UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MESSINA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE VETERINARIE

Corso di Dottorato in Scienze Veterinarie XXXVIII Ciclo

Curriculum: Sanità Pubblica Veterinaria e Sicurezza Alimentare

Coordinatore: Chiar.ma Prof.ssa Cristina Cravana

Valorizzazione dei sottoprodotti della filiera dell'avocado siciliano (*Persea americana* Mill.) per applicazioni innovative nel settore alimentare

Tesi di Dottorato di:

Dott.ssa Martina Buda

Martina Buda

Tutor: Chiar.mo Prof. Fabrizio Cincotta

Co-Tutor: Dott.ssa Maria Merlino

Maria Merlino

Settore Scientifico Disciplinare: AGRI-07/A

Anno Accademico 2025/2026

Percorso dottorale sviluppato con il sostegno finanziario di NextGenerationEU, Missione 4, Componente 2, Investimento 4.1
CUP J44D22000900002 - Borsa MUR - DM 351/2022 - Codice: DOT1314842

Finanziato dall'Unione europea NextGenerationEU | Ministero dell'Università e della Ricerca | Italiadomani PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA

*Alle mie figlie **Camilla** e **Ludovica** fonte inesauribile di amore, forza ed ispirazione. Con la vostra presenza illuminate la mia vita e mi ricordate ogni giorno il valore della perseveranza e dell'amore. Che possiate sempre camminare a testa alta, con la certezza che nulla è impossibile. Siete la cosa più bella che potessi desiderare dalla vita, le vostre nascite sono state il momento in cui il mio cuore ha scoperto l'amore incondizionato.*

*A mio fratello **Dodo**, metà del mio cuore e della mia anima. Nonostante tu sia più piccolo, negli ultimi anni ti sei preso cura di me: mi hai accolta, capita, ascoltata, coccolata e sostenuta, proprio come avrei dovuto fare io con te. Sei stato, e continui a essere, il mio punto di riferimento: un fratello maggiore e soprattutto un padre. Mi hai insegnato a guardare la realtà negli occhi e a comprendere che ci sono cose che non possiamo cambiare, ma che dobbiamo imparare ad accettare, anche contro il nostro volere.*

INDICE

Abstract ..... **pag. 5**
Introduzione ..... **pag. 6**
Capitolo 1 – L'avocado: inquadramento botanico, agronomico e nutrizionale ..... **pag. 9**
1.1 Origine e diffusione ..... pag. 11
1.2 Classificazione botanica e cultivar ..... pag. 12
1.2.1 L'ecotipo messicano ..... pag. 13
1.2.2 L'ecotipo guatemalteco ..... pag. 13
1.2.3 L'ecotipo dell'India occidentale ..... pag. 14
1.3 Coltivazione in Italia e in Sicilia ..... pag. 16
1.4 Composizione chimico-nutrizionale ..... pag. 19
1.4.1 Lipidi ..... pag. 20
1.4.2 Carboidrati e fibra alimentare ..... pag. 21
1.4.3 Proteine ..... pag. 22
1.4.4 Vitamine e sali minerali ..... pag. 23
1.5 Proprietà bioattive e salutistiche ..... pag. 24
Capitolo 2 – La filiera dell'avocado, gli scarti e le prospettive di valorizzazione ..... **pag. 26**
2.1 La filiera produttiva ..... pag. 26
2.2 Raccolta, post-raccolta e conservazione ..... pag. 29
2.3 Prodotti derivati ..... pag. 31
2.4 Tipologie di scarti ..... pag. 33
2.5 Impatto ambientale ..... pag. 36
2.6 Economia circolare e strategie di recupero ..... pag. 37
Capitolo 3 - Caratterizzazione dei principali scarti dell'avocado ..... **pag. 40**
3.1 Seme ..... pag. 40
3.1.1 Composizione ..... pag. 41
3.1.2 Proprietà biologiche ..... pag. 42
3.1.3 Possibili applicazioni ..... pag. 43
3.1.4 Aspetti sensoriali e limiti di impiego ..... pag. 44
3.2 Buccia ..... pag. 45
3.2.1 Composizione ..... pag. 45
3.2.2 Proprietà biologiche ..... pag. 46
3.2.3 Possibili applicazioni ..... pag. 47
3.2.4 Aspetti sensoriali e limiti di impiego ..... pag. 47
3.3 Foglie ..... pag. 48
3.3.1 Composizione ..... pag. 48
3.3.2 Proprietà biologiche ..... pag. 49
3.3.3 Possibili applicazioni ..... pag. 50
3.3.4 Aspetti sensoriali e limiti di impiego ..... pag. 52
Capitolo 4 – Effetti dell'essiccamento sull'aroma e sulle proprietà sensoriali della farina di semi di avocado come aromatizzante alimentare ..... **pag. 53**
4.1 Materiali e metodi ..... pag. 54
4.1.1 Campionamento ..... pag. 54
4.1.2 Processi di essiccazione ..... pag. 55
4.1.3 Modellazione matematica delle curve di essiccazione ..... pag. 56
4.1.4 Produzione di farina ..... pag. 56
4.1.5 Contenuto di umidità ..... pag. 57
4.1.6 Analisi del colore ..... pag. 57
4.1.7 Analisi sensoriale QDA ..... pag. 57

4.1.8 Test di accettabilità dei consumatori ..... pag. 58
4.1.9 Profilo volatile ..... pag. 58
4.1.10 Analisi statistica ..... pag. 59
4.2 Risultati e discussione ..... pag. 59
4.2.1 Processi di essiccazione ..... pag. 59
4.2.2 Proprietà fisiche ..... pag. 61
4.2.3 Analisi sensoriale ..... pag. 62
4.2.4 Accettabilità da parte dei consumatori ..... pag. 63
4.2.5 Profilo volatile ..... pag. 64
4.3. Conclusioni ..... pag. 77
Capitolo 5 - Gestione dei residui fogliari di avocado: tecnologia di essiccazione e qualità di infusi ottenuti da foglie di diverse varietà coltivate in Sicilia ..... pag. 78
5.1 Materiali e metodi ..... pag. 79
5.1.1 Campionamento ..... pag. 79
5.1.2 Processo di essiccamento ..... pag. 80
5.1.3 Contenuto di umidità ..... pag. 80
5.1.4 Preparazione degli infusi di foglie di avocado ..... pag. 80
5.1.5 Misura del pH ..... pag. 80
5.1.6 Contenuto fenolico totale e capacità antiossidante ..... pag. 81
5.1.7 Analisi dei composti volatili ..... pag. 81
5.1.8 Analisi qualitativa descrittiva ..... pag. 81
5.1.9 Test di accettabilità dei consumatori ..... pag. 82
5.1.10 Analisi statistica ..... pag. 82
5.2 Risultati e discussione ..... pag. 82
5.2.1 Parametri chimico-fisici e attività antiossidante ..... pag. 82
5.2.2 Composti volatili ..... pag. 83
5.2.3 Analisi sensoriale e accettabilità dei consumatori ..... pag. 90
5.3 Conclusioni ..... pag. 95
Capitolo 6 - Conclusioni generali ..... pag. 96
Bibliografia ..... pag. 98

Abstract

Negli ultimi anni, la crescente diffusione dell'avocado (*Persea americana* Mill.) nel contesto mediterraneo, e in particolare in Sicilia, ha determinato una trasformazione significativa della filiera agroalimentare locale, favorita dall'elevato valore nutrizionale e nutraceutico del frutto e dalle condizioni pedoclimatiche favorevoli. Parallelamente, l'espansione della produzione ha evidenziato la problematica della gestione dei sottoprodotti generati lungo le diverse fasi della filiera, tra cui semi, bucce e residui fogliari, tradizionalmente considerati scarti ma in realtà ricchi di composti bioattivi, fibre e molecole aromatiche di potenziale interesse applicativo.

La presente tesi di dottorato si inserisce in questo contesto con l'obiettivo di valutare il potenziale di valorizzazione dei sottoprodotti dell'avocado siciliano in ambito alimentare, attraverso un approccio integrato che combina caratterizzazione chimica, analisi sensoriale e studio dell'accettabilità da parte dei consumatori. In particolare, l'attenzione è stata focalizzata su semi e foglie provenienti da diverse cultivar coltivate in Sicilia, con l'intento di individuare strategie innovative di recupero coerenti con i principi dell'economia circolare.

Dal punto di vista metodologico, sono state condotte analisi chimico-fisiche finalizzate alla determinazione del contenuto di composti fenolici e dell'attività antiossidante, affiancate da studi di volatilomica mediante tecniche cromatografiche e da valutazioni sensoriali attraverso Analisi Descrittiva Quantitativa (QDA) e test edonici su consumatori. Particolare attenzione è stata dedicata agli effetti dei processi di essiccazione sulle proprietà delle matrici studiate.

I risultati hanno evidenziato che i sottoprodotti dell'avocado rappresentano matrici di elevato interesse funzionale. Le foglie hanno mostrato un'elevata attività antiossidante e un profilo aromatico variabile in funzione della cultivar, con la cultivar Fuerte caratterizzata da note fresche e di anice e la Bacon da sentori più erbacei e speziati, entrambe ben accettate dai consumatori. Il seme, ricco di composti fenolici e fibra, si è dimostrato particolarmente adatto alla produzione di farine con potenziale impiego come ingredienti funzionali e aromatizzanti naturali. In particolare, specifiche condizioni di essiccazione (microonde e aria calda a parametri intermedi) hanno favorito lo sviluppo di profili aromatici più gradevoli, associati a note fruttate, dolci e agrumate e a una maggiore accettabilità sensoriale.

Complessivamente, i risultati confermano il valore dei sottoprodotti dell'avocado come risorse sostenibili per lo sviluppo di nuovi ingredienti e prodotti alimentari. La loro valorizzazione consente di ridurre gli sprechi, migliorare l'efficienza della filiera e contribuire alla transizione verso modelli di economia circolare.

Introduzione

Negli ultimi decenni il sistema agroalimentare è stato interessato da una crescente attenzione verso la sostenibilità dei processi produttivi, la riduzione degli sprechi e la valorizzazione dei sottoprodotti derivanti dalle attività agricole e agroindustriali. La progressiva affermazione di questi temi ha favorito l'elaborazione di modelli produttivi fondati sui principi dell'economia circolare, secondo i quali i residui di lavorazione non devono più essere interpretati esclusivamente come rifiuti, bensì come risorse potenzialmente reinseribili in nuovi cicli di utilizzo. In questa prospettiva, il recupero delle biomasse residuali assume un ruolo centrale nel miglioramento dell'efficienza delle filiere, nella riduzione dell'impatto ambientale e nella creazione di nuove opportunità di innovazione.

In tale quadro si colloca la filiera dell'avocado (*Persea americana* Mill.), specie tropicale e subtropicale che ha conosciuto negli ultimi anni una notevole espansione a livello internazionale. Il crescente successo di questo frutto è strettamente legato all'apprezzamento dei consumatori per le sue qualità organolettiche, per la versatilità d'uso in ambito culinario e per il favorevole profilo nutrizionale, caratterizzato dalla presenza di lipidi prevalentemente monoinsaturi, fibra alimentare, vitamine, sali minerali e composti bioattivi. L'interesse verso l'avocado ha così sostenuto non soltanto l'aumento del consumo di prodotto fresco, ma anche la diffusione di numerosi derivati trasformati, tra cui puree, salse, guacamole, oli e ingredienti a potenziale funzionale.

Anche nel contesto italiano la coltivazione dell'avocado ha assunto una crescente importanza, con particolare concentrazione nelle regioni meridionali e soprattutto in Sicilia. In quest'ultima, le condizioni climatiche favorevoli e la crescente attenzione verso colture innovative ad alto valore commerciale hanno stimolato lo sviluppo di un comparto produttivo in progressiva espansione. La Sicilia rappresenta oggi un'area di particolare interesse, non solo per le prospettive di ampliamento della coltura, ma anche per la possibilità di costruire una filiera qualificata, integrata e orientata alla sostenibilità.

L'incremento della produzione e delle attività di trasformazione comporta però, inevitabilmente, la formazione di quantità consistenti di scarti. Nella filiera dell'avocado tali residui sono costituiti principalmente da buccia, seme, polpa residua e materiali vegetali derivanti dalle pratiche colturali. Per lungo tempo queste matrici sono state considerate prive di rilevanza economica e destinate prevalentemente allo smaltimento. Più recentemente, tuttavia, numerosi studi hanno evidenziato come esse possano contenere sostanze di notevole interesse, tra cui composti fenolici, flavonoidi, fibre, pigmenti naturali e altri metaboliti secondari dotati di attività biologica e potenziale valore funzionale.

La presenza di tali componenti rende possibile ipotizzare applicazioni concrete in differenti ambiti produttivi. In particolare, i sottoprodotti dell'avocado possono rappresentare una risorsa per

l'industria alimentare, per la formulazione di ingredienti funzionali, per il settore nutraceutico e cosmetico e, più in generale, per tutti i contesti in cui il recupero di biomasse residuali possa tradursi in un vantaggio economico, tecnologico e ambientale. In questo senso, il concetto di scarto si ridefinisce alla luce di una visione più ampia, nella quale il valore della materia non si esaurisce con la funzione originaria del prodotto principale.

