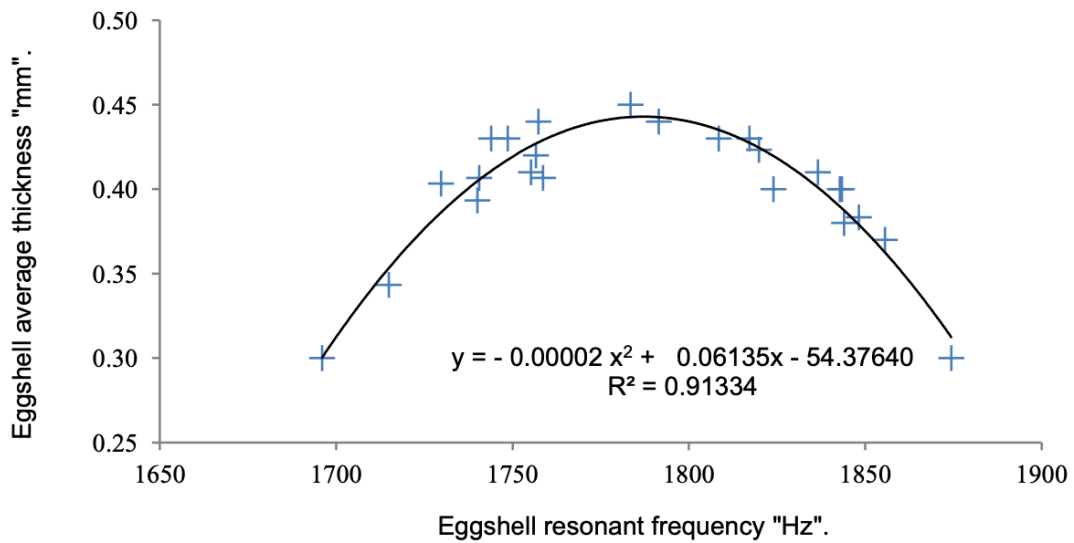
**Fig. 30.** Misurazione frequenze di risonanza guscio, albume tuorlo. (International Journal of Biophysics 2014, 4(1): 9-15 )

I principali risultati includono:

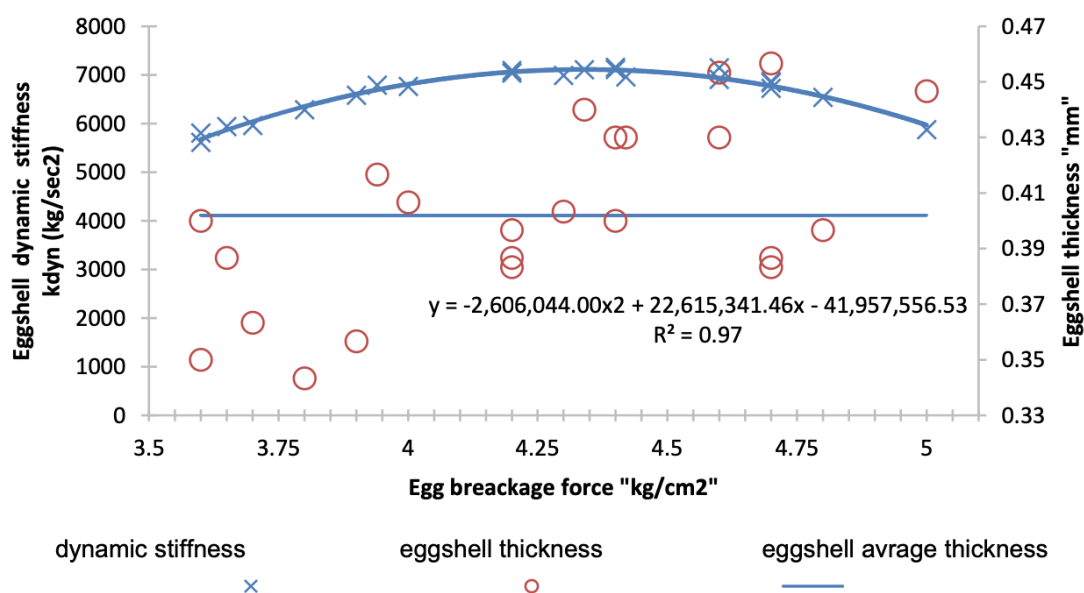
1. Frequenze di risonanza (Figura 30): Sono state identificate le frequenze di risonanza dell'uovo, del guscio dell'uovo, dell'albume e del tuorlo in risposta all'eccitazione acustica. I valori delle frequenze di risonanza per il guscio dell'uovo, l'albume e il tuorlo sono stati riportati come 1750 Hz, 3500 Hz e 3900 Hz.
2. Correlazione tra frequenza di risonanza e resistenza del guscio (Figura 31): È stata evidenziata una forte correlazione ( $R^2 = 0,97$ ) tra la frequenza di risonanza del guscio dell'uovo e la sua resistenza. Questo suggerisce che la frequenza di risonanza può essere utilizzata come indicatore non distruttivo della resistenza del guscio dell'uovo.
3. Variazione delle risposte in base al supporto dell'uovo: È stato osservato che la risposta in frequenza dell'uovo è fortemente influenzata dalla selezione del supporto dell'uovo. Sono stati riportati i dettagli delle variazioni in base al materiale, al peso, all'angolo di deploy e alla velocità del pendolo utilizzato per eccitare l'uovo.
4. Relazione tra frequenza di risonanza e spessore del guscio (Figura 32): Non è stata riscontrata una relazione evidente tra lo spessore del guscio dell'uovo e la forza di rottura. Tuttavia, è stata evidenziata una correlazione significativa (0,97 e 0,91) tra i valori di risonanza del guscio dell'uovo, la sua resistenza e spessore (Figura 33).



**Fig. 31.** Rapporto tra la massa dell'uovo e del guscio e la forza di rottura del guscio. (International Journal of Biophysics 2014, 4(1): 9-15 )



**Fig. 32.** Relazione tra spessore del guscio e frequenza di risonanza del guscio. (International Journal of Biophysics 2014, 4(1): 9-15 )



**Fig. 33.** Lo spessore del guscio d'uovo, la forza di rottura e la rigidità dinamica calcolata. (International Journal of Biophysics 2014, 4(1): 9-15 )

Sempre in relazione all'alimento uovo si è svolto un altro esperimento per determinare l'integrità del guscio d'uovo. Il test è stato condotto da un team di ricercatori dell'Università di Jinan, in Cina. L'articolo scientifico che descrive l'esperienza è stato pubblicato sulla rivista Journal of Food Process Engineering nel 2020.

L'esperimento è stato condotto utilizzando un dispositivo sperimentale appositamente progettato, composto da un dispositivo di eccitazione, un modulo di acquisizione dei segnali acustici e un computer personale per l'elaborazione dei dati.

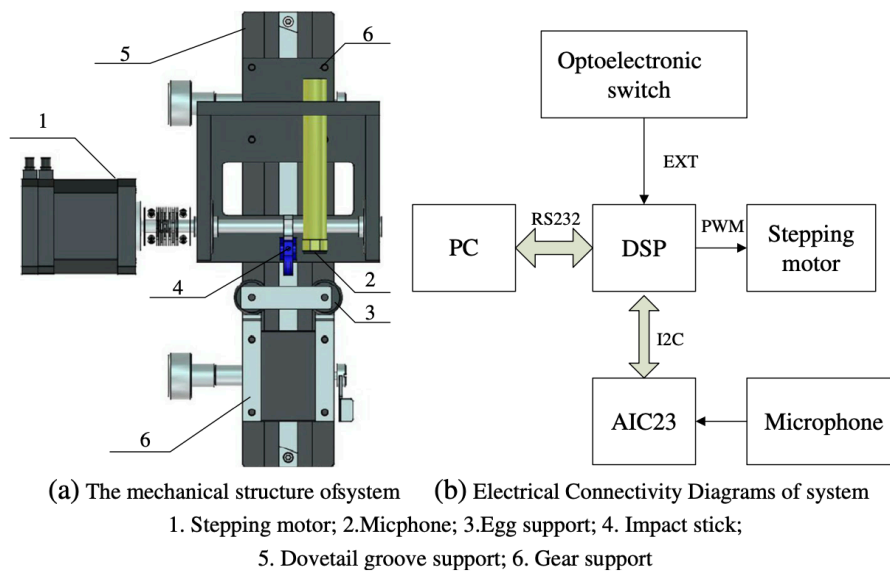
Il dispositivo di eccitazione è stato progettato per generare impatti controllati sul guscio dell'uovo. Esso è composto da un motore passo-passo che controlla un dispositivo di impatto in nylon. Durante l'esperimento, le uova sono state posizionate su un supporto appositamente progettato per garantire un impatto lungo l'asse longitudinale dell'uovo. Un microfono a elettretti è stato posizionato sulla parte superiore di ciascuna uovo a una distanza di circa 22 mm per acquisire i segnali acustici generati dall'impatto.