Accanto alla composizione chimica, anche le caratteristiche sensoriali di queste matrici residuali rivestono un ruolo di primaria importanza. Colore, aroma, gusto, astringenza e accettabilità possono infatti incidere in modo significativo sulla possibilità di impiego dei sottoprodotti come ingredienti o come fonti di composti naturali da destinare a nuove formulazioni. Allo stesso tempo, le proprietà funzionali, intese ad esempio come attività antiossidante, capacità antimicrobica o attitudine tecnologica, rappresentano ulteriori elementi di interesse per la ricerca e per le applicazioni industriali.

Alla luce di queste considerazioni, lo studio degli scarti della filiera dell'avocado assume una rilevanza che va oltre il semplice ambito del recupero dei residui, configurandosi come un tema interdisciplinare che coinvolge aspetti agronomici, chimici, nutrizionali, sensoriali e ambientali. In particolare, il contesto siciliano offre un caso di studio di grande interesse, poiché coniuga la crescita della coltivazione con la necessità di sviluppare modelli di valorizzazione coerenti con le esigenze di sostenibilità territoriale e innovazione agroalimentare.

Nonostante il crescente interesse scientifico verso i sottoprodotti dell'avocado, la letteratura presenta ancora alcune lacune rilevanti: gli studi disponibili si concentrano prevalentemente su matrici provenienti da aree di coltivazione extra-europee (Messico, Centro e Sud America, Africa), mentre mancano dati sistematici relativi a semi e foglie di cultivar coltivate in ambiente mediterraneo, e in particolare in Sicilia, dove condizioni pedoclimatiche, varietà impiegate e pratiche agronomiche possono determinare profili compositivi e sensoriali differenti. Inoltre, la maggior parte dei lavori esistenti si limita alla caratterizzazione chimica delle matrici residuali, senza affrontare in modo congiunto gli effetti dei processi di essiccazione sul profilo aromatico e sull'accettabilità da parte del consumatore, aspetto invece determinante per l'effettivo trasferimento di queste matrici a un utilizzo alimentare reale.

Sulla base di tali premesse, la presente tesi di dottorato si propone i seguenti obiettivi specifici:

1. caratterizzare la composizione chimica e il profilo volatile (HS-SPME-GC-MS) di semi e foglie di avocado provenienti da diverse cultivar coltivate in Sicilia, individuando le differenze attribuibili alla matrice e alla varietà;

2. valutare l'effetto di diverse tecnologie di essiccazione (aria calda, microonde) e dei relativi parametri di processo sulle proprietà fisiche, sul profilo aromatico e sulla qualità sensoriale dei prodotti derivati (farina di semi, infusi di foglie);
3. determinare il profilo sensoriale delle matrici ottenute mediante Analisi Descrittiva Quantitativa (QDA) condotta da panel addestrati, e correlarlo con i dati strumentali (composti volatili, contenuto fenolico, attività antiossidante) attraverso tecniche di statistica multivariata (PCA, HCA);
4. misurare l'accettabilità dei prodotti ottenuti presso un campione di consumatori, al fine di valutarne il potenziale reale di impiego come ingredienti funzionali o aromatizzanti naturali;
5. discutere, alla luce dei risultati ottenuti, le prospettive e i limiti di una filiera di recupero dei sottoprodotti dell'avocado siciliano coerente con i principi dell'economia circolare.

A questi obiettivi corrispondono i seguenti quesiti di ricerca, ai quali i capitoli sperimentali (Capitoli 4 e 5) intendono fornire risposta: i semi e le foglie di avocado coltivato in Sicilia possiedono un profilo chimico-aromatico tale da giustificarne l'impiego come ingredienti alimentari? In che misura le condizioni di essiccazione influenzano tale profilo e la sua accettabilità sensoriale? Esistono differenze significative tra cultivar tali da orientare la selezione varietale per la valorizzazione industriale di questi sottoprodotti?

Il Capitolo 4 affronta il primo e il secondo quesito con riferimento alla farina di semi, mentre il Capitolo 5 li affronta con riferimento agli infusi di foglie; il Capitolo 6 riprende in chiave critica il terzo quesito, sintetizzando le evidenze raccolte nei due studi sperimentali.
In questo modo, l'elaborato si propone di offrire un contributo scientifico al tema della valorizzazione dei sottoprodotti agroalimentari, evidenziando come anche matrici tradizionalmente escluse dai circuiti di utilizzo possano diventare oggetto di innovazione e di sviluppo.

Capitolo 1 – L'avocado: inquadramento botanico, agronomico e nutrizionale

L'avocado (*Persea americana* Mill.) è una specie arborea da frutto appartenente alla famiglia delle Lauraceae e al genere *Persea*. Negli ultimi anni questa coltura ha acquisito un'importanza crescente nel panorama agroalimentare mondiale, grazie al valore commerciale del frutto, alle sue caratteristiche nutrizionali e alla capacità di adattarsi a diversi ambienti di coltivazione, soprattutto nelle aree a clima mite.

Originario delle regioni tropicali e subtropicali dell'America, l'avocado si è progressivamente diffuso in numerosi Paesi del mondo. Oggi la sua coltivazione interessa non solo le aree tradizionalmente vocate, ma anche nuovi areali produttivi, tra cui alcune zone del bacino del Mediterraneo. Tale espansione è legata all'aumento della domanda da parte dei consumatori e alla necessità di diversificare le produzioni agricole.

Dal punto di vista botanico, l'avocado è una pianta sempreverde che può raggiungere un'altezza di circa 10-15 metri. Presenta uno sviluppo vegetativo vigoroso, una chioma ampia e foglie semplici, alterne e coriacee. I fiori sono piccoli, numerosi e riuniti in infiorescenze. Una caratteristica peculiare della specie è il particolare comportamento fiorale, che favorisce l'impollinazione incrociata e può influenzare in modo significativo la produttività.

Il frutto è una bacca contenente un unico seme centrale di grandi dimensioni. Le sue caratteristiche possono variare notevolmente in base alla cultivar: forma, colore della buccia, consistenza della polpa e composizione chimica non sono infatti uniformi. Questa variabilità rende l'avocado una specie di grande interesse sia per gli studi agronomici sia per quelli legati alla qualità del prodotto finale.

La coltivazione dell'avocado richiede condizioni pedoclimatiche adeguate. La specie predilige ambienti con temperature miti, buona disponibilità idrica e assenza di gelate prolungate. Tuttavia, è particolarmente sensibile ai ristagni d'acqua, motivo per cui la scelta del terreno e la gestione dell'irrigazione sono aspetti fondamentali. I suoli più adatti sono profondi, ben drenati e ben aerati, poiché l'apparato radicale risente facilmente di condizioni di asfissia e di eccessiva umidità.

Anche la nutrizione minerale, la gestione della chioma e le pratiche di potatura incidono sulla produttività e sulla qualità dei frutti. La potatura viene generalmente effettuata per controllare lo sviluppo vegetativo, migliorare la penetrazione della luce all'interno della chioma e facilitare le operazioni colturali, compresa la raccolta.

Dal punto di vista compositivo, l'avocado si distingue dalla maggior parte dei frutti freschi per il suo elevato contenuto lipidico. I lipidi presenti sono costituiti soprattutto da acidi grassi insaturi, caratteristica che contribuisce al valore energetico del frutto e, allo stesso tempo, ne aumenta l'interesse nutrizionale. Oltre ai grassi, l'avocado contiene fibre alimentari, vitamine, sali minerali e diversi composti bioattivi.



Figura 1.1. Pianta di avocado

Tra i principali micronutrienti si ricordano il potassio, alcune vitamine del gruppo B, la vitamina E e sostanze con potenziale attività antiossidante. La composizione del frutto può comunque cambiare in funzione della cultivar, del grado di maturazione e delle condizioni ambientali e colturali. Per queste ragioni, l'avocado è spesso considerato un alimento di interesse nell'ambito di una dieta equilibrata.
L'importanza dell'avocado non riguarda soltanto il consumo fresco del frutto, ma coinvolge l'intera filiera produttiva. L'aumento delle superfici coltivate e della produzione determina infatti anche una maggiore disponibilità di residui e sottoprodotti, derivanti sia dalle pratiche agronomiche sia dai processi di lavorazione. In questo contesto, la coltura si inserisce nelle attuali tematiche legate alla sostenibilità e all'economia circolare, orientate alla riduzione degli sprechi e alla valorizzazione delle biomasse secondarie.
Lo studio dell'avocado assume quindi un duplice valore. Da un lato, la specie rappresenta una coltura emergente di interesse agronomico ed economico; dall'altro, costituisce una possibile fonte di composti e materiali utilizzabili in ambito alimentare, nutraceutico e tecnologico. Per comprenderne pienamente le potenzialità è necessario adottare un approccio multidisciplinare, che integri conoscenze botaniche, agronomiche, chimiche e nutrizionali.

L’avocado rappresenta una specie di notevole interesse nel contesto agricolo e alimentare contemporaneo. Le sue caratteristiche botaniche, le specifiche esigenze colturali e il particolare profilo nutrizionale ne fanno una coltura meritevole di approfondimento, soprattutto in relazione alla sua diffusione in nuovi areali produttivi. La crescente attenzione verso questo frutto deriva dall’incontro tra domanda di mercato, qualità percepita dal consumatore e potenziale valore nutrizionale e funzionale.

1.1 Origine e diffusione

L’avocado (*Persea americana* Mill.) è una specie arborea da frutto originaria dell’America centrale e centro-meridionale, dove risulta coltivata e utilizzata da epoche molto remote. Le evidenze storiche e archeobotaniche collocano la sua domesticazione in un’area compresa tra il Messico meridionale e parte dell’America centrale, in un contesto agroecologico caratterizzato da ampia diversità genetica e da una lunga tradizione di selezione empirica da parte delle popolazioni locali. In tale area il frutto non era soltanto una risorsa alimentare, ma anche un elemento inserito in sistemi agricoli policolturali nei quali conviveva con altre specie di elevata importanza nutrizionale ed economica.

La diffusione dell’avocado al di fuori del continente americano è avvenuta in modo progressivo, inizialmente attraverso i circuiti coloniali e successivamente grazie all’espansione commerciale internazionale. Nel corso del tempo la specie è stata introdotta in numerose regioni a clima tropicale e subtropicale, dove ha trovato condizioni favorevoli per l’adattamento e lo sviluppo produttivo. La sua espansione globale è stata sostenuta da diversi fattori: la flessibilità ecologica della specie, la crescente domanda di frutti percepiti come salutari, l’interesse per il contenuto lipidico di elevata qualità nutrizionale e la possibilità di valorizzarlo sia nel mercato del fresco sia nella trasformazione industriale (Galindo-Trovar et al. 2007).

Negli ultimi decenni l’avocado è passato da coltura relativamente marginale a prodotto di grande rilevanza commerciale su scala mondiale. Tale trasformazione è stata favorita dall’evoluzione delle preferenze dei consumatori, sempre più orientati verso alimenti naturali, funzionali e associati a modelli dietetici equilibrati. A ciò si è aggiunta la forte capacità del frutto di adattarsi a molteplici modalità di consumo: fresco, in creme e salse, come ingrediente di piatti salati, nella ristorazione veloce di qualità e nell’industria dei prodotti ready-to-eat.

La crescente internazionalizzazione della filiera ha determinato un consolidamento delle aree leader nella produzione, soprattutto in paesi caratterizzati da ampie superfici coltivabili, adeguate condizioni climatiche e buona integrazione nei mercati di esportazione. Parallelamente, l’avocado ha suscitato interesse anche in nuovi areali mediterranei, compresa l’Italia meridionale, dove i cambiamenti

climatici, la diversificazione colturale e la ricerca di colture ad alto valore aggiunto hanno favorito la sperimentazione e l'espansione degli impianti.
La diffusione dell'avocado non va interpretata esclusivamente come un successo commerciale. Essa riflette anche una ridefinizione del ruolo delle colture frutticole nei sistemi alimentari contemporanei, nei quali qualità nutrizionale, immagine salutistica, sostenibilità e innovazione di filiera assumono un peso crescente. L'avocado si colloca precisamente all'intersezione di questi aspetti, costituendo un esempio emblematico di specie tradizionale divenuta protagonista della modernizzazione agroalimentare globale.