L'acquisizione dei segnali è stata gestita da un circuito auto-progettato (Figura 34) con elaborazione digitale del segnale (DSP) come chip principale, che controllava il motore



passo-passo utilizzando la modulazione in larghezza di impulso. I segnali acustici generati dall'impatto sull'uovo sono stati acquisiti da un convertitore analogico-digitale e trasmessi al DSP per l'elaborazione. Ogni segnale di risposta, con un numero di punti di campionamento di 2048 e una frequenza di campionamento di 96 kHz, è stato quindi memorizzato per l'analisi successiva.

L'analisi dei segnali acustici ha rivelato differenze significative tra i segnali provenienti da uova con crepe nel guscio e uova integre. Questa distinzione è stata sfruttata per sviluppare un metodo di rilevazione delle crepe del guscio basato sull'analisi della risonanza acustica. In particolare, è stata condotta un'analisi dettagliata dei segnali acustici per identificare le caratteristiche distintive associate alle crepe del guscio.

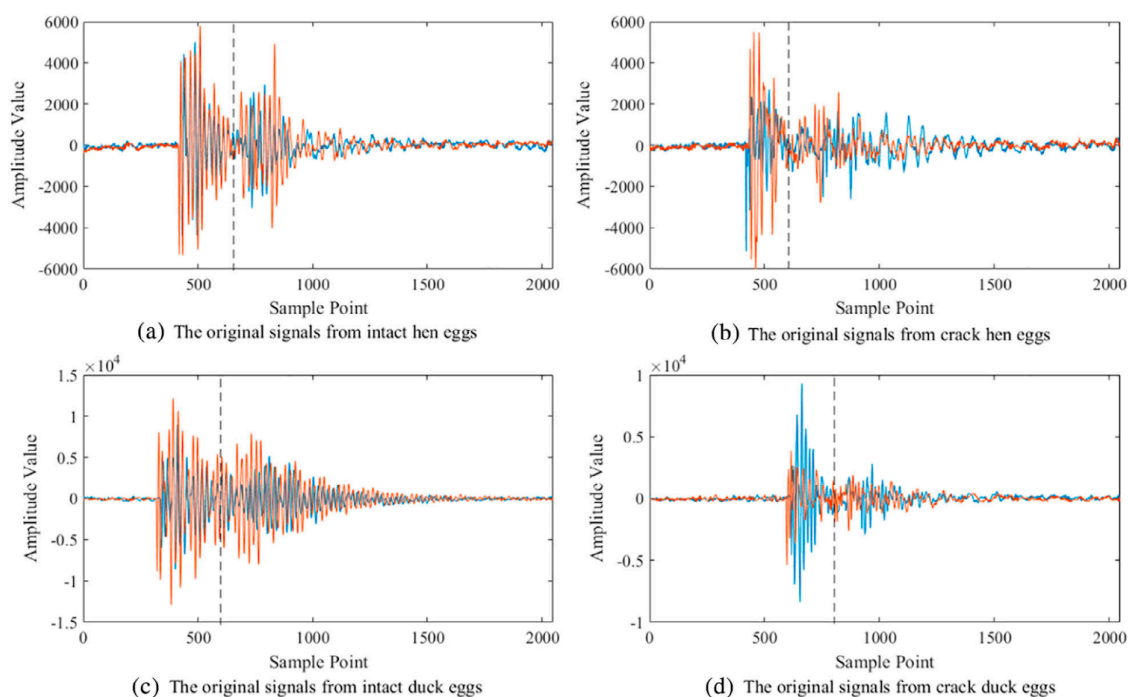


**Fig. 34.** Il diagramma schematico del sistema sperimentale. (a) La struttura meccanica del sistema, (b) Diagrammi di connettività elettrica del sistema.

1. Motore passo-passo; 2. Microfono; 3. Supporto per le uova; 4. Bastone da impatto; 5. Supporto per gola a coda di rondine; 6. Supporto per ingranaggi. (Sun, Y., Zhang, Y., Li, Y., & Zhang, Y. Journal of Food Process Engineering. 2020)

Dopo l'acquisizione dei segnali acustici generati dagli impatti controllati sul guscio delle uova, è stata condotta un'analisi dettagliata per distinguere i segnali provenienti da uova con crepe nel guscio da quelli delle uova integre.

I risultati di questa analisi sono stati rappresentati graficamente (Figura 35) per evidenziare le differenze tra i segnali acustici associati alle uova con crepe nel guscio e quelli delle uova integre. In particolare, i segnali acustici sono stati rappresentati nel dominio del tempo per visualizzare le variazioni temporali delle onde sonore generate dagli impatti sul guscio delle uova. I grafici mostrano chiaramente le differenze nei pattern dei segnali acustici tra le uova con crepe nel guscio e le uova integre.



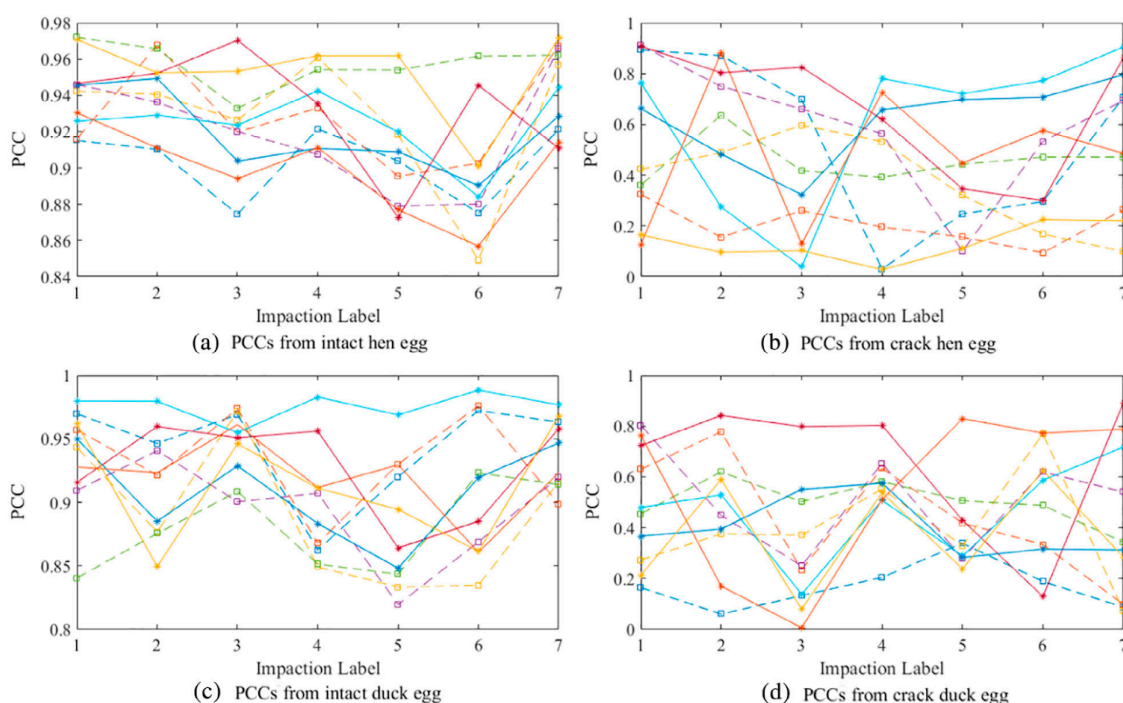
**Fig. 35.** I tipici segnali di risposta nel dominio del tempo. (Sun, Y., Zhang, Y., Li, Y., & Zhang, Y. Journal of Food Process Engineering. 2020)

In particolare, sono stati calcolati e confrontati più di 100 parametri statistici derivati dai segnali acustici al fine di identificare le differenze significative tra i segnali provenienti da uova con crepe nel guscio e quelli delle uova integre.

I segnali acustici sono stati acquisiti da otto microfoni posizionati in corrispondenza di diverse regioni dell'uovo e da diverse direzioni (vicino all'estremità smussata e vicino all'estremità a forma). Questi segnali sono stati utilizzati per calcolare i coefficienti di correlazione di Pearson (PCC) tra il segnale di riferimento e gli altri sette segnali acustici. I

PCC sono stati utilizzati come feature per valutare la similarità tra i segnali acustici e identificare le differenze tra le uova con crepe nel guscio e le uova integre.