1.2 Classificazione botanica e cultivar

Dal punto di vista sistematico, l'avocado appartiene al regno Plantae, divisione Magnoliophyta, classe Magnoliopsida, ordine Laurales, famiglia Lauraceae, genere *Persea*, specie *Persea americana* Mill. La collocazione nella famiglia delle Lauraceae lo accomuna ad altre specie aromatiche e legnose, sebbene l'avocado si distingua nettamente per l'interesse frutticolo e per la peculiarità della sua composizione. Si tratta di una specie arborea sempreverde, caratterizzata da crescita vigorosa, apparato radicale relativamente superficiale, chioma espansa e spiccata sensibilità a ristagni idrici, salinità elevata e basse temperature.
Sotto il profilo morfologico, l'albero può raggiungere dimensioni notevoli, variabili in funzione della cultivar, del portinnesto, del sistema di allevamento e delle condizioni ambientali. Le foglie sono alterne, di consistenza coriacea, generalmente ellittiche o ovate. I fiori, piccoli e numerosi, sono riuniti in infiorescenze a pannocchia e presentano una biologia riproduttiva di particolare interesse. L'avocado manifesta, infatti, un comportamento definito dicogamia proterogina sincronizzata, in cui l'apertura funzionale femminile e quella maschile del fiore avvengono in momenti differenti. Su questa base le cultivar vengono tradizionalmente suddivise in gruppo A e gruppo B, distinzione di grande importanza agronomica per la pianificazione degli impianti e per il miglioramento dell'impollinazione (Alcaraz et al. 2024).
Un aspetto rilevante della specie è la sua ampia variabilità genetica, che ha portato a distinguere, in senso ecogeografico, tre principali razze orticole: messicana, guatemalteca e antillana. Tali gruppi presentano differenze in termini di adattamento climatico, morfologia del frutto, composizione della polpa, spessore della buccia, contenuto in olio e tolleranza a stress biotici e abiotici. La razza messicana è generalmente più tollerante al freddo e caratterizzata da frutti di dimensioni più contenute e buccia più sottile; la guatemalteca presenta frutti spesso più grandi, buccia più spessa e buona qualità commerciale; l'antillana risulta maggiormente adattata ad ambienti tropicali caldi e umidi.

La selezione naturale e artificiale, nel corso dei secoli, ha dato vita a tre varietà dalle caratteristiche differenti:

1.2.1 L'ecotipo messicano (*P. americana varietà. drymifolia*);

La varietà drymifolia comunemente chiamata avocado messicano o avocado "foglie secche" è originaria del Messico ed è la più antica tra gli avocado destinati al consumo umano. Questa specie di avocado è principalmente coltivata per scopi ornamentali o come portainnesto per altre varietà di avocado. Tuttavia, i frutti tendono ad avere una dimensione più piccola e una forma variabile. Le foglie sono piccole e secche, la polpa può variare dal verde al giallo a seconda della maturazione e la buccia è spessa e può essere verde e rugosa. Inoltre, il frutto di questa varietà può avere discrete caratteristiche sensoriali, anche se generalmente non è considerato di alta qualità per il consumo diretto. In particolare, il sapore è meno ricco e burroso e la polpa può essere cremosa ma non così liscia o ricca come le altre varietà. È importante notare che gli avocado messicani sono i più resistenti e crescono anche sopra i 2.000 metri di quota, avendo sviluppato un'ottima resistenza al freddo e alle malattie del terreno.



Figura 1.2. Varietà drymifolia

1.2.2 L'ecotipo guatemalteco (*P. americana varietà guatemalensis*)

La varietà guatemalensis, originaria degli altopiani del Centroamerica, ha caratteristiche distinte in relazione con la regione geografica in cui è coltivata. I frutti di questo ecotipo sono quelli a più alto valore e gradimento commerciale e tendono ad essere più grandi rispetto ad altre varietà. Sono caratterizzati da una buccia più sottile ma meno rugosa rispetto ad altre varietà come l'Hass. Questa caratteristica potrebbe rendere la buccia meno resistente a eventuali danni durante il trasporto o la

manipolazione. Il colore può essere verde, ma potrebbe avere anche sfumature violacee o rosse a seconda del grado di maturazione. La polpa è spesso più chiara rispetto ad altre varietà, con una consistenza cremosa. Rispetto agli altri ecotipi ha una maturazione molto più lenta, che ne permette la raccolta tardiva, dopo aver terminato le precedenti raccolte. Inoltre, le varietà guatemalteche sono più adatte a crescere in regioni con climi più freddi e altitudini comprese fra i 1.000 e i 2.000 metri. La stagionalità dei frutti può variare a seconda della specifica varietà guatemalteca, ognuna con le sue caratteristiche uniche. Alcuni esempi di varietà guatemalteche includono il Nabal, il Puebla, Gwen, Pinkerton e Reed. L'avocado Hass è una delle varietà più conosciute e coltivate su scala mondiale ed è un ibrido messicano-guatemalteco. La sua buccia è rugosa e scura quando è maturo, mentre la polpa è cremosa e ha un sapore ricco e burroso. In realtà, è originario della regione di La Habra Heights in California, ma il suo nome scientifico è *Persea americana* var. guatemalensis. Quindi, sebbene sia comunemente chiamato Hass, è una varietà guatemalteca.



Figura 1.3. Varietà guatemalensis

1.2.3 L'ecotipo dell'India occidentale (*P. americana varietà americana*).

La varietà americana ha carattere più tropicale ed è limitata negli Stati Uniti alla Florida meridionale, include una vasta gamma di varietà e può variare notevolmente nella forma e nelle dimensioni. Alcuni sono più piccoli e rotondi, mentre altri possono essere più grandi e allungati. La buccia è più sottile rispetto a varietà come l'Hass. Il colore può variare dal verde scuro al viola o al nero, a seconda della varietà e del grado di maturazione. La polpa è spesso di colore verde o giallo e ha una consistenza cremosa. Il sapore può variare leggermente tra le varietà, ma in generale è descritto come delicato e ricco e può avere sfumature leggere o più intense a seconda della maturazione. La stagionalità di

produzione può variare a seconda della varietà e della regione in cui vengono coltivati. Tuttavia, gli avocado americani sono molto versatili in cucina e vengono spesso utilizzati in guacamole, insalate, panini e in altre preparazioni culinarie. Alcune varietà di avocado possono essere coltivate in regioni più fredde, ma in genere sono adattate a climi subtropicali e tropicali in cui possono prosperare e produrre frutti in modo efficace. Alcune delle varietà americane di avocado includono: Criollo, Cocktail, Brazileño, Fuerte, Mexicola, Zutano, Hormiga, Bacon, Lorena.



Figura 1.4. Varietà americana

Le cultivar moderne derivano in larga misura da incroci e selezioni operate a partire da queste tre razze. Tra esse, la cultivar Hass ha assunto un ruolo dominante nel commercio internazionale, grazie a caratteristiche che la rendono particolarmente adatta alla filiera del fresco: pezzatura apprezzata, buccia spessa e resistente, elevata qualità organolettica, buona conservabilità e progressiva variazione cromatica della buccia durante la maturazione, utile come indicatore per il consumatore. Il successo della Hass ha favorito una forte standardizzazione varietale, soprattutto nei mercati orientati all'export.

Accanto alla Hass si collocano numerose altre cultivar, quali Fuerte, Bacon, Zutano, Reed, Pinkerton, Ettinger, Lamb Hass e altre varietà locali o di più recente introduzione. Fuerte, per esempio, ha avuto storicamente una notevole importanza e continua a essere apprezzata in alcuni mercati per le caratteristiche sensoriali del frutto. Bacon e Zutano vengono spesso utilizzate anche come impollinatrici in determinati contesti colturali, mentre Reed e Pinkerton si distinguono per aspetti produttivi e merceologici specifici.

La scelta varietale rappresenta un elemento strategico nella progettazione dell'impianto, poiché influenza resa, epoca di raccolta, comportamento post-raccolta, resistenza agli stress, qualità del frutto e destinazione commerciale. In ambito mediterraneo, la selezione delle cultivar deve inoltre tener conto della sensibilità al freddo, dell'adattabilità ai suoli locali e della compatibilità con i sistemi di irrigazione e gestione agronomica. La presenza di più cultivar nello stesso areale o nello stesso impianto può favorire la continuità dell'offerta.

La classificazione botanica dell'avocado non costituisce soltanto un dato tassonomico, ma il fondamento per comprendere le relazioni tra genetica, morfologia, fisiologia e comportamento agronomico. La conoscenza delle cultivar e della loro origine è infatti indispensabile per interpretare le differenze nella composizione chimica del frutto, nelle rese produttive e nelle prospettive di valorizzazione alimentare e industriale.

1.3 Coltivazione in Italia e in Sicilia

L'introduzione dell'avocado in Italia è legata alla figura del botanico Mario Calvino, padre dello scrittore Italo Calvino. Studioso attento alle specie esotiche e alle loro possibilità di adattamento, Calvino sperimentò diverse piante in grado di crescere nel clima mite della Riviera ligure, in particolare nell'area di Sanremo. Ancora oggi, nel territorio sanremese, sono presenti alcuni esemplari di avocado riconducibili a quelle prime esperienze di acclimatazione. Negli ultimi anni, inoltre, un numero crescente di agricoltori liguri ha iniziato a considerare questa coltura come una possibile alternativa produttiva.

L'avocado è una pianta longeva, di medie dimensioni, ma caratterizzata da una crescita piuttosto rapida. In condizioni ordinarie può raggiungere, nell'arco di pochi anni, altezze significative, mentre in ambienti particolarmente favorevoli può svilupparsi fino a 15-20 metri. Per questo motivo, nella progettazione degli impianti è importante prevedere distanze adeguate tra le piante, generalmente intorno ai 7 metri, in modo da consentire un corretto sviluppo della chioma, favorire l'arieggiamento e ridurre la necessità di interventi fitosanitari.

Dal punto di vista climatico, l'avocado richiede buona luminosità, temperature miti e un ambiente tendenzialmente caldo-umido. Le condizioni ottimali si collocano generalmente tra i 20 e i 25 °C. La specie tollera solo brevi periodi di freddo moderato, mentre risulta sensibile alle gelate e ai venti freddi invernali, che possono causare danni alla vegetazione e rallentare l'accrescimento. Per limitare questi effetti, negli impianti più esposti possono essere utilizzati frangivento naturali o artificiali. Per quanto riguarda il suolo, l'avocado mostra una certa adattabilità, ma predilige terreni ben drenati; sono invece meno indicati quelli eccessivamente argillosi, calcarei o salini.

La diffusione dell'avocado in Italia si inserisce nel più ampio processo di diversificazione delle colture frutticole, soprattutto nelle regioni meridionali e insulari. Per molto tempo questa specie è

rimasta marginale rispetto alle colture mediterranee tradizionali, ma negli ultimi anni l'interesse verso il suo impianto è aumentato in modo significativo. Ciò riguarda soprattutto le aree caratterizzate da clima mite, basso rischio di gelate e disponibilità di competenze tecniche e risorse irrigue adeguate.
Attualmente, la coltivazione dell'avocado in Italia è concentrata soprattutto nel Mezzogiorno, con un ruolo particolarmente rilevante della Sicilia e, in misura minore ma crescente, di alcune zone della Calabria. L'espansione della coltura è stata favorita da diversi fattori. Da un lato, l'aumento della domanda di avocado fresco sul mercato nazionale ed europeo ha reso più interessante la produzione locale, anche nell'ottica di ridurre il ricorso alle importazioni. Dall'altro, l'evoluzione delle condizioni climatiche in alcune aree mediterranee ha reso possibile la coltivazione di specie subtropicali che in passato erano considerate poco adatte al territorio italiano.
L'avocado viene inoltre percepito come una coltura ad alto valore aggiunto, capace di offrire nuove opportunità economiche in contesti agricoli in cui le produzioni tradizionali risentono della concorrenza internazionale o di crisi di mercato. Tuttavia, il successo della coltivazione dipende da un'attenta valutazione delle condizioni pedoclimatiche. La specie necessita infatti di temperature stabili, assenza di freddi intensi, buona esposizione alla luce e terreni ben aerati e drenati.
Uno degli aspetti più delicati riguarda la gestione dell'acqua. L'avocado è particolarmente sensibile ai ristagni idrici, che possono favorire problemi radicali e compromettere la crescita della pianta. Anche la salinità, il vento e gli sbalzi termici possono influire negativamente sulla produttività e sulla qualità dei frutti. In questo senso, alcune aree costiere e subcostiere della Sicilia orientale e tirrenica presentano condizioni favorevoli, grazie alla mitezza del clima e alla possibilità di integrare la coltura in sistemi irrigui già presenti.
La Sicilia rappresenta oggi uno dei principali contesti italiani per la sperimentazione e la coltivazione dell'avocado. La varietà dei microclimi, la consolidata tradizione frutticola e la presenza di aziende agricole innovative hanno favorito l'adattamento della specie in diverse zone dell'isola, in particolare lungo le fasce ionica e tirrenica. In questi territori l'avocado si inserisce in un processo di rinnovamento dell'agricoltura regionale, sempre più orientata verso colture tropicali e subtropicali capaci di rispondere alle nuove condizioni ambientali e alle richieste del mercato.
Lo sviluppo della filiera siciliana è stato favorito anche dalla presenza di imprese specializzate, realtà vivaistiche, consorzi e reti commerciali dedicate. Questi elementi hanno contribuito a migliorare le competenze tecniche disponibili e a rendere più strutturata la produzione. Dal punto di vista agronomico, tuttavia, la coltivazione richiede una gestione molto attenta, soprattutto per quanto riguarda l'irrigazione. La distribuzione irregolare delle piogge e la crescente pressione sulle risorse idriche rendono indispensabile l'adozione di sistemi efficienti, come la microirrigazione, associati al monitoraggio dell'umidità del suolo e dello stato idrico della pianta.