I risultati di questa analisi hanno evidenziato differenze significative nei valori dei PCC (Figura 36) tra i segnali acustici delle uova con crepe nel guscio e quelli delle uova integre. Queste differenze sono state rappresentate graficamente per illustrare le variazioni nei valori dei PCC tra le due categorie di uova. Inoltre, è stata condotta un'analisi dettagliata dei parametri statistici derivati dai segnali acustici al fine di identificare le caratteristiche distintive tra le uova con crepe nel guscio e le uova integre.



**Fig. 36.** Tipici PCC di uova differenti. (Sun, Y., Zhang, Y., Li, Y., & Zhang, Y. Journal of Food Process Engineering. 2020)

L'analisi dettagliata dei segnali acustici e dei parametri statistici derivati da essi ha permesso di identificare le caratteristiche distintive associate alle crepe del guscio e sviluppare un metodo di classificazione accurato e affidabile per distinguere le uova con crepe nel guscio da quelle integre.

Il metodo proposto ha dimostrato di avere un'alta sensibilità e accuratezza nella rilevazione delle crepe del guscio delle uova, con un tasso di rilevamento delle crepe del 95,5% e un

tasso di rifiuto falso del 5%. Inoltre, il metodo è stato progettato per essere adattabile a diverse categorie di uova, come quelle di gallina e di anatra. [8]

#### ***4.4 Monitoraggio acustico degli occhi del formaggio Emmental***

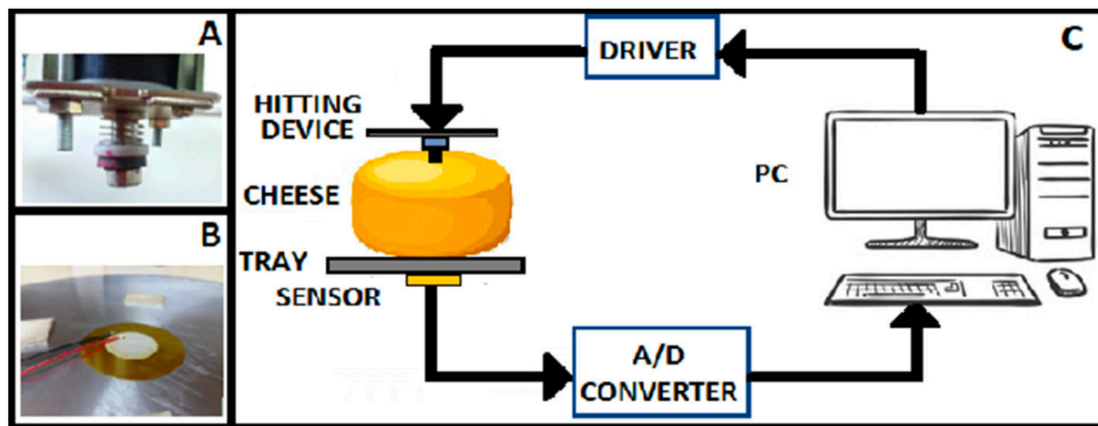
L'esperimento è stato condotto da Mariana González, Eliana Budelli, Nicolás Pérez e Patricia Lema presso l'Instituto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, a Montevideo, in Uruguay. Il test condotto aveva la finalità di monitorare la formazione degli occhi durante la maturazione del formaggio Emmental.

Per condurre l'esperimento, sono state impiegate otto forme di formaggio Emmental fornite da un produttore locale dopo la pre-maturazione. Le forme di formaggio, caratterizzate da un'altezza di 15 cm, un diametro di 25 cm e un peso medio di 8 kg, sono state mantenute in una camera a temperatura e umidità controllate a  $18\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  e  $75 \pm 5\%$  di umidità relativa. Al fine di generare e acquisire impulsi acustici, è stato utilizzato un dispositivo di impatto e un sensore piezoelettrico (Figura 37), posizionati rispettivamente sulla superficie superiore del formaggio e sul fondo del vassoio di alluminio. Inoltre, per l'acquisizione dei dati è stato impiegato un dispositivo specifico (NI USB-6210 National Instruments), mentre per l'elaborazione dei segnali acustici è stato utilizzato un software commerciale (MATLAB, The MathWorks Inc.).

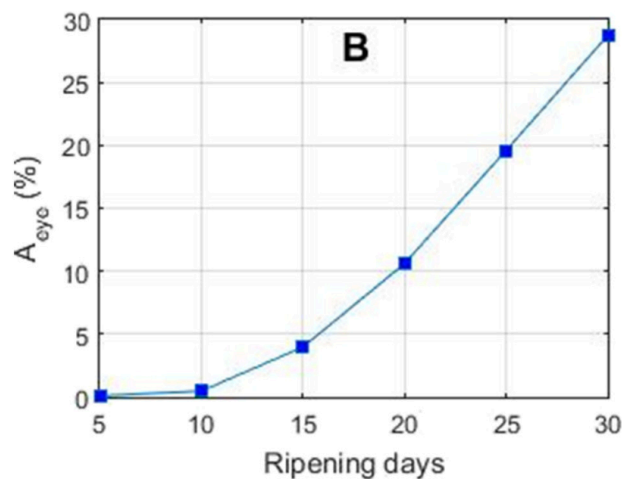
Durante il periodo di maturazione di 30 giorni, sono state effettuate misurazioni acustiche cinque giorni alla settimana su tutte le forme di formaggio (Figura 38). Ogni cinque giorni, una forma di formaggio è stata tagliata longitudinalmente a metà per scattare un'immagine digitale. Successivamente, sono stati prelevati campioni per determinare l'umidità e analizzare la consistenza del formaggio. Le misurazioni acustiche sono state effettuate generando impulsi meccanici sulla superficie superiore del formaggio e rilevando la risposta su un trasduttore di vibrazione nella parte inferiore del vassoio di alluminio. I segnali acustici digitalizzati sono stati elaborati utilizzando il software MATLAB, incluso il pre-trattamento del segnale, la sottrazione del valore medio e la normalizzazione dell'energia totale.

---

<sup>8</sup> Riferimento bibliografico: 3, 17



**Fig. 37.** Rappresentazione schematica dell'apparato sperimentale. (A) Generatore di impulsi. (B) Sensore piezoelettrico incollato sul vassoio. (C) Configurazione sperimentale. (M. González, et al. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 59 (2020) 102270)



**Fig. 38.** Evoluzione della formazione degli occhi. (A) Fotografie di sezioni del formaggio durante la stagionatura. (B) Area degli occhi rispetto all'area della sezione del formaggio durante il tempo di maturazione. (M. González, et al. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 59 (2020) 102270)

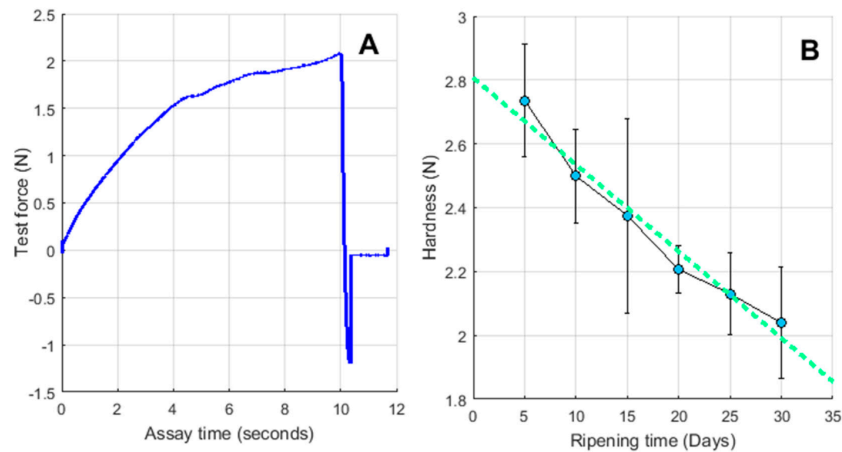
Il presente studio ha dimostrato che l'analisi acustica può essere utilizzata come metodo non distruttivo per monitorare la formazione degli occhi durante la maturazione del formaggio Emmental. In particolare, l'elaborazione dei segnali acustici ha permesso di identificare le variazioni nella risposta acustica del formaggio in relazione alla formazione degli occhi e alla loro evoluzione durante il processo di maturazione.