Anche la fertilizzazione deve essere programmata con attenzione, tenendo conto delle esigenze nutrizionali della specie e delle caratteristiche del terreno. Un apporto non equilibrato di nutrienti può infatti alterare il rapporto tra crescita vegetativa e produzione, con effetti negativi sulla qualità dei frutti. Un ulteriore elemento fondamentale è la scelta del materiale vegetale. La corretta combinazione tra cultivar e portinnesto consente di migliorare l'adattamento alle condizioni locali, la regolarità produttiva e la qualità commerciale del prodotto.

Particolare attenzione deve essere rivolta anche all'impollinazione. In alcuni casi, una pianificazione varietale non adeguata può limitare l'allegagione e quindi la produttività dell'impianto. Per questo motivo, la presenza di cultivar compatibili e complementari può risultare utile per favorire l'impollinazione incrociata e migliorare le rese.

Nonostante le prospettive positive, la coltivazione dell'avocado in Italia presenta ancora alcune criticità. Tra queste rientrano la limitata disponibilità di dati agronomici di lungo periodo, la necessità di adattare i protocolli colturali all'ambiente mediterraneo, la vulnerabilità agli eventi climatici estremi e le problematiche legate alla gestione della post-raccolta. A ciò si aggiunge la competizione con i grandi Paesi esportatori, che dispongono di filiere consolidate e volumi produttivi elevati.

Per il futuro, sarà quindi necessario sviluppare modelli produttivi capaci di conciliare redditività, qualità e sostenibilità. In particolare, occorrerà prestare attenzione al consumo idrico, alla tutela del suolo, alla riduzione degli input chimici e alla valorizzazione della produzione locale. In questa prospettiva, l'avocado può rappresentare una coltura interessante per alcuni areali italiani, purché la sua espansione sia accompagnata da una gestione tecnica consapevole e da un'attenta valutazione delle risorse disponibili.

La coltivazione dell'avocado in Sicilia presenta diversi punti di forza, che hanno contribuito al successo della produzione di questo frutto nella regione. Alcuni dei principali punti di forza includono:

- Clima favorevole: la Sicilia ha un clima mediterraneo con inverni miti ed estati calde, condizioni ideali per la coltivazione dell'avocado.
- Terreni adeguati: la presenza di terreni con buona permeabilità e ricchi di sostanze organiche è essenziale per il successo della coltivazione dell'avocado, e molte aree della Sicilia soddisfano questi requisiti.
- Diversa altitudine: diverse zone della Sicilia presentano altitudini variabili, il che consente una coltivazione su diverse quote.
- Assenza di avversità fitopatologiche: insolitamente per quanto riguarda una coltura "importata", l'avocado non ha preoccupanti avversità da temere, questo permette di coltivarlo

senza l'uso massiccio di pesticidi e delle buone pratiche agronomiche volte a prevenire eventuali problematiche.

Nel complesso, la coltivazione dell'avocado in Italia e in Sicilia può essere interpretata come un fenomeno emergente ma strutturalmente significativo. Essa riflette la capacità del sistema agricolo mediterraneo di adattarsi ai mutamenti ambientali ed economici, sperimentando nuove traiettorie produttive. La sua evoluzione futura dipenderà dalla solidità della ricerca agronomica, dall'organizzazione della filiera e dalla possibilità di costruire un'identità produttiva distintiva, fondata su qualità, tracciabilità e integrazione territoriale.

1.4 Composizione chimico-nutrizionale

L'avocado si distingue nel panorama dei frutti per una composizione chimico-nutrizionale peculiare, che lo colloca in una posizione intermedia tra i frutti tradizionalmente ricchi di acqua e zuccheri semplici e gli alimenti a più elevata densità energetica dovuta alla presenza di lipidi. Tale peculiarità spiega l'interesse crescente verso questo prodotto, sia dal punto di vista nutrizionale sia in relazione alle sue applicazioni tecnologiche e funzionali.

La parte edibile del frutto, costituita dal mesocarpo, è caratterizzata da un contenuto idrico inferiore a quello della maggior parte dei frutti freschi e da una quota significativa di sostanza secca. All'interno di quest'ultima, la frazione lipidica rappresenta il componente più distintivo, seguita da carboidrati disponibili in quantità moderata, fibra alimentare, piccole quote proteiche, vitamine, sali minerali e un insieme di composti bioattivi. La composizione può variare sensibilmente in funzione della cultivar, del grado di maturazione, delle condizioni pedoclimatiche, delle tecniche colturali e delle modalità di conservazione.

Dal punto di vista energetico, l'avocado presenta un valore più elevato rispetto alla maggioranza dei frutti comunemente consumati, proprio in ragione della sua ricchezza lipidica. Tuttavia, tale caratteristica non ne riduce l'interesse salutistico; al contrario, esso è spesso considerato un alimento di pregio nutrizionale in quanto la sua componente grassa è qualitativamente favorevole. L'avocado fornisce inoltre fibra alimentare, micronutrienti e sostanze ad attività antiossidante, contribuendo a definirne il profilo come alimento denso di nutrienti.

La matrice del frutto presenta anche interessanti proprietà tecnologiche. La consistenza cremosa della polpa è il risultato della particolare struttura cellulare e della distribuzione della frazione lipidica, che conferiscono all'avocado una texture adatta alla trasformazione in puree, creme, emulsioni e prodotti spalmabili. La composizione chimica influisce pertanto non solo sul valore nutritivo, ma anche sulla versatilità industriale del prodotto.

L’analisi della composizione chimico-nutrizionale dell’avocado richiede una trattazione distinta delle sue principali componenti, al fine di evidenziarne il significato fisiologico, dietetico e tecnologico. Nei paragrafi successivi verranno pertanto approfonditi il ruolo dell’acqua e della sostanza secca, la componente lipidica, i carboidrati e la fibra, la frazione proteica, il contenuto in vitamine e sali minerali, nonché le proprietà bioattive e salutistiche associate al consumo del frutto.

L’avocado presenta un elevato valore energetico, un frutto intero da 100 g contiene 238 kcal che possono variare a seconda delle dimensioni e della varietà. Tali calorie sono fornite principalmente dai lipidi, seguiti da poche proteine e ancor meno carboidrati. L’avocado è poi ricco di fibre, non contiene lattosio, glutine e colesterolo ma, è ricco di fitosteroli (β-sitosterolo) che inibiscono l’assorbimento intestinale del colesterolo (Ford et al. 2023)

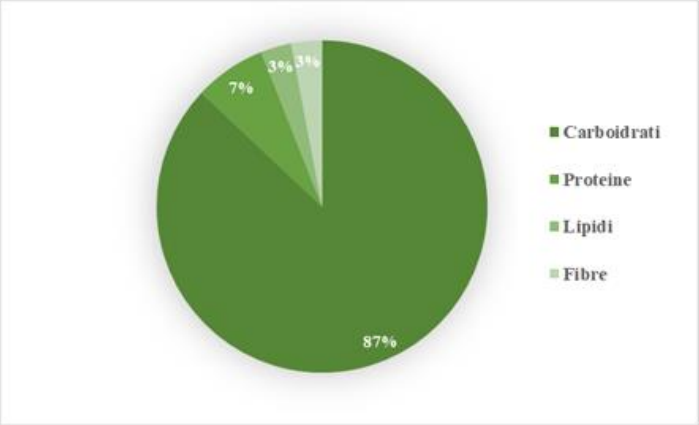


Figura 1.5. Composizione della polpa di avocado

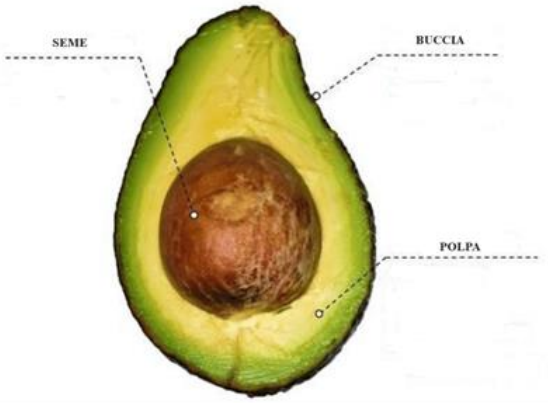


Figura 1.6. Frutto dell’avocado

1.4.1 Lipidi

La frazione lipidica costituisce l’elemento più distintivo dell’avocado dal punto di vista nutrizionale. A differenza della maggior parte dei frutti, nei quali i lipidi sono presenti in quantità trascurabili, il mesocarpo dell’avocado accumula una quota significativa di grassi, che aumenta durante la maturazione del frutto e contribuisce in misura sostanziale al suo valore energetico e alle sue proprietà sensoriali.

I lipidi dell’avocado sono rappresentati prevalentemente da acidi grassi *insaturi*, con una netta prevalenza dell’acido oleico. Questa caratteristica avvicina il profilo lipidico del frutto a quello di alimenti di riconosciuto interesse salutistico, quali l’olio extravergine d’oliva, pur nella specificità della matrice vegetale da cui derivano. La presenza di acidi grassi monoinsaturi è considerata favorevole sotto il profilo nutrizionale, in quanto associata a un migliore equilibrio lipidico della dieta e a effetti positivi sui principali indicatori cardiometabolici, se inserita in un contesto alimentare equilibrato.

Accanto all'acido oleico sono presenti, in proporzioni minori, altri acidi grassi saturi e polinsaturi. La composizione esatta dipende da fattori genetici e ambientali, oltre che dal grado di maturazione. Tale variabilità influisce sia sul valore nutrizionale sia sulla stabilità ossidativa del frutto e dei prodotti derivati. Una maggiore presenza di composti insaturi, infatti, se da un lato aumenta il pregio nutrizionale, dall'altro richiede attenzione nelle fasi di conservazione e trasformazione per prevenire fenomeni di irrancidimento.

La componente lipidica contribuisce anche alla consistenza cremosa e alla palatabilità dell'avocado. I grassi partecipano alla percezione di morbidezza, pienezza gustativa e sazietà, rendendo il frutto adatto a impieghi alimentari in cui si desideri sostituire, almeno in parte, altre fonti di grasso. In ambito tecnologico, questa caratteristica apre possibilità interessanti per la formulazione di creme spalmabili, salse, prodotti da forno riformulati e alimenti funzionali.

Dal punto di vista fisiologico, il consumo di lipidi di buona qualità inseriti in una matrice alimentare ricca di fibra, micronutrienti e composti bioattivi può favorire una risposta metabolica complessivamente favorevole. L'avocado, proprio per la combinazione tra frazione lipidica e altri nutrienti, non deve essere valutato unicamente in base al suo contenuto calorico, ma in funzione del suo ruolo all'interno della dieta nel suo insieme.

Una porzione da 100 g contiene circa 23 g di grassi, la maggior parte dei quali sono acidi grassi monoinsaturi (acido palmitoleico e acido oleico). Il ricco contenuto in grassi fa sì che l'avocado possa essere utilizzato in alternativa al burro, così da ridurre significativamente l'assunzione di calorie, grassi saturi, sodio e colesterolo.

1.4.2 Carboidrati e fibra alimentare

La componente glucidica dell'avocado si differenzia in modo significativo da quella della maggior parte dei frutti. Mentre molti frutti freschi sono caratterizzati da una presenza consistente di zuccheri semplici, l'avocado presenta un contenuto relativamente moderato di carboidrati disponibili e una quota più rilevante di fibra alimentare. Questa peculiarità contribuisce a definire il suo profilo metabolico e il suo interesse nelle diete orientate al controllo glicemico e alla sazietà.

I carboidrati disponibili comprendono piccole quantità di zuccheri e altre sostanze glucidiche facilmente utilizzabili dall'organismo. Tuttavia, il loro peso relativo sul totale della composizione del frutto è inferiore rispetto a quello osservabile in altri frutti tropicali o temperati. Ciò comporta un impatto glicemico generalmente più contenuto, sebbene tale aspetto debba essere sempre interpretato nel quadro complessivo della porzione consumata e della composizione del pasto.

La maggior parte del contenuto in carboidrati (3,3 g di fibre e 1,8 g di carboidrati per 100 g di prodotto) qualifica l'avocado come alimento a basso contenuto di zuccheri. Nella polpa si trovano

quantità maggiori di fibre insolubili (cellulosa e lignina) e solubili (emicellulose e pectine), rispettivamente 70% e 30%. Le fibre solubili formano una sorta di gel che rallentano l'assorbimento dei grassi e contribuiscono alla sensazione di sazietà.