L'analisi del primo momento dello spettro (FOM) ha permesso di identificare le variazioni nella risposta acustica del formaggio in relazione alla formazione degli occhi e alla loro

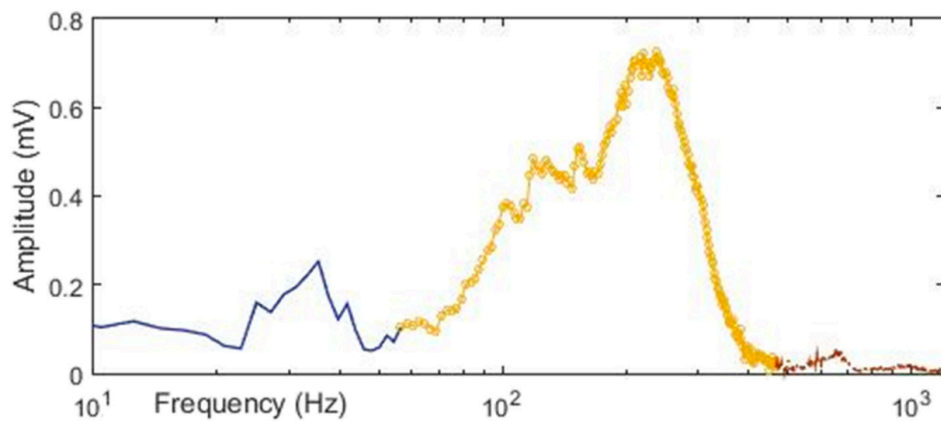
evoluzione durante il processo di maturazione. In particolare, si è osservato che la frequenza del picco del FOM diminuisce durante la maturazione del formaggio, il che indica un aumento dell'attenuazione del segnale acustico. Questo risultato può essere spiegato dalle variazioni nella matrice del formaggio, dalla perdita di acqua e dai cambiamenti strutturali che si verificano durante la maturazione. Inoltre, la presenza degli occhi all'interno del formaggio agisce come un diffusore, aumentando l'attenuazione del segnale acustico.

L'analisi della cross-correlazione dei segnali acustici ha permesso di identificare le variazioni nella risposta acustica del formaggio in relazione alla formazione degli occhi e alla loro evoluzione durante il processo di maturazione. In particolare, si è osservato che il valore massimo della cross-correlazione diminuisce durante la maturazione del formaggio, il che indica una diminuzione della correlazione tra i segnali acustici. Questo risultato può essere spiegato dalla presenza degli occhi all'interno del formaggio, che agiscono come diffusori e causano una diminuzione della correlazione tra i segnali acustici.

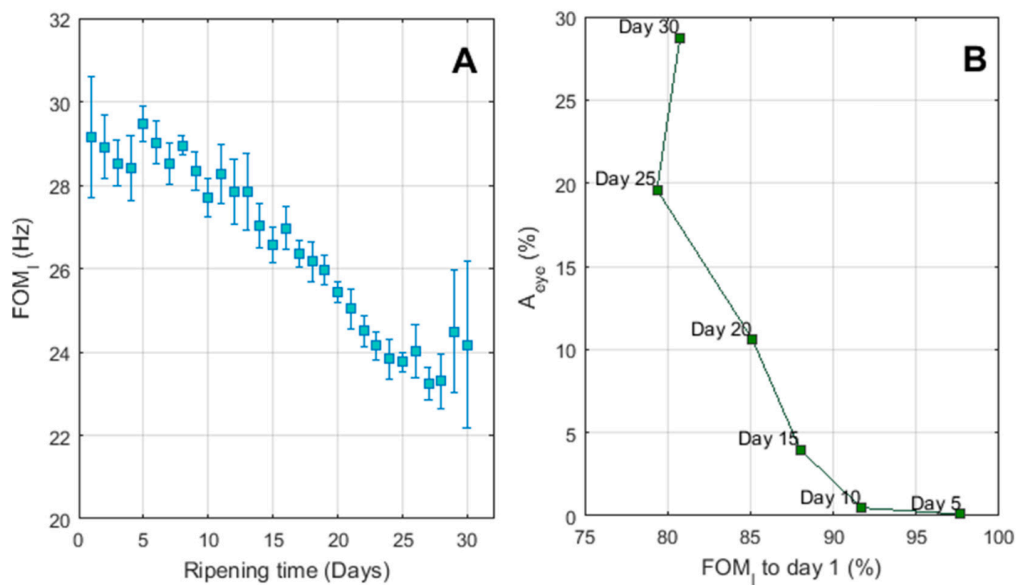
I risultati ottenuti dall'analisi acustica sono stati confrontati con i risultati ottenuti da due metodi distruttivi standard (analisi della consistenza e determinazione dell'umidità) e con l'analisi delle immagini del formaggio. I risultati hanno dimostrato che i parametri acustici consentono di rilevare diverse fasi della formazione degli occhi e che tali risultati sono coerenti con le informazioni ottenute dalle immagini del formaggio. Inoltre, l'analisi acustica si è dimostrata un metodo non distruttivo per monitorare la formazione degli occhi durante la maturazione del formaggio Emmental (Figura 39, 40, 41).



**Fig. 39.** Misurazione ed evoluzione della struttura nel corso della maturazione. (A) Curva del test di penetrazione per un campione di formaggio al giorno 30. (B) Evoluzione della durezza nel corso del tempo di maturazione. In linea continua e indicatori circolari (-o-) sono i dati sperimentali e in linea discontinua (---) è la regressione lineare dei dati sperimentali. (M. González, et al. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 59 (2020) 102270 )



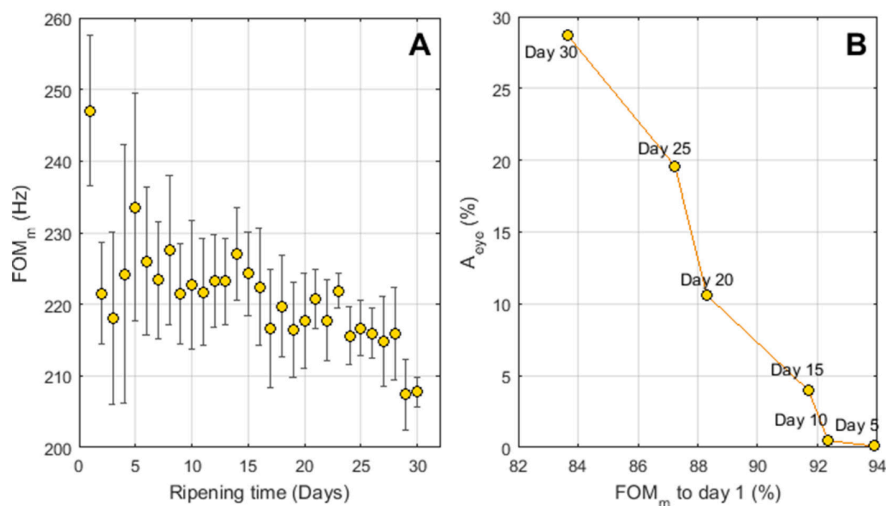
**Fig. 40.** Spettro di frequenza di una risposta acustica con asse x in scala logaritmica. Linea continua blu (—), banda bassa (0–50 Hz). Giallo con indicatori circolari (-o-), banda media (50–500 Hz). Linea rossa discontinua (- - -), banda alta (500–1200 Hz). (Per l'interpretazione dei riferimenti al colore nella legenda di questa figura, si rimanda il lettore alla versione web di questo articolo.) (M. González, et al. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 59 (2020) 102270 )



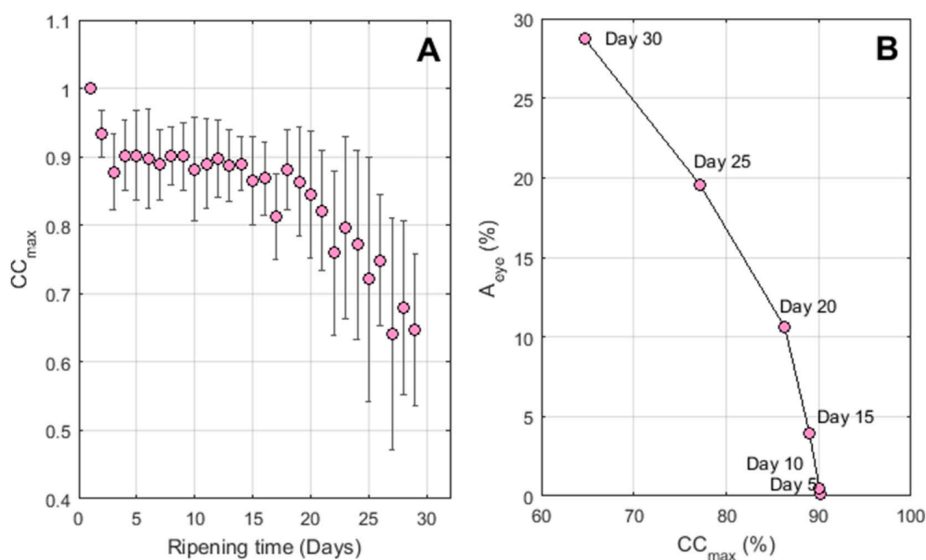
**Fig. 41.** Risultati FOM e relazione con l'area degli occhi per la banda a bassa frequenza. (A) Quadrati (■): risultati FOM per le basse frequenze durante la maturazione. Le barre di errore corrispondono alla deviazione standard delle misurazioni. (B) Quadrati (■): area degli occhi in funzione della FOM normalizzata per la banda bassa. Linea continua (e): linea di tendenza che collega i punti dati. (M. González, et al. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 59 (2020) 102270)

In conclusione i risultati ottenuti dall'analisi acustica sono stati confrontati con i risultati ottenuti da due metodi distruttivi standard (analisi della consistenza e determinazione dell'umidità) e con l'analisi delle immagini del formaggio. I grafici (Figura 42, 43) mostrano chiaramente la relazione tra l'evoluzione della formazione degli occhi e i parametri acustici, confermando la validità dell'analisi acustica come metodo non distruttivo per monitorare la formazione degli occhi durante la maturazione del formaggio Emmental.