Particolarmente importante è la presenza di fibra alimentare, che rappresenta uno dei principali punti di forza nutrizionali dell'avocado. La fibra include componenti solubili e insolubili, entrambe rilevanti per la fisiologia digestiva. La frazione insolubile contribuisce al volume fecale e alla regolarità intestinale, mentre quella solubile può influenzare la viscosità del contenuto intestinale, la velocità di assorbimento dei nutrienti e la fermentabilità a livello del colon. Attraverso tali meccanismi, la fibra dell'avocado può concorrere al benessere gastrointestinale e al mantenimento dell'equilibrio metabolico.

La combinazione tra fibra e lipidi rende l'avocado un alimento ad elevata capacità saziante. Questo effetto può essere particolarmente utile nei regimi alimentari in cui si intenda favorire un miglior controllo dell'appetito e una distribuzione più equilibrata dell'energia giornaliera. Inoltre, la fibra contribuisce a modulare la risposta postprandiale e può favorire indirettamente il metabolismo lipidico e glucidico.

La presenza di fibra non riguarda soltanto la parte edibile, ma caratterizza in misura ancora maggiore anche le frazioni residuali del frutto, aprendo prospettive interessanti per la valorizzazione dei sottoprodotti.

1.4.3 Proteine

Sebbene l'avocado non possa essere considerato una fonte proteica primaria nel contesto dell'alimentazione umana, la presenza di proteine nella polpa contribuisce comunque al suo profilo nutrizionale complessivo. Rispetto ad altri frutti, infatti, l'avocado presenta un tenore proteico generalmente non trascurabile, pur restando nettamente inferiore rispetto a quello di legumi, cereali proteici o alimenti di origine animale.

Le proteine dell'avocado partecipano alla struttura cellulare del frutto, alle dinamiche metaboliche della maturazione e, in parte, al valore nutrizionale della matrice. Dal punto di vista quantitativo, la loro incidenza risulta modesta; tuttavia, la presenza di amminoacidi e composti azotati contribuisce alla completezza compositiva del frutto e può avere implicazioni anche sul piano sensoriale e tecnologico.

Nel quadro della dieta, il contributo proteico dell'avocado va interpretato soprattutto in termini complementari. Esso non risponde da solo ai fabbisogni proteici, ma può concorrere a costruire pasti bilanciati, soprattutto quando associato ad altre fonti proteiche vegetali o animali. In questo senso,

l'avocado può essere considerato un ingrediente di supporto in regimi alimentari diversificati, in cui il suo valore risiede più nella qualità complessiva della matrice che nella singola quota proteica.
Un interesse specifico può riguardare la distribuzione delle proteine nelle diverse parti del frutto. Infatti, alcune frazioni residuali, come il seme, possono presentare composizioni differenti e suscitare attenzione per possibili applicazioni alternative. Sebbene tale aspetto richieda ulteriori approfondimenti in funzione delle tecnologie utilizzabili e della sicurezza d'impiego, esso conferma come l'avocado debba essere studiato come sistema biologico complesso e non unicamente come alimento fresco destinato al consumo diretto.

1.4.4 Vitamine e sali minerali

L'avocado apporta una gamma interessante di micronutrienti, tra cui vitamine liposolubili e idrosolubili, nonché diversi sali minerali. La loro presenza contribuisce in modo significativo al valore nutrizionale del frutto, rafforzandone l'immagine di alimento denso di nutrienti e inseribile in un modello alimentare orientato alla qualità.
Tra le vitamine, particolare rilievo assumono quelle con funzione antiossidante e quelle coinvolte nei processi metabolici. L'avocado contiene in particolare composti riconducibili al gruppo della vitamina E, la cui presenza è coerente con la matrice lipidica del frutto e ne sostiene la funzione protettiva nei confronti dell'ossidazione. Sono inoltre presenti vitamine del gruppo B, importanti per numerosi processi enzimatici e metabolici, oltre a quote di vitamina C, la cui entità può variare con la cultivar e lo stadio di maturazione. nella polpa di avocado troviamo in particolare vitamina K, vitamina E (α-tocoferolo) vitamine del gruppo B (come tiamina B1, riboflavina B2, niacina B3, acido pantotenico B5, piridossina B6 e acido folico B9, biotina B7), vitamina C e in abbondanza anche β-carotene (precursore della vitamina A). Tutti micronutrienti di grande importanza per la salute e il benessere generale. I carotenoidi presenti, tra cui luteina, zeaxantina e α e β-carotene, sono potenti scavenger dei radicali liberi. Tra l'altro, il contenuto di luteina dell'avocado è superiore a quello di qualsiasi altro frutto. Il colore della polpa di avocado è principalmente attribuito al maggior contenuto di xantofille (luteina e zeaxantina).
Per quanto riguarda i sali minerali, l'avocado si distingue per il contenuto di potassio, elemento di grande rilevanza fisiologica coinvolto nell'equilibrio idroelettrolitico, nella funzione neuromuscolare e nella regolazione della pressione arteriosa. Sono inoltre presenti magnesio, fosforo e altri minerali in quantità variabili, che contribuiscono al valore complessivo del frutto. Il profilo minerale dipende non solo dalla genetica, ma anche dalle caratteristiche del suolo, dalla fertilizzazione e dalle condizioni di coltivazione.

L’avocado si distingue per il contenuto di potassio, 450 mg per 100 g di prodotto, al pari di banane (350 mg) e kiwi (400 mg). Contiene poi una serie di altri minerali, tra cui magnesio, fosforo, calcio, sodio, ferro, boro, zinco e manganese che si presentano in quantità inferiori a 1 mg per grammo di peso fresco di avocado. L’alto contenuto di potassio e il basso contenuto di sodio, aiuta a ridurre la pressione sanguigna e protegge dalle malattie cardiovascolari.

Il ruolo dei micronutrienti dell’avocado non va considerato in modo isolato. La loro efficacia nutrizionale si inserisce infatti in una matrice complessa, nella quale lipidi, fibra e composti bioattivi possono interagire favorevolmente in termini di biodisponibilità e azione fisiologica. In particolare, la presenza di lipidi può agevolare l’assorbimento di alcune vitamine liposolubili, rafforzando il valore funzionale del frutto.

Nel contesto di una dieta varia ed equilibrata, l’avocado può pertanto contribuire in modo significativo all’apporto di micronutrienti essenziali. Tale contributo acquista ulteriore interesse quando il frutto viene inserito in preparazioni che sostituiscono ingredienti meno ricchi di vitamine e minerali o che risultano più poveri dal punto di vista nutrizionale.

1.5 Proprietà bioattive e salutistiche

L’interesse scientifico e nutrizionale per l’avocado non dipende soltanto dalla sua composizione in macronutrienti e micronutrienti, ma anche dalla presenza di composti bioattivi che possono esercitare effetti favorevoli sull’organismo. Il concetto di proprietà salutistiche, in questo contesto, va interpretato con rigore: non si tratta di attribuire al frutto capacità terapeutiche in senso stretto, ma di riconoscere il suo possibile contributo al mantenimento dello stato di salute quando inserito in una dieta equilibrata e in uno stile di vita complessivamente sano.

Tra i principali composti bioattivi dell’avocado si annoverano sostanze ad azione antiossidante, fitosteroli, composti fenolici, carotenoidi e altri costituenti minori distribuiti nella polpa e, in misura anche maggiore, nelle frazioni non edibili del frutto. Questi composti possono contribuire alla protezione delle strutture cellulari dallo stress ossidativo, alla modulazione del metabolismo lipidico e al mantenimento dell’omeostasi metabolica. L’interesse salutistico dell’avocado nasce dunque dall’effetto combinato della sua matrice e non dalla presenza di un singolo composto isolato.

Uno dei principali ambiti di studio riguarda la salute cardiovascolare. Il contenuto elevato di acidi grassi monoinsaturi, associato alla presenza di fibra, fitosteroli e antiossidanti, rende l’avocado un alimento potenzialmente utile nel contesto di diete volte al miglioramento del profilo lipidico plasmatico. Anche il contenuto di potassio e l’assenza di colesterolo nella matrice vegetale concorrono a rafforzare tale interesse. Tuttavia, il beneficio potenziale dipende sempre dalla qualità complessiva dell’alimentazione e non può essere dissociato da essa.

Un secondo ambito di rilievo è quello del controllo metabolico. La combinazione tra grassi di buona qualità, moderato contenuto di carboidrati disponibili e presenza di fibra rende l'avocado interessante in modelli alimentari orientati alla sazietà, al contenimento dei picchi glicemici e al miglioramento dell'equilibrio nutrizionale del pasto. Questo aspetto ne ha favorito l'inclusione in diversi approcci dietetici contemporanei, purché con porzioni coerenti con il fabbisogno energetico individuale.

Le proprietà bioattive dell'avocado possono riguardare anche la salute intestinale, grazie alla presenza di fibra fermentabile e alla possibile interazione con il microbiota. Inoltre, alcuni composti fenolici e pigmenti naturali possono contribuire a meccanismi protettivi di tipo antiossidante e antinfiammatorio (Dreher et al. 2013). Anche in questo caso, la ricerca tende a sottolineare la necessità di considerare il frutto come parte di una matrice alimentare complessa, evitando semplificazioni eccessive.

Da ultimo, è opportuno evidenziare che l'interesse verso le proprietà bioattive dell'avocado si estende anche ai suoi sottoprodotti. Buccia e seme, pur non destinati tradizionalmente al consumo, contengono composti di potenziale interesse funzionale e tecnologico, aprendo prospettive di valorizzazione che verranno sviluppate nei capitoli successivi. In tal senso, l'avocado si configura non soltanto come alimento salutistico, ma come materia prima di elevato interesse per la ricerca agroalimentare, nutraceutica e bioeconomica.

Capitolo 2 – La filiera dell'avocado, gli scarti e le prospettive di valorizzazione

L'avocado ha assunto negli ultimi decenni un ruolo sempre più rilevante nel sistema agroalimentare globale, trasformandosi da coltura di nicchia a commodity internazionale ad alto valore aggiunto. La crescita della domanda nei mercati europei, nordamericani e asiatici ha favorito l'espansione delle superfici coltivate, la specializzazione dei sistemi di raccolta e confezionamento, nonché la diversificazione dei prodotti derivati. Tale evoluzione ha tuttavia evidenziato numerose criticità, legate non soltanto alla sostenibilità dei modelli produttivi e logistici, ma anche alla gestione degli scarti generati lungo l'intera filiera. Buccia, seme, frutti non commercializzabili, sottoprodotti della trasformazione e perdite di post-raccolta rappresentano infatti una quota significativa della biomassa complessivamente prodotta e pongono interrogativi cruciali in termini economici, ambientali e tecnologici. Un loro recupero e valorizzazione rappresenta attualmente un'alternativa per garantire sostenibilità ambientale e, in alcuni casi, favorire l'espansione di un'economia circolare perché potrebbero essere riutilizzati per estrarre composti che possono essere impiegati in diversi settori. Quindi, l'utilizzo dei sottoprodotti è una pratica che ha vantaggi sia dal punto di vista ambientale che economico, contribuendo a creare un sistema più sostenibile ed efficiente.

L'interesse scientifico verso la filiera dell'avocado non dipende esclusivamente dalla rapida crescita del suo commercio internazionale, ma anche dalla composizione chimica del frutto e delle sue matrici residuali. Se la polpa è ampiamente valorizzata per il contenuto in lipidi, fibre, vitamine e composti bioattivi, anche le frazioni considerate scarto presentano un potenziale elevato per applicazioni in campo alimentare, nutraceutico, cosmetico, farmaceutico, energetico e agronomico. Ne consegue che l'avocado costituisce un caso emblematico di studio per la transizione da modelli lineari di produzione e consumo a modelli circolari basati sulla prevenzione delle perdite, sul recupero di materia e sulla valorizzazione integrata dei residui.

Il presente capitolo analizza la filiera produttiva dell'avocado sotto il profilo tecnico, economico e ambientale, soffermandosi in particolare sulle fasi di raccolta, post-raccolta e conservazione, sui principali prodotti derivati, sulle tipologie di scarti generati e sulle possibili strategie di recupero. L'obiettivo è fornire una visione sistemica che consenta di leggere gli scarti non come semplice costo o problema da smaltire, ma come risorsa secondaria da reinserire in cicli produttivi innovativi e sostenibili.

2.1 La filiera produttiva

La filiera produttiva dell'avocado si caratterizza per una struttura complessa, articolata in una sequenza di fasi interdipendenti che vanno dalla produzione vivaistica fino alla distribuzione finale. Essa si distingue inoltre per una forte dimensione globale: la localizzazione delle aree di coltivazione,

spesso concentrate in specifici contesti climatici, si combina con una rete commerciale internazionale che collega produttori, intermediari, impianti di confezionamento, operatori logistici, trasformatori e grande distribuzione organizzata. Tale configurazione rende la filiera particolarmente sensibile alle dinamiche dei mercati, alle condizioni pedoclimatiche, alla disponibilità di risorse idriche, ai requisiti fitosanitari e agli standard qualitativi richiesti dai paesi importatori.