**Fig. 42.** Risultati FOM e relazione con la zona degli occhi. (A) Quadrati (■): risultati FOM per le frequenze medie. Le barre di errore corrispondono alla deviazione standard delle misurazioni. (B) Quadrati (■): area degli occhi in funzione della FOM normalizzata per la banda media. Linea continua (e): linea di tendenza che collega i punti dati. (M. González, et al. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 59 (2020) 102270 )



**Fig. 43.** Evoluzione della correlazione incrociata e relazione con la zona degli occhi. (A) Cerchi (○): risultati di correlazione incrociata rispetto al tempo di maturazione. Le barre di errore corrispondono alla deviazione standard delle misurazioni. (B) Cerchi (○): zona degli occhi in funzione della correlazione incrociata (in percentuale). Linea continua (e): linea di tendenza che collega i punti dati. (M. González, et al. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 59 (2020) 102270 )

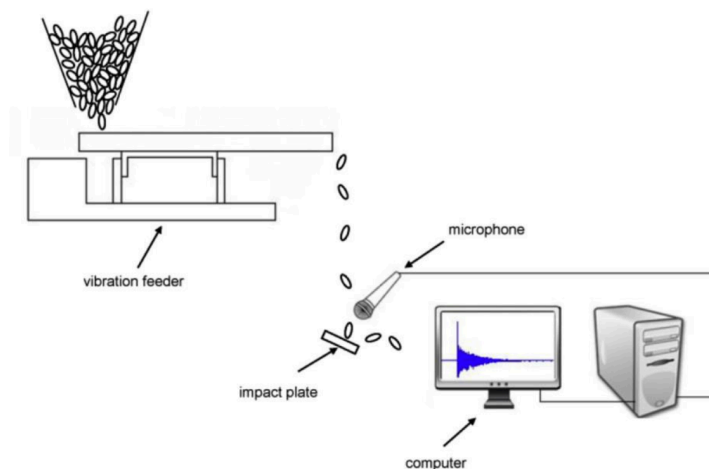
[9]

<sup>9</sup> Riferimento bibliografico: 12

#### ***4.5 Rilevamento di chicchi di grano danneggiati tramite analisi acustica***

L'esperimento è stato condotto da Min Guo e altri presso il Laboratorio Chiave di Tecnologia Didattica Moderna, Ministero dell'Istruzione, Scuola di Informatica, Shaanxi, Cina. Il test si è concentrato sull'utilizzo di segnali acustici di impatto per rilevare chicchi di grano danneggiati, impiegando una combinazione di modellazione gaussiana e un algoritmo migliorato della macchina ad apprendimento estremo per ottenere risultati precisi e affidabili.

Per condurre l'esperimento, è stato impiegato grano duro della varietà zhengmai 7698. I segnali acustici dell'impatto sono stati raccolti utilizzando un vettore medio, mentre un alimentatore vibrante è stato impiegato per incanalare la massa dei chicchi di grano. I segnali acustici sono stati registrati a una frequenza di campionamento di 48.000 Hz, garantendo una rappresentazione dettagliata e accurata del fenomeno acustico. Inoltre, è stata utilizzata una matrice di covarianza multidimensionale per l'analisi dei segnali acustici, consentendo una valutazione approfondita delle caratteristiche acustiche dei chicchi di grano (Figura 44).



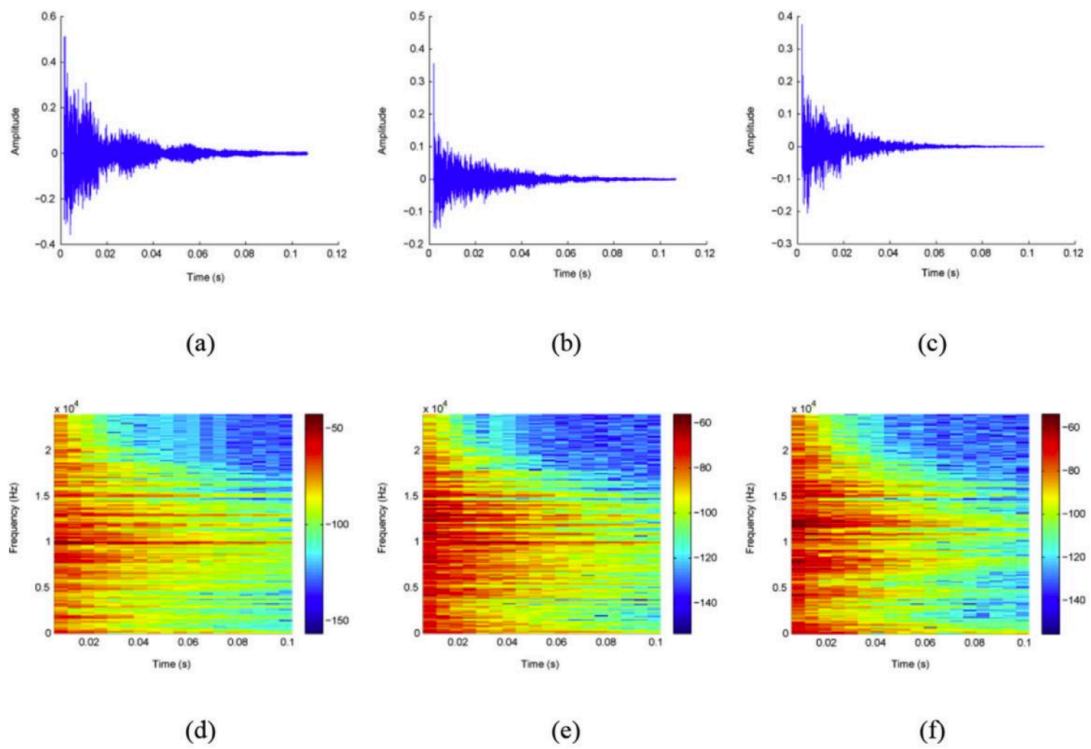
**Fig. 44.** Lo schema dell'apparato sperimentale. (Guo, M., Ma, Y., Yang, X., & Mankin, R. W. (2019) Detection of damaged wheat kernels using an impact acoustic signal processing technique based on Gaussian modelling and an improved extreme learning machine algorithm)

L'elaborazione dei singoli chicchi di grano richiedeva circa 30 ms, con una velocità di throughput di circa 33 chicchi al secondo. Questo metodo è stato addestrato e valutato in diverse condizioni, come temperature variabili, dimensioni differenti dei chicchi di grano e diversi livelli di maturità. L'esperimento ha impiegato una rete neurale di retropropagazione

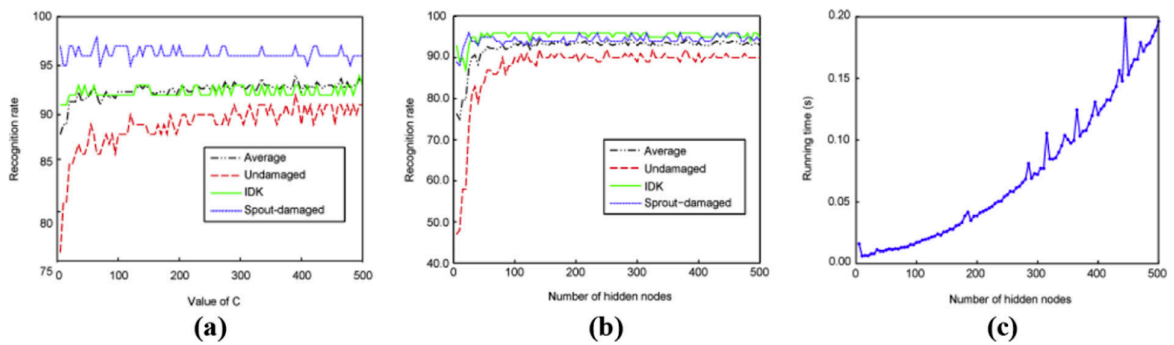
della BP per la classificazione dei chicchi di grano danneggiati in tre categorie: UDK, IDK e SDK (Figura 45). La modellazione gaussiana è stata utilizzata per l'analisi dei segnali acustici, consentendo una rappresentazione dettagliata delle caratteristiche acustiche dei chicchi di grano danneggiati. Inoltre, l'algoritmo migliorato della macchina ad apprendimento estremo è stato impiegato per ottenere risultati precisi e stabili, contribuendo a migliorare la precisione e l'affidabilità della classificazione.

La metodologia si articola in quattro fasi:

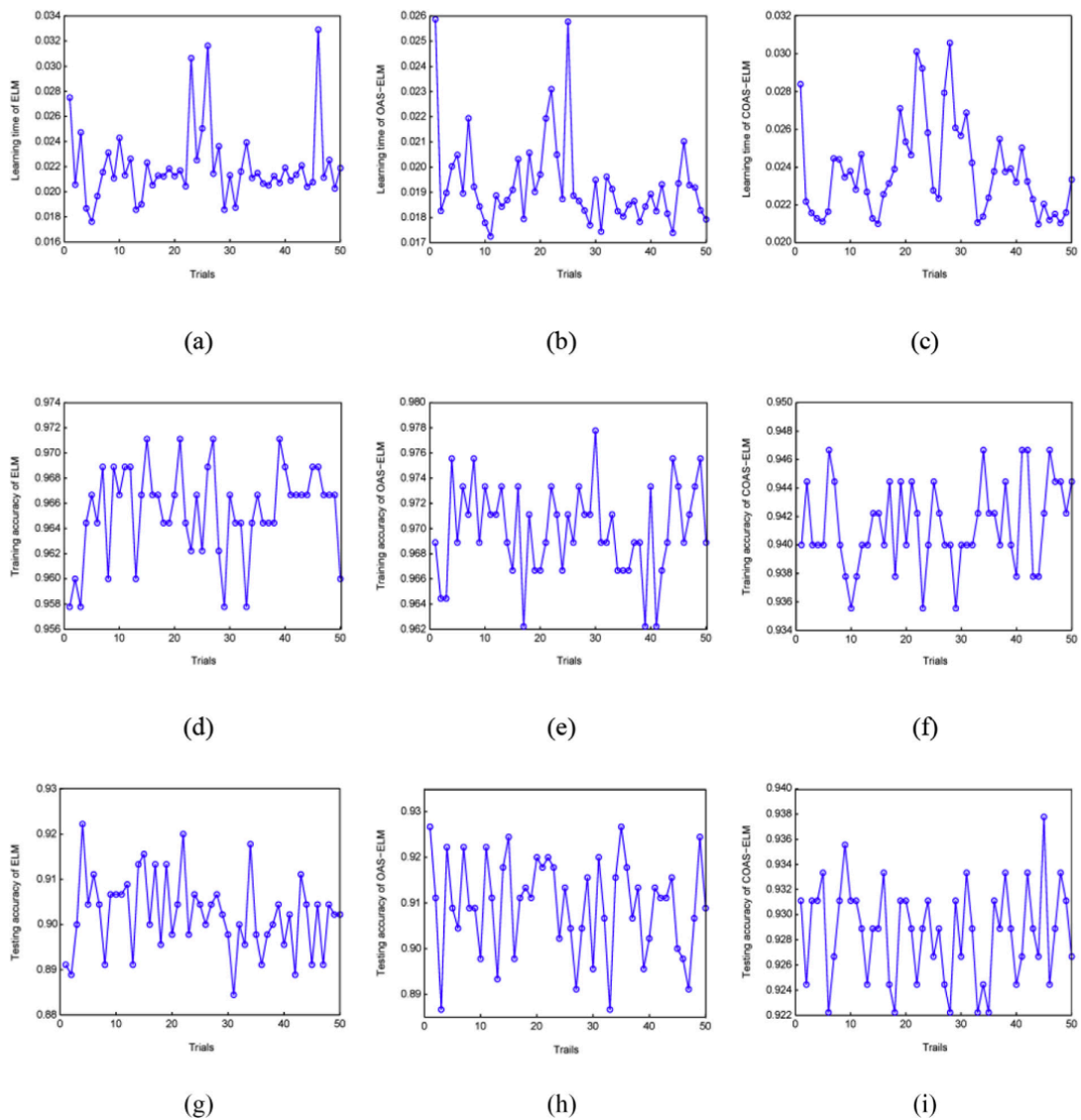
- Estrazione delle caratteristiche dei segnali acustici (Figura 47): questa fase consiste nell'utilizzo di un modello gaussiano per rappresentare in modo dettagliato le proprietà acustiche dei chicchi di grano danneggiati.
- Analisi tempo-frequenza: questa fase consiste nell'utilizzo della trasformata di Fourier a breve termine (STFT) per analizzare le variazioni delle caratteristiche acustiche nel tempo e nella frequenza.
- Analisi della modellazione gaussiana: questa fase consiste nell'analisi della capacità della modellazione gaussiana di catturare le proprietà stocastiche dei segnali acustici.
- Classificazione dei chicchi di grano danneggiati (Figura 46): questa fase consiste nell'utilizzo di un algoritmo migliorato della macchina ad apprendimento estremo (ELM), noto come COAS-ELM, per classificare i chicchi di grano danneggiati.



**Fig. 45.** Segnali acustici di impatto tipici da (a) UDK, (b) IDK e (c) SDK, nonché le corrispondenti rappresentazioni tempo-frequenza da (d) UDK, (e) IDK (e) e (f) SDK. (Guo, M., Ma, Y., Yang, X., & Mankin, R. W. (2019) Detection of damaged wheat kernels using an impact acoustic signal processing technique based on Gaussian modelling and an improved extreme learning machine algorithm)



**Fig. 46.** Selezione parametri COAS-ELM. (Guo, M., Ma, Y., Yang, X., & Mankin, R. W. (2019) Detection of damaged wheat kernels using an impact acoustic signal processing technique based on Gaussian modelling and an improved extreme learning machine algorithm)



**Fig. 47.** Confronti delle prestazioni tra ELM, OAS-ELM e CLAS-ELM per diverse prove di 900 kernel. (Guo, M., Ma, Y., Yang, X., & Mankin, R. W. (2019) Detection of damaged wheat kernels using an impact acoustic signal processing technique based on Gaussian modelling and an improved extreme learning machine algorithm)

| Damage category | Classification outcomes (%) |      |          |
|-----------------|-----------------------------|------|----------|
|                 | Undamaged                   | IDK  | Sprouted |
| Undamaged       | 92.0                        | 6.0  | 2.0      |
| IDK             | 1.0                         | 96.0 | 3.0      |
| Sprouted        | 5.0                         | 0.0  | 95.0     |

**Tab. 5.** Risultati della classificazione per tre tipi di chicchi di grano utilizzando il metodo proposto. (Guo, M., Ma, Y., Yang, X., & Mankin, R. W. (2019) Detection of damaged wheat kernels using an impact acoustic signal processing technique based on Gaussian modelling and an improved extreme learning machine algorithm)

Le conclusioni dell'esperimento evidenziano l'efficacia del metodo proposto per la rilevazione dei chicchi di grano danneggiati (Tabella 5). L'approccio basato su Gaussian Modelling (GM) e sull'algoritmo di apprendimento estremo migliorato ha dimostrato un'accuratezza significativa nel riconoscere i chicchi danneggiati da insetti e germogli. Inoltre, la velocità di elaborazione del sistema si è rivelata adeguata per un'applicazione pratica, consentendo il rilevamento in tempo reale dei chicchi danneggiati. Questi risultati indicano che il metodo proposto potrebbe essere implementato con successo in contesti operativi, offrendo un'alternativa efficiente e affidabile ai metodi convenzionali di ispezione e classificazione dei chicchi di grano. [10]

## ***5. APPLICAZIONI DELLE TEORIE ACUSTICHE PER LA DETERMINAZIONE DI PARAMETRI QUALITATIVI DELLE NOCI: UN'ESPERIENZA DEL LABORATORIO***

### ***5.1 Importanza dell'umidità nelle noci***

Le noci fresche hanno un contenuto di umidità compreso tra il 35 e il 45%. Questo livello di umidità è troppo alto per la conservazione a lungo termine, poiché favorisce la crescita di muffe e batteri. Per questo motivo, è necessario essiccare le noci per ridurre il loro contenuto di umidità a un livello compreso tra il 5 e il 10%.

Il processo di essiccamento delle noci viene effettuato in un essiccatoio. Gli essiccatoi possono essere di diversi tipi, ma il principio di funzionamento è sempre lo stesso. L'aria calda e secca viene fatta circolare all'interno dell'essiccatoio, portando via l'umidità dalle noci.