Dal punto di vista agricolo, l'avocado è una coltura arborea subtropicale che richiede condizioni ambientali specifiche, tra cui temperature miti, assenza di gelate, suoli ben drenati e adeguata disponibilità idrica. La scelta del materiale vegetale e del portinnesto riveste un ruolo determinante nella produttività del frutteto, nella resistenza agli stress e nella qualità finale del frutto. La fase vivaistica, spesso sottovalutata nell'analisi della filiera, rappresenta il primo nodo strategico, in quanto incide sull'uniformità delle piante, sull'entrata in produzione e sulla capacità di adattamento alle condizioni locali (Dabas et al 2013).

La coltivazione dell'avocado si sviluppa successivamente attraverso operazioni di gestione agronomica che comprendono l'irrigazione, la nutrizione minerale, la potatura, il controllo delle infestanti, la difesa fitosanitaria e il monitoraggio dello stato fisiologico della pianta. La natura perenne della coltura implica che le decisioni agronomiche abbiano effetti cumulativi nel tempo, sia in termini di resa sia di sostenibilità. In molti contesti produttivi, la crescente pressione della domanda ha favorito l'intensificazione colturale, con impianti ad alta densità, sistemi irrigui più sofisticati e una maggiore specializzazione tecnica. Tuttavia, l'incremento delle rese non sempre si accompagna a un uso efficiente delle risorse, soprattutto quando la produzione si espande in aree caratterizzate da scarsità idrica o fragilità ecologica.

Un ulteriore elemento distintivo della filiera è rappresentato dalla selezione varietale. La cultivar Hass domina il mercato internazionale per la sua elevata conservabilità, la pezzatura commerciale, la qualità organolettica e la capacità di maturare in modo relativamente controllabile. Accanto ad essa persistono varietà locali o complementari, che possono coprire finestre stagionali diverse o soddisfare nicchie di mercato. La prevalenza di una singola cultivar, pur facilitando la standardizzazione commerciale, può ridurre la biodiversità agricola e aumentare la vulnerabilità a patogeni, cambiamenti climatici o oscillazioni di mercato.

Dopo la produzione in campo, il frutto entra nella fase di raccolta e conferimento ai centri di lavorazione. Qui avvengono la prima selezione qualitativa, l'eventuale lavaggio, la classificazione per calibro, il confezionamento e la preparazione per il trasporto. In questa fase la filiera può seguire due percorsi principali: il mercato del fresco e la trasformazione industriale. Il primo richiede standard estetici e merceologici molto elevati; il secondo può assorbire parte dei frutti fuori calibro o con difetti visivi, purché idonei dal punto di vista igienico-sanitario e compositivo.

Nel canale del fresco, la distribuzione è fortemente influenzata dalla logistica del freddo e dalla gestione della maturazione. I frutti raccolti in stadio fisiologicamente maturo ma ancora sodi devono mantenere le proprie caratteristiche durante il trasporto, spesso di lunga distanza, e arrivare ai punti vendita con un adeguato livello di shelf-life residua. Ne deriva l'esigenza di una catena del valore altamente coordinata, in cui tempi, temperature, umidità relativa e manipolazioni devono essere accuratamente controllati.

Nel canale della trasformazione, l'avocado viene destinato alla produzione di puree, guacamole, oli, ingredienti funzionali e altri derivati. In questo segmento la qualità esteriore del frutto conta meno rispetto alla composizione della polpa, al contenuto lipidico, al grado di maturazione e alla sicurezza microbiologica. La trasformazione industriale genera però quantità consistenti di residui, poiché una parte significativa del peso del frutto è costituita da buccia e seme, oltre a eventuali scarti derivanti dalla selezione preliminare.

L'assetto economico della filiera varia sensibilmente tra contesti locali e globalizzati. In alcune aree la produzione è organizzata da piccole aziende agricole che conferiscono il raccolto a cooperative o centri di confezionamento; in altre prevalgono modelli integrati verticalmente, in cui la stessa impresa controlla produzione, selezione, export e talvolta trasformazione. I modelli integrati tendono a garantire maggiore coordinamento, tracciabilità e standardizzazione. Al contrario, i sistemi frammentati offrono maggior flessibilità, ma spesso soffrono di inefficienze logistiche, difficoltà di accesso all'innovazione e limitata capacità di valorizzare i sottoprodotti.

Nell'analisi della filiera dell'avocado assume particolare rilievo il concetto di perdita di valore. Ogni passaggio, dalla produzione alla vendita, può infatti generare una riduzione del valore potenziale del prodotto a causa di danni meccanici, maturazione non uniforme, infezioni fungine, difetti estetici, errori logistici o mancato rispetto delle specifiche commerciali. Tali perdite non si traducono soltanto in minori ricavi, ma anche in un aumento degli scarti e in una maggiore impronta ambientale per unità di prodotto effettivamente consumato. La gestione efficiente della filiera deve quindi essere orientata non solo alla massimizzazione della resa produttiva, ma anche alla minimizzazione delle perdite di qualità e alla valorizzazione delle frazioni residuali.

In prospettiva, la filiera dell'avocado si configura come un sistema agroindustriale in transizione. Da un lato permangono modelli lineari incentrati sulla vendita del frutto fresco e sullo smaltimento delle biomasse residuali; dall'altro emergono approcci innovativi fondati su tracciabilità, digitalizzazione, valorizzazione dei sottoprodotti, simbiosi industriale e integrazione di strategie di economia circolare. Comprendere questa duplice natura è essenziale per valutare le opportunità di sviluppo sostenibile del comparto.

2.2 Raccolta, post-raccolta e conservazione

Le fasi di raccolta, post-raccolta e conservazione rivestono un'importanza decisiva nella filiera dell'avocado, poiché incidono in maniera diretta sulla qualità del frutto, sulla sua idoneità commerciale, sulla durata della shelf-life e sulla quantità di prodotto che può essere effettivamente immessa sul mercato. A differenza di molti altri frutti, l'avocado presenta una dinamica fisiologica peculiare: esso matura sull'albero fino a raggiungere la maturità fisiologica, ma il processo di rammollimento e maturazione edibile si completa prevalentemente dopo il distacco. Questa caratteristica offre vantaggi logistici, ma richiede un controllo rigoroso delle condizioni di raccolta e delle successive operazioni di filiera.

La raccolta avviene generalmente quando il frutto ha raggiunto un adeguato contenuto di sostanza secca e un livello di sviluppo idoneo a garantire una corretta maturazione post-raccolta. L'individuazione del momento ottimale di raccolta è fondamentale: una raccolta troppo precoce può compromettere il sapore, la consistenza e la capacità del frutto di maturare in modo uniforme, mentre una raccolta tardiva aumenta il rischio di sovramaturazione, danni meccanici e riduzione della conservabilità. I parametri di maturazione vengono valutati mediante indici fisici e chimici, tra cui pezzatura, contenuto di sostanza secca, percentuale di olio e caratteristiche del mesocarpo. La raccolta dell'avocado in Sicilia si estende da ottobre a maggio e la stagionalità è relativa, molto spesso dettata da esigenze commerciali e/o climatiche. Quindi, gli avocado consumati fuori da questa stagione sono quasi certamente importati da altri paesi, solitamente sudamericani.

Dal punto di vista operativo, la raccolta dell'avocado deve limitare al massimo le lesioni meccaniche. Il frutto, pur avendo una buccia relativamente resistente, è sensibile a urti, compressioni e abrasioni che possono causare imbrunimenti interni, alterazioni della tessitura e accelerazione dei processi di deterioramento. La raccolta manuale è ancora ampiamente diffusa, specialmente nei contesti in cui il mantenimento della qualità estetica è determinante per l'export. Il distacco avviene spesso con una porzione di peduncolo opportunamente rifinita, al fine di ridurre le ferite e prevenire attacchi patogeni.

Una volta raccolti, i frutti vengono trasferiti ai centri di conferimento o alle stazioni di packing house, dove iniziano le operazioni di post-raccolta. Questa fase comprende la ricezione, l'ispezione, la cernita, il lavaggio ove previsto, la disinfezione, la calibratura e il confezionamento. La selezione ha lo scopo di separare i frutti conformi agli standard commerciali da quelli che presentano difetti visivi, danni, deformazioni, sintomi di malattie o pezzature non richieste dal mercato. I frutti esclusi possono essere destinati alla trasformazione oppure diventare scarto, in funzione della qualità residua e dell'organizzazione della filiera.

Uno dei principali problemi del post-raccolta dell'avocado è rappresentato dal controllo della respirazione e della produzione di etilene. Essendo un frutto climaterico, l'avocado manifesta un aumento della respirazione e dell'attività metabolica durante la maturazione, con conseguente rapida evoluzione delle caratteristiche sensoriali. Per questo motivo, il raffreddamento tempestivo dopo la raccolta è una pratica essenziale. La rimozione del calore di campo consente di rallentare i processi fisiologici, ridurre la perdita d'acqua e contenere lo sviluppo microbico. Tuttavia, la temperatura di conservazione deve essere gestita con attenzione, poiché temperature eccessivamente basse possono causare danni da freddo, con sintomi quali annerimenti, alterazioni della polpa, sviluppo irregolare della maturazione e perdita di qualità organolettica.

La conservazione in atmosfera controllata o modificata rappresenta una delle soluzioni più efficaci per prolungare la vita commerciale del frutto. La riduzione dell'ossigeno e l'aumento controllato dell'anidride carbonica permettono di rallentare il metabolismo respiratorio, ritardare la maturazione e contenere alcune alterazioni fisiologiche. Tali tecnologie sono particolarmente rilevanti nelle filiere lunghe, in cui l'avocado deve affrontare trasporti intercontinentali e soste nei magazzini di distribuzione. L'efficacia di questi sistemi dipende tuttavia dalla varietà, dal grado di maturazione iniziale, dalla durata dello stoccaggio e dalla corretta gestione della temperatura lungo tutta la catena logistica.

La maturazione commerciale costituisce un ulteriore passaggio strategico. Nei moderni sistemi distributivi, molti avocado sono commercializzati in modalità "ready to eat", cioè sottoposti a maturazione controllata prima dell'immissione sul mercato. Questo processo prevede l'esposizione dei frutti a condizioni specifiche di temperatura, umidità e concentrazione di etilene, al fine di ottenere un ammorbidimento uniforme e prevedibile. Se correttamente eseguita, la maturazione controllata migliora l'esperienza del consumatore e riduce gli scarti a valle; se mal gestita, può invece generare lotti eterogenei, frutti troppo maturi o non maturi, reclami commerciali e maggiori perdite.

Le criticità post-raccolta dell'avocado non sono solo fisiologiche ma anche microbiologiche. Infezioni fungine latenti possono manifestarsi durante lo stoccaggio o la distribuzione, compromettendo l'aspetto esteriore e la sicurezza del prodotto. L'incidenza di marciumi e alterazioni dipende dalle condizioni di raccolta, dall'igiene dei processi, dalla presenza di ferite e dall'efficienza del raffreddamento. Di conseguenza, la prevenzione deve essere impostata in un'ottica integrata che coinvolga tutte le fasi della filiera, dal campo al punto vendita.

La conservazione domestica rappresenta infine l'ultimo segmento di un processo più ampio di mantenimento della qualità. Anche in questa fase l'avocado può essere soggetto a perdite, soprattutto quando viene acquistato in uno stadio di maturazione non ottimale o conservato in modo scorretto. Gli sprechi a livello del consumo dipendono spesso dalla ridotta prevedibilità del momento di

consumo ideale, dalla rapida transizione da frutto acerbo a sovramaturo e dalla difficoltà nel valutare lo stato interno senza danneggiare il prodotto. Ciò conferma come la qualità dell'avocado non sia soltanto un attributo del prodotto, ma il risultato di una gestione coordinata dell'intera catena del valore.

Raccolta, post-raccolta e conservazione non devono essere considerate semplici fasi tecniche, ma leve strategiche per la competitività e la sostenibilità della filiera. La loro ottimizzazione permette di migliorare la qualità commerciale, ridurre le perdite quantitative e qualitative e creare le condizioni per un uso più razionale delle risorse investite nella produzione del frutto.

2.3 Prodotti derivati

Secondo l'art. 184-bis del D.Lgs. 152/06 del Testo Unico Ambientale "*è un sottoprodotto e non un rifiuto la sostanza o l'oggetto, che soddisfa tutte le seguenti condizioni*:

1. È originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto;
2. È certo che sarà utilizzato, nel corso dello stesso o di un successivo processo di produzione o di utilizzazione, da parte del produttore o di terzi;
3. Può essere utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;
4. L'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana."

Quindi, affinché sia considerato non rifiuto, è necessaria la sussistenza contemporanea delle quattro condizioni elencate nel D.Lsg. 152/06. In mancanza anche di una sola delle condizioni, il residuo deve essere considerato un rifiuto e come tale gestito.

Sebbene il mercato del fresco rappresenti il principale sbocco commerciale dell'avocado, negli ultimi anni si è osservata una progressiva espansione dei prodotti derivati, favorita dall'aumento della domanda, dalla diffusione di modelli alimentari orientati al benessere e dall'esigenza di valorizzare i frutti non idonei alla vendita diretta. La trasformazione industriale consente infatti di intercettare segmenti di mercato differenti, ampliare la shelf-life della materia prima, diversificare l'offerta e migliorare la sostenibilità economica della filiera.

Tra i derivati più diffusi si colloca la polpa pronta o purea di avocado, impiegata come ingrediente in preparazioni alimentari refrigerate o congelate. Questo prodotto si presta a molteplici utilizzi, dall'industria del catering alla ristorazione collettiva, fino alla formulazione di snack, salse e farciture.

La lavorazione richiede il controllo dell'ossidazione enzimatica, uno dei principali limiti tecnologici della polpa di avocado, che tende ad imbrunire rapidamente a seguito dell'esposizione all'ossigeno. Per contrastare tale fenomeno vengono adottate strategie quali acidificazione, utilizzo di antiossidanti, confezionamento in atmosfera protettiva o trattamenti termici delicati.

Un derivato di grande rilevanza commerciale è il guacamole, salsa a base di avocado divenuta emblematica della trasformazione del frutto in prodotto ad alto valore percepito. La sua formulazione può includere, oltre alla polpa, ingredienti quali succo di lime, pomodoro, cipolla, peperoncino, erbe aromatiche e sale. La produzione industriale del guacamole richiede tecnologie di stabilizzazione capaci di preservare colore, consistenza e sicurezza microbiologica, pur mantenendo un'immagine di freschezza e naturalità. Il successo di questo prodotto deriva dalla sua versatilità d'uso, dalla compatibilità con il consumo rapido e dalla crescente popolarità delle cucine etniche e salutistiche.

Di particolare interesse è anche l'olio di avocado, ottenuto dalla polpa mediante processi meccanici o estrattivi. La sua composizione, ricca di acidi grassi monoinsaturi e composti minori bioattivi, ne favorisce l'impiego sia in ambito alimentare che cosmetico. Dal punto di vista nutrizionale, l'olio di avocado è apprezzato per la presenza di acido oleico, fitosteroli e componenti antiossidanti; sotto il profilo tecnologico, può presentare caratteristiche sensoriali e funzionali utili per condimenti, formulazioni speciali e prodotti premium. In cosmetica, viene utilizzato per le sue proprietà emollienti, restitutive e filmogenee.

Altri derivati comprendono ingredienti funzionali, farine da polpa disidratata, estratti ricchi in composti fenolici, formulazioni nutraceutiche e ingredienti per la cosmesi naturale. In alcuni casi la trasformazione riguarda non solo la polpa, ma anche le frazioni residuali del frutto. La buccia e il seme, tradizionalmente considerati rifiuti, possono essere sottoposti a processi di essiccamento, macinazione, estrazione o conversione biologica per ottenere ingredienti ad alto valore aggiunto. Questo orientamento amplia il concetto di prodotto derivato, includendo non solo ciò che nasce dalla trasformazione del frutto commercialmente utile, ma anche ciò che deriva dal recupero dei suoi sottoprodotti (Salazar-López et al. 2020).

La trasformazione dell'avocado presenta tuttavia alcune criticità. La deperibilità della materia prima richiede tempi rapidi di lavorazione e sistemi efficienti di approvvigionamento. Inoltre, l'elevato contenuto lipidico rende il prodotto sensibile a fenomeni ossidativi che possono alterare aroma, gusto e stabilità. Sul piano economico, la convenienza della trasformazione dipende dalla disponibilità di volumi costanti, dalla standardizzazione della qualità, dall'accesso alle tecnologie di processo e dalla capacità di sviluppare mercati per i prodotti ottenuti.

Dal punto di vista strategico, i prodotti derivati svolgono un duplice ruolo. Da un lato rappresentano una modalità di diversificazione del reddito e di penetrazione in mercati a maggiore valore unitario; dall'altro costituiscono uno strumento di gestione delle eccedenze e dei frutti non conformi al mercato del fresco. Ciò è particolarmente importante in una filiera come quella dell'avocado, dove la variabilità biologica e le esigenze estetiche della distribuzione possono determinare quote non trascurabili di prodotto escluso dal circuito principale pur essendo ancora perfettamente utilizzabile.
In una prospettiva di sostenibilità, la trasformazione industriale può quindi contribuire alla riduzione delle perdite alimentari, purché sia organizzata secondo modelli efficienti sotto il profilo energetico, logistico e gestionale. Il valore dei prodotti derivati non dipende soltanto dal prezzo di vendita, ma anche dalla capacità di sostituire pratiche di smaltimento, ridurre gli impatti ambientali e generare nuove catene di utilizzo della biomassa. L'avocado, per la sua composizione e per la varietà delle sue matrici, si presta particolarmente bene a questa logica di valorizzazione multipla. Diversi componenti dell'avocado, tra cui buccia, semi e polpa esausta, che rappresentano circa il 30% del peso del frutto, non vengono comunemente utilizzati e vengono invece scartati. Tuttavia, le aziende stanno cercando modi creativi ed ecologici per riutilizzare questi sottoprodotti, contribuendo così a ridurre l'impatto ambientale e a massimizzare l'efficienza delle risorse.

2.4 Tipologie di scarti

La filiera dell'avocado genera diverse tipologie di scarti, distribuite lungo tutte le fasi del ciclo produttivo e trasformativo. Tali scarti non sono omogenei né per origine né per composizione, e la loro corretta classificazione costituisce il presupposto per definire strategie efficaci di riduzione, recupero e valorizzazione. È possibile distinguere, in primo luogo, tra perdite in campo, scarti di selezione e confezionamento, sottoprodotti della trasformazione industriale e rifiuti derivanti dal consumo finale.
Le perdite in campo comprendono i frutti caduti prematuramente, quelli danneggiati da eventi climatici, attacchi fitosanitari o difetti fisiologici, nonché i prodotti lasciati sulla pianta o sul terreno per mancanza di convenienza economica alla raccolta. In molti sistemi produttivi, la raccolta selettiva porta a privilegiare i frutti con dimensioni e caratteristiche più richieste dal mercato, lasciando una quota di prodotto che non viene commercializzata. Questa frazione, pur non entrando formalmente nei flussi industriali, rappresenta una perdita reale di biomassa e di risorse impiegate nella produzione.
Gli scarti di selezione e confezionamento si originano invece nei centri di raccolta e nelle packing house. Si tratta di frutti fuori calibro, deformi, con difetti epidermici, danni meccanici, macchie, lesioni o sintomi di alterazione. In parte essi possono essere reindirizzati alla trasformazione, ma spesso, in assenza di una filiera integrata o di un'adeguata capacità di assorbimento industriale,

diventano scarto. Questa tipologia è particolarmente rilevante nei mercati orientati al consumo del fresco, dove gli standard estetici sono molto stringenti e non sempre coincidono con la reale qualità nutrizionale o igienica del frutto.

La trasformazione industriale genera la quota più consistente di sottoprodotti strutturati. Nella lavorazione della polpa, infatti, vengono sistematicamente separate buccia e seme, che insieme rappresentano una frazione importante del peso totale del frutto. La loro incidenza varia in funzione della varietà, del grado di maturazione e delle condizioni di coltivazione, ma nel complesso costituiscono un flusso residuale continuo e concentrato, particolarmente interessante dal punto di vista del recupero. A questi si aggiungono gli sfridi di lavorazione, i residui di polpa aderenti alle parti non edibili, i lotti non conformi e le acque di processo eventualmente cariche di sostanza organica.

La buccia dell'avocado è una matrice fibrosa, ricca di composti fenolici, pigmenti e polisaccaridi strutturali. Pur essendo tradizionalmente scartata, può presentare interesse per l'estrazione di antiossidanti naturali, per la produzione di ingredienti funzionali o per applicazioni nel packaging biodegradabile. Il seme, spesso voluminoso, è anch'esso ricco di amido, fibre e composti bioattivi. La sua composizione lo rende idoneo a processi di essiccamento e macinazione, a estrazioni selettive o a conversioni biotecnologiche. La presenza di tali composti rende buccia e seme materie seconde potenzialmente più interessanti di molti altri residui agroindustriali.

Gli scarti organici possono essere classificati anche in base al loro grado di deterioramento. Esistono residui "puliti" e relativamente stabili, come buccia e seme appena separati in impianti di trasformazione, e residui "degradati", come frutti marci, lotti alterati o rifiuti misti provenienti dalla distribuzione. Questa distinzione è fondamentale, poiché condiziona le possibilità di valorizzazione: i flussi omogenei e poco contaminati possono essere destinati a processi ad alto valore aggiunto, mentre i residui eterogenei o microbiologicamente compromessi si prestano più facilmente a utilizzi energetici o agronomici.

Anche nella fase distributiva e nel consumo si generano quantità significative di scarti. Nei punti vendita, gli avocado invenduti o eccessivamente maturi vengono spesso ritirati dalla commercializzazione. A livello domestico, le perdite derivano da errori nella conservazione, acquisti eccessivi, mancato consumo al momento ottimale o scarto di porzioni percepite come non edibili. Sebbene tali frazioni siano più difficili da intercettare in modo organizzato, esse contribuiscono all'impronta complessiva dello spreco alimentare associato al prodotto.

Dal punto di vista normativo e gestionale, è importante distinguere tra "sottoprodotto" e "rifiuto". Un residuo può essere considerato sottoprodotto se esiste una destinazione certa, un impiego ulteriore legale e tecnicamente possibile, e se non richiede trattamenti diversi dalla normale pratica industriale.

Questa distinzione non è meramente terminologica: incide sulla possibilità di inserire il materiale in filiere di recupero economicamente sostenibili. Nel caso dell'avocado, molte matrici residuali hanno caratteristiche tali da poter essere valorizzate come sottoprodotti, purché la filiera sia in grado di garantirne tracciabilità, stabilità e standardizzazione.

Un'ulteriore categoria di residui della filiera dell'avocado è rappresentata dalle foglie, generate principalmente durante le operazioni di potatura, gestione della chioma e rinnovo degli impianti. A differenza degli scarti derivanti dalla trasformazione industriale, le foglie si originano prevalentemente nella fase agricola e costituiscono una biomassa lignocellulosica spesso disponibile in quantità significative, soprattutto nei sistemi produttivi intensivi. Tradizionalmente esse vengono lasciate sul terreno, interrate, compostate o eliminate come residuo agricolo, ma negli ultimi anni hanno suscitato crescente interesse per il loro potenziale impiego in processi di valorizzazione.

Le foglie di avocado presentano infatti una composizione ricca di composti bioattivi, tra cui polifenoli, flavonoidi, tannini e sostanze aromatiche, oltre a fibre strutturali e frazioni minerali. Diversi studi hanno evidenziato la presenza di molecole con attività antiossidante e antimicrobica, che rendono questa matrice potenzialmente interessante per applicazioni nei settori alimentare, cosmetico e nutraceutico. In alcune tradizioni locali, inoltre, le foglie vengono già utilizzate per infusioni, aromatizzazioni o preparazioni erboristiche, dimostrando l'esistenza di usi alternativi rispetto allo smaltimento convenzionale.

Dal punto di vista gestionale, le foglie possono essere considerate residui relativamente "puliti", soprattutto quando derivano da potature recenti e non risultano contaminate da terra o da altre matrici organiche degradate. Questa caratteristica ne facilita l'impiego in filiere di recupero a maggiore valore aggiunto rispetto ai residui misti o deteriorati. Tuttavia, la loro elevata umidità e la naturale variabilità compositiva legata alla cultivar, alla stagione e alle pratiche agronomiche possono influenzarne la conservabilità e la standardizzazione industriale.

Oltre alle applicazioni estrattive, le foglie possono essere destinate a processi di compostaggio, digestione anaerobica o produzione di biomateriali, contribuendo alla chiusura del ciclo della biomassa all'interno di modelli di economia circolare. La valorizzazione di questa frazione residuale consente quindi di ampliare la prospettiva di utilizzo integrale della pianta di avocado, riducendo le perdite di materia organica e migliorando l'efficienza complessiva della filiera agroindustriale.

In termini quantitativi, la gestione degli scarti costituisce una questione centrale per la sostenibilità della filiera. Poiché una quota rilevante della biomassa totale non coincide con la parte edibile destinata al consumo diretto, una valutazione realistica dell'efficienza del sistema deve tenere conto dell'intero bilancio di materia. L'analisi delle tipologie di scarto permette quindi di individuare i punti

critici della filiera e di orientare le scelte tecnologiche verso modelli di recupero differenziati, graduati in funzione della qualità del residuo e del valore dell'applicazione finale.