Il tempo di essiccamento delle noci dipende da diversi fattori, tra cui la temperatura dell'aria, la velocità di circolazione dell'aria e il contenuto di umidità iniziale delle noci. In generale, il tempo di essiccamento è compreso tra le 24 e le 72 ore.

---

<sup>10</sup> Riferimento bibliografico: 10

La gestione del contenuto di acqua delle noci è una fase delicata del processo di lavorazione. Un livello di umidità troppo alto può portare a una serie di problemi, tra cui:

- Deterioramento delle noci: le noci con un alto contenuto di umidità sono più suscettibili alla crescita di muffe e batteri.
- Perdita di peso: le noci con un alto contenuto di umidità perdono peso durante l'essiccazione.
- Perdita di qualità: le noci con un alto contenuto di umidità possono avere un sapore sgradevole o un aspetto poco gradevole.

Al contrario, un livello di umidità troppo basso può portare a una serie di problemi, tra cui:

- Disidratazione delle noci: le noci con un basso contenuto di umidità diventano dure e poco appetibili.
- Perdita di nutrienti: la disidratazione delle noci può portare alla perdita di alcuni nutrienti.

E' intuitivo che la perdita di guadagni dovuta a un livello di umidità non ottimale delle noci può essere significativa. In particolare, la perdita di peso durante l'essiccazione può comportare una riduzione del volume delle noci, che si traduce in una riduzione del prezzo di vendita. Inoltre, la perdita di qualità delle noci può rendere più difficile la commercializzazione del prodotto.

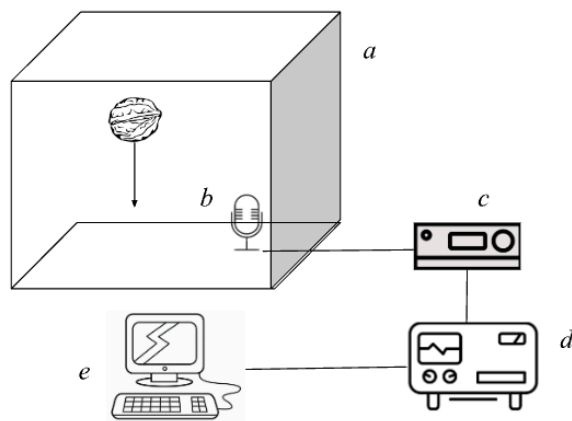
Dal punto di vista della sicurezza la crescita di muffe e batteri sulle noci può essere pericolosa per la salute. Le muffe possono produrre micotossine, che sono sostanze tossiche che possono provocare danni al sistema nervoso, al fegato e ai reni. I batteri, invece, possono causare infezioni alimentari.

Un livello di umidità ottimale garantisce la sicurezza alimentare delle noci e consente di ottenere un prodotto di alta qualità.

## 5.2 Metodi e strumenti utilizzati

L'esperimento ha lo scopo di dimostrare la potenzialità del principio acustico per determinare parametri qualitativi delle noci. Il test si è svolto seguendo lo schema descritto nel capitolo anteriormente e nell'articolo : “Guo, M., Ma, Y., Yang, X., & Mankin, R. W. (2019) Detection of damaged wheat kernels using an impact acoustic signal processing technique based on Gaussian modelling and an improved extreme learning machine algorithm”.

E' stata costruita una camera insonorizzata nella quale è stato posto un microfono per rilevare il segnale (Figura 1). Il microfono deve essere collegato all'amplificatore e all'oscilloscopio. L'amplificatore aumenta l'intensità del segnale acustico in modo che possa essere registrato dall'oscilloscopio che a sua volta consente di registrare il segnale acustico in forma digitale. All'interno di questo ambiente sono state fatte cadere da un'altezza standard le noci, una alla volta per poter registrare il suono. Il segnale è stato inviato ad un computer nel quale, successivamente sono stati analizzati i dati.



**Fig. 1.** Il diagramma schematico del sistema sperimentale. (a) camera insonorizzata; (b) microfono; (c) amplificatore; (d) oscilloscopio; (e) computer



### ***5.3 Ottenimento dei dati tramite PCA e analisi***

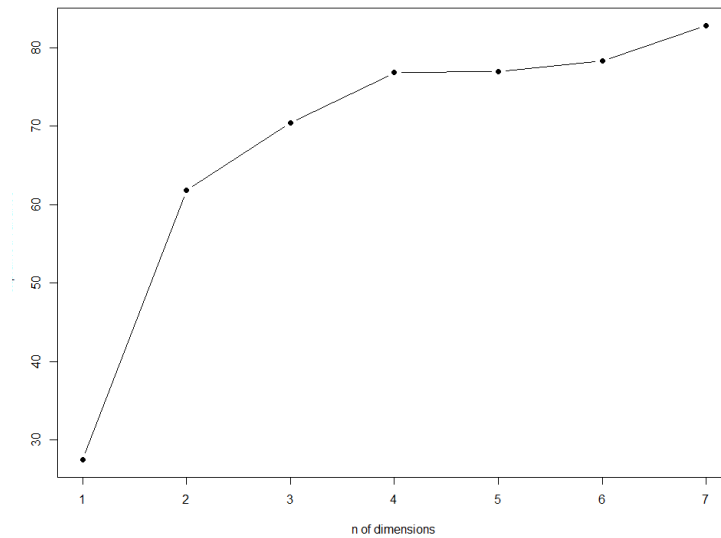
I dati sonori una volta ottenuti sono stati trascritti tramite PCA.

La PCA (Principal Component Analysis) è una tecnica di analisi multivariata che consente di ridurre la complessità di un insieme di dati, identificando le componenti principali che ne spiegano la maggior parte della varianza.

Il funzionamento della PCA può essere riassunto in questi passaggi:

1. Standardizzazione dei dati: i dati vengono trasformati in modo che abbiano media zero e varianza unitaria. Questo passaggio è importante per evitare che le variabili con valori più grandi abbiano un peso maggiore nella PCA.
2. Calcolo della matrice di covarianza: viene calcolata la matrice di covarianza dei dati standardizzati. Questa matrice descrive la relazione tra le diverse variabili e fornisce informazioni sulla loro varianza e covarianza.
3. Calcolo degli autovalori e degli autovettori: gli autovalori e gli autovettori della matrice di covarianza vengono calcolati. Gli autovettori rappresentano le direzioni principali della varianza dei dati, mentre gli autovalori rappresentano la quantità di varianza spiegata da ciascun autovettore.
4. Selezione delle componenti principali: le componenti principali vengono selezionate in base alla quantità di varianza spiegata. In genere, si selezionano le prime  $k$  componenti principali che spiegano la maggior parte della varianza totale.
5. Trasformazione dei dati: i dati vengono trasformati in modo da proiettarli sulle componenti principali selezionate. In questo modo, i dati vengono rappresentati in un nuovo sistema di coordinate che permette di visualizzare le relazioni tra le variabili in modo più semplice.

Nel grafico di seguito (Figura 2) vengono mostrate le 4 componenti principali da noi scelte:



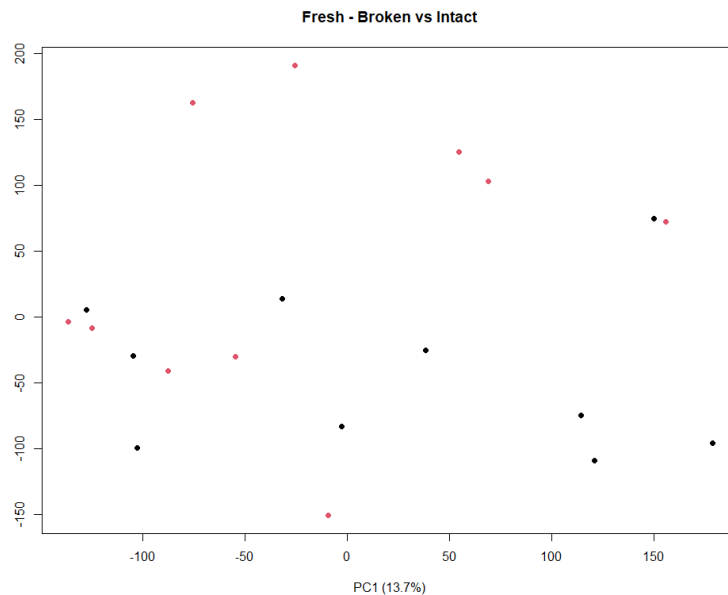
**Fig. 2.** Grafico delle componenti principali. Viene mostrato come da 4 componenti e successive non ci sono notevoli differenze

Il suono delle noci è stato inizialmente trascritto nel suo spettrogramma, dal quale siamo riusciti a prelevare i dati delle frequenze e delle intensità; utilizzando successivamente la tecnica della PCA è stato possibile inserire i dati nei grafici per osservare la relazione presente tra suono e condizioni delle noci.