2.5 Impatto ambientale

L'espansione della filiera dell'avocado ha sollevato un crescente dibattito in merito al suo impatto ambientale. Sebbene il frutto sia spesso associato a modelli alimentari salutistici e sostenibili, la sua produzione e commercializzazione possono comportare pressioni significative sugli ecosistemi, soprattutto quando l'aumento della domanda si traduce in intensificazione colturale, sfruttamento delle risorse idriche, espansione delle superfici coltivate e trasporti a lunga distanza.

Uno degli aspetti più discussi riguarda l'uso dell'acqua. L'avocado è una coltura con fabbisogni idrici rilevanti, sebbene l'entità del consumo dipenda dalle condizioni climatiche, dal tipo di suolo, dalla varietà, dal sistema irriguo e dalle pratiche agronomiche adottate. In aree caratterizzate da scarsità idrica o da forte competizione tra usi agricoli, civili ed ecosistemici, l'espansione degli impianti di avocado può accentuare tensioni ambientali e sociali. Il problema non consiste soltanto nella quantità totale di acqua impiegata, ma anche nella provenienza della risorsa, nella sua disponibilità stagionale e nell'efficienza dei sistemi di distribuzione e utilizzo.

A ciò si aggiunge l'impatto derivante dall'uso del suolo. La crescente redditività della coltura può incentivare cambiamenti di destinazione territoriale, con conversione di aree naturali o di sistemi agricoli diversificati in monocolture specializzate. Tali processi possono comportare perdita di biodiversità, semplificazione del paesaggio, maggiore vulnerabilità ecologica e aumento del rischio erosivo, soprattutto in aree collinari o montane. La sostenibilità della coltivazione dipende quindi anche dal contesto di inserimento territoriale e dalla capacità di adottare modelli agroecologici che limitino la pressione sugli ecosistemi.

Un ulteriore contributo all'impatto ambientale deriva dagli input agricoli. Fertilizzanti, fitofarmaci, energia per l'irrigazione, materiali plastici e altri mezzi tecnici incidono sia sulle emissioni di gas a effetto serra sia sulla qualità delle matrici ambientali. L'uso inefficiente di fertilizzanti può generare fenomeni di lisciviazione e eutrofizzazione, mentre la protezione fitosanitaria, se non correttamente gestita, può compromettere gli equilibri ecologici e aumentare il rischio di contaminazione. Le emissioni associate alla fase agricola dipendono dunque non solo dalla coltura in sé, ma dal modello di gestione adottato.

La dimensione logistica rappresenta un'altra componente cruciale. Gran parte degli avocado consumati nei mercati ad alto reddito percorre lunghe distanze prima di arrivare al consumatore finale. Il trasporto marittimo, pur essendo relativamente efficiente rispetto ad altre modalità, richiede tempi lunghi e una catena del freddo continua; il trasporto aereo, utilizzato in casi specifici, comporta invece

impatti emissivi molto elevati. Anche il confezionamento, la refrigerazione, la maturazione controllata e la distribuzione finale contribuiscono al carico ambientale complessivo del prodotto.
Spesso, tuttavia, l'analisi dell'impatto ambientale dell'avocado viene semplificata eccessivamente, concentrandosi su singoli indicatori o su giudizi generalizzanti. In realtà, la sostenibilità ambientale della filiera varia notevolmente in funzione del luogo di produzione, delle tecniche colturali, dell'efficienza della logistica, della distanza dai mercati, del destino degli scarti e del livello di perdita alimentare lungo la catena. Un avocado prodotto in modo efficiente, trasportato via mare e valorizzato integralmente può presentare un profilo ambientale molto diverso da quello di un prodotto proveniente da sistemi meno efficienti e destinato in parte allo spreco.
In questa prospettiva, gli scarti assumono un ruolo determinante. Ogni quota di biomassa non utilizzata o smaltita in modo inadeguato rappresenta infatti una perdita di risorse naturali, energia e lavoro già incorporati nel prodotto. Se un frutto viene coltivato con impiego di acqua, fertilizzanti, suolo ed energia, ma una parte significativa di esso diventa rifiuto senza alcuna valorizzazione, l'impronta ambientale per unità di beneficio ottenuto aumenta sensibilmente. La prevenzione delle perdite e il recupero dei sottoprodotti sono quindi strumenti fondamentali per migliorare la sostenibilità complessiva della filiera.
La gestione degli scarti organici può a sua volta generare impatti differenziati. Lo smaltimento in discarica comporta emissioni e problemi igienico-sanitari; al contrario, il compostaggio, la digestione anaerobica o il recupero di composti bioattivi consentono di ridurre gli impatti e creare valore. Anche in questo caso, la scelta tecnologica deve basarsi sulla qualità del residuo, sulla scala dell'impianto, sulla distanza dai luoghi di utilizzo e sulla fattibilità economica del recupero.
La valutazione ambientale della filiera dell'avocado dovrebbe quindi integrare indicatori multipli: consumo idrico, uso del suolo, energia, emissioni di gas serra, perdite alimentari, carico organico degli scarti e potenziale di sostituzione di materie prime vergini. Un approccio di life cycle thinking permette di evitare conclusioni semplicistiche e di individuare i punti in cui intervenire con maggior efficacia. In questo senso, l'obiettivo non è demonizzare una coltura o esaltarne acriticamente le qualità, ma comprenderne le condizioni di sostenibilità reale e le leve di miglioramento.

2.6 Economia circolare e strategie di recupero

L'economia circolare offre un quadro teorico e operativo particolarmente adatto per reinterpretare la filiera dell'avocado in chiave sostenibile. In opposizione al modello lineare fondato su estrazione, produzione, consumo e smaltimento, la circolarità punta a mantenere il valore dei materiali, dei prodotti e delle risorse il più a lungo possibile, minimizzando la generazione di rifiuti e favorendo cicli di riutilizzo, riciclo e recupero. Applicata all'avocado, tale prospettiva implica un ripensamento

complessivo della filiera, in cui gli scarti non vengano più considerati elementi residuali da eliminare, ma flussi di materia da reinserire in nuovi processi produttivi.

Il primo livello di intervento riguarda la prevenzione degli scarti. Ridurre le perdite in campo, migliorare la selezione pre-raccolta, ottimizzare le condizioni di trasporto e affinare la gestione della maturazione consente di diminuire la quantità di prodotto escluso dal consumo umano. Anche il miglioramento della previsione della domanda, la flessibilità commerciale nella gestione dei diversi gradi di maturazione e la promozione di standard estetici meno penalizzanti possono contribuire a ridurre gli sprechi. In una logica circolare, la prevenzione rappresenta sempre l'opzione preferibile rispetto al recupero a valle.

Quando la prevenzione non è sufficiente, è possibile attivare strategie di valorizzazione differenziate in funzione della qualità del materiale disponibile. I frutti fuori calibro o con lievi difetti visivi, ma ancora idonei al consumo, possono essere destinati alla trasformazione in puree, salse, oli o ingredienti alimentari. Questa scelta consente di estendere la vita utile della materia prima e di assorbire parte delle eccedenze del mercato del fresco. Inoltre, può creare nuove linee di prodotto e migliorare la resilienza economica degli operatori.

Le frazioni non edibili, in particolare buccia e seme, rappresentano il nucleo più interessante delle strategie di recupero ad alto valore aggiunto. Numerosi approcci tecnologici si concentrano sull'estrazione di composti bioattivi, quali polifenoli, flavonoidi, pigmenti e sostanze ad attività antiossidante. Tali estratti possono trovare applicazione come ingredienti funzionali, conservanti naturali, componenti per integratori, materie prime per cosmetici o ingredienti per formulazioni farmaceutiche. La valorizzazione dei composti bioattivi richiede tuttavia processi selettivi, standardizzazione della materia prima, controlli di sicurezza e una chiara definizione degli sbocchi di mercato.

Un'altra strategia consiste nel recupero della componente fibrosa e amidacea. Le farine ottenute da seme o buccia, previa essiccazione e macinazione, possono essere studiate per applicazioni nel settore alimentare, zootecnico o dei biomateriali. In ambito alimentare, il loro utilizzo deve tenere conto delle proprietà sensoriali, della digeribilità, della presenza di eventuali fattori antinutrizionali e del quadro normativo. In ambito non alimentare, tali matrici possono essere impiegate per la formulazione di materiali biodegradabili, filler naturali, supporti adsorbenti o substrati per processi fermentativi.

Particolarmente promettente è il ricorso a biotecnologie di conversione. I residui dell'avocado possono essere utilizzati come substrati per fermentazioni microbiche finalizzate alla produzione di enzimi, acidi organici, biopolimeri o biomassa microbica. Analogamente, la digestione anaerobica consente la produzione di biogas, mentre il compostaggio permette di ottenere ammendanti organici utili al miglioramento della fertilità del suolo. Queste opzioni, pur collocandosi generalmente a un

livello di valore inferiore rispetto all'estrazione di composti ad alto pregio, sono essenziali per la gestione dei flussi residui più eterogenei o deteriorati.

La valorizzazione energetica rappresenta una soluzione ulteriore, soprattutto quando i residui non sono adatti a destinazioni più nobili. Attraverso processi termochimici o biologici è possibile recuperare energia e ridurre il carico ambientale dello smaltimento. Tuttavia, in una gerarchia circolare, il recupero energetico dovrebbe essere considerato subordinato al recupero di materia, poiché comporta una perdita irreversibile di potenziale chimico e funzionale delle biomasse.

Per rendere effettiva la circolarità nella filiera dell'avocado non basta la disponibilità di tecnologie. Sono necessari modelli organizzativi, logistici capaci di mettere in connessione produttori, trasformatori, centri di ricerca e utilizzatori finali dei sottoprodotti. La concentrazione geografica dei flussi residui, la loro stagionalità, la necessità di stabilizzazione rapida e la variabilità compositiva rappresentano fattori critici. In questo senso, la creazione di piattaforme territoriali di raccolta e pretrattamento, la cooperazione tra imprese e lo sviluppo di simbiosi industriale possono favorire l'emersione di filiere secondarie economicamente sostenibili.

Un ruolo decisivo spetta inoltre all'innovazione normativa e di mercato. Molti processi di valorizzazione si scontrano con ostacoli regolatori, difficoltà di classificazione dei materiali, costi di certificazione e incertezza sugli standard di qualità. Parallelamente, la domanda di prodotti ottenuti da sottoprodotti richiede strategie di comunicazione e posizionamento che ne evidenzino sicurezza, funzionalità e vantaggi ambientali. La circolarità, infatti, non è solo un fatto tecnico, ma anche culturale e commerciale.

Da un punto di vista sistemico, la strategia più efficace appare quella della bioraffineria. In questo modello, i residui dell'avocado vengono trattati secondo una logica cascata, che privilegia dapprima il recupero di molecole ad alto valore, poi il riutilizzo delle frazioni residue per materiali o bioprocessi, e infine la valorizzazione energetica delle componenti non ulteriormente sfruttabili. Un simile approccio consente di massimizzare l'efficienza nell'uso della biomassa, distribuire meglio i costi di processo e migliorare la sostenibilità economica dell'intero sistema.

In conclusione, l'economia circolare applicata alla filiera dell'avocado non deve essere intesa come semplice gestione alternativa dei rifiuti, ma come paradigma di riorganizzazione produttiva. Riduzione delle perdite, recupero selettivo dei sottoprodotti, innovazione di processo, cooperazione tra attori e sviluppo di mercati per i materiali secondari costituiscono le principali direttrici di un modello più resiliente e sostenibile. L'avocado, proprio per l'elevata incidenza delle sue frazioni residuali e per il valore potenziale dei composti in esse contenuti, rappresenta un caso di studio particolarmente significativo per dimostrare come la transizione circolare possa trasformare una criticità in opportunità.

Capitolo 3 - Caratterizzazione dei principali scarti dell'avocado

L'interesse crescente verso la valorizzazione integrale delle biomasse agroalimentari ha posto al centro dell'attenzione scientifica le matrici residuali derivanti dalla lavorazione dell'avocado. In una prospettiva tradizionale, la parte economicamente rilevante del frutto è stata per lungo tempo identificata quasi esclusivamente con la polpa, destinata al consumo fresco o alla trasformazione industriale. Tuttavia, l'evoluzione dei modelli di ricerca e innovazione nel settore agroalimentare ha progressivamente evidenziato come le frazioni considerate scarto possano contenere composti di significativo interesse nutrizionale, tecnologico e funzionale. In tale contesto, seme, buccia e foglie dell'avocado emergono come matrici ad elevato potenziale, suscettibili di impiego in ambito alimentare, nutraceutico, cosmetico, farmaceutico, agronomico e bioenergetico.

La rilevanza di queste matrici dipende da più fattori. In primo luogo, esse costituiscono una quota consistente della biomassa complessiva associata alla coltivazione e alla trasformazione del frutto. In secondo luogo, possiedono una composizione chimica complessa, che include fibre, composti fenolici, pigmenti, sostanze aromatiche, metaboliti secondari e, in alcuni casi, molecole con attività biologica documentata o potenziale