Inizialmente l'analisi si è concentrata sulla condizione fisica delle noci per determinare la freschezza e la secchezza con successive differenze tra i campioni con difetti di rottura e quelli intatti.



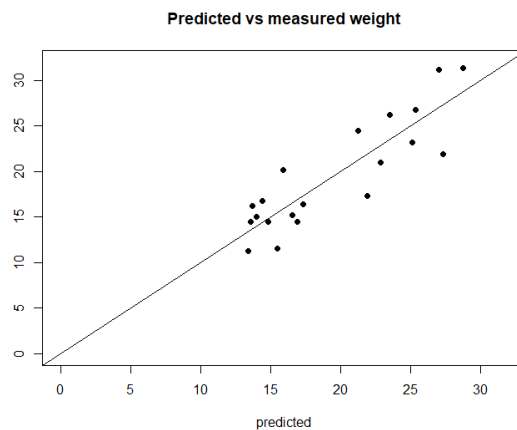
Il grafico ottenuto nell'analisi delle discrepanze tra noci fresche rotte e intatte (Figura 5), ha riportato invece dati non omogenei, confusionari. Si nota come la distribuzione non sia uniforme.



**Fig. 5.** differenze tra noci fresche rotte e noci fresche intatte.

Successivamente si è posta l'attenzione sulla determinazione del peso delle noci. Inizialmente si è fatta una previsione sul peso per poi confrontarla con i dati ottenuti attraverso l'elaborazione del suono attraverso PCA (Figura 6).

Si nota come la risposta sia molto buona e il margine di differenza tra dati previsti e dati ottenuti sia molto basso.



**Fig. 6.** Peso previsto e peso misurato con tecnica acustica.

#### ***5.4 Risultati e Conclusioni***

I risultati dell'esperimento condotto dimostrano che l'analisi acustica può essere utilizzata come un metodo efficace per determinare i parametri qualitativi delle noci. In particolare, l'analisi delle componenti principali (PCA) ha permesso di identificare e spiegare la maggior parte della varianza dei dati acustici delle noci. Inoltre, l'analisi ha permesso di distinguere tra noci secche e noci fresche in base al suono emesso durante l'impatto col suolo all'interno della camera insonorizzata. Tuttavia, l'analisi delle discrepanze tra noci fresche rotte e noci fresche intatte ha riportato dati non omogenei e confusionari. Infine, l'analisi acustica ha permesso di prevedere con precisione il peso delle noci, dimostrando l'efficacia di questo metodo per la determinazione dei parametri qualitativi ad esse associati.

In conclusione, l'analisi acustica può essere utilizzata come un metodo efficace per la determinazione dei parametri qualitativi delle noci, ma ulteriori studi sono necessari per migliorare la precisione dell'analisi delle noci fresche rotte e intatte. [11]

---

<sup>11</sup> Riferimento bibliografico: 7, 20

## ***6. CONCLUSIONI***

L'analisi acustica si è rivelata un metodo estremamente promettente e versatile per la determinazione dei parametri qualitativi degli alimenti. Attraverso l'impiego di strumenti e tecniche acustiche, è possibile ottenere quindi informazioni dettagliate sulla struttura, la consistenza e le proprietà fisiche di una vasta gamma di prodotti alimentari, consentendo un controllo di qualità accurato e non distruttivo. La capacità dell'analisi acustica di monitorare la formazione degli occhi durante la maturazione del formaggio Emmental, valutare la croccantezza di diverse cultivar di mele, distinguere tra noci secche e fresche, insieme alla precisione nella previsione del peso delle noci, sottolinea la sua efficacia e affidabilità. Inoltre, l'impiego della tecnica di risposta impulsiva acustica offre prospettive innovative per il monitoraggio continuo e in tempo reale della qualità dei prodotti agricoli, come nel caso dei pomodori durante la conservazione. Questi risultati non solo evidenziano il potenziale dell'analisi acustica come strumento avanzato per valutare la qualità degli alimenti, ma anche aprono nuove opportunità per lo sviluppo di metodologie di analisi e controllo sempre più sofisticate e precise nell'ambito alimentare e tecnologico.

In definitiva, l'analisi acustica rappresenta un passo significativo verso l'integrazione di tecniche avanzate nel settore alimentare, offrendo nuove prospettive per l'innovazione e lo sviluppo di nuove metodologie di analisi e controllo di qualità, aprendo così la strada a un futuro di novità e progresso nel campo alimentare e tecnologico.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

1. Allard J.F., "Propagation of Sound in Porous Media", Elsevier, Applied Science, London and New York 1993.
2. Amaldi, *L'Amaldi 2.0*, Zanichelli Bologna 2010. Cap 16.
3. Attar, M. Z., & Fathi, M. M. (2014). Non-destructive acoustical resonance method for evaluating eggshell strength and thickness. *International Journal of Biophysics*, 4(1), 9-15
4. Cappelli, Patrizia, e Vanna Vannucchi. *Principi di chimica degli alimenti: conservazione, trasformazioni, normativa*. Zanichelli, 2016.
5. Crawford , Frank S. *La fisica di Berkeley* . 1965. Zanichelli Bologna, 1972. pg 161-261.
6. D.Scannicchio, E. Giroletti. *Elementi di fisica biomedica*. EdISES UNIVERSITA', 2020. pg 158-159.
7. Farabegoli. B. 2016, *Analisi delle Componenti Principali: Algoritmi e Applicazioni*. Relatore Simoncini. V. Dipartimento di scienze matematiche, fisiche e naturali, facoltà di matematica, Università di Bologna.
8. Frova, Andrea. *Fisica nella musica*. Zanichelli, 1999. pg 3-295.
9. G.A. Farris, M. Gobbetti, E. Neviani, M. Vincenzini, *Microbiologia dei prodotti alimentari*. Milano: Casa Editrice Ambrosiana, 2012 pg 337-345
10. Guo, M., Ma, Y., Yang, X., & Mankin, R. W. (2019). Detection of damaged wheat kernels using an impact acoustic signal processing technique based on Gaussian

- modelling and an improved extreme learning machine algorithm. *Biosystems Engineering*, 184, 37-44
11. Lu, Q., Zhang, B., Zhang, J., Li, X., & Chen, K. (2008). Evaluation of tomato quality during storage by acoustic impulse response. *Journal of Food Engineering*, 86(3), 357-372.
  12. M. González, et al. "Innovative Food Science and Emerging Technologies 59 (2020) 102270
  13. Piazza, L., & Giovenzana, V. (2015). Misure strumentali acustico-meccaniche della croccantezza delle mele. *Food Research International*, 69, 369-376
  14. Pompoli F., Bonfiglio P., "Tecniche avanzate di caratterizzazione fisico-acustica di materiali porosi". Atti del 35° Convegno AIA - Milano 2008.
  15. Sakurai, N., Segnini, S., Dejmek, P., Oste, R., Taniwaki, M., Hanada, T., ... Ishida, N. (2010). Texture measurement of potato chips using a novel analysis technique for acoustic vibration measurements. *Food Research International*
  16. Sakurai, N., Taniwaki, M., & Yakushiji, H. (2009). Valutazione della qualità post-raccolta dei cachi "Fuyu" e "Taishuu" utilizzando un metodo vibrazionale non distruttivo e una tecnica di vibrazione acustica. *Biologia e tecnologia post-raccolta*
  17. Sun, Y., Zhang, Y., Li, Y., & Zhang, Y. (2020). Acoustic resonance analysis for eggshell crack detection based on multiscale correlation analysis. *Journal of Food Process Engineering*
  18. Termolan. *Nozioni di acustica*. Dispense universitarie UniMi, corso "informatica musicale".
  19. Tonzig, Giovanni. *Fondamenti di meccanica classica*. Terza, Maggiori editore, 2011. pg 179-204.



20. Wang, P., Zhong, L., Yang, H., Zhang, J., Hou, X., Wu, C., Zhang, R., & Cheng, Y. (2022). Postharvest drying of walnuts: Effect of drying methods on walnut quality. by UHPLC-Q-Exactive Orbitrap/MS. *Food Chemistry*, 386, Article 132706
21. Zhang, W., Lv, Z., Shi, B., Xu, Z., & Zhang, L. (2021). Valutazione dei cambiamenti di qualità e dell'indice di elasticità del kiwi durante la conservabilità mediante un metodo di vibrazione acustica non distruttiva [Evaluation of quality changes and elasticity index of kiwifruit during storage by non-destructive acoustic vibration method]. *Biologia e tecnologia post-raccolta*, 173, 111398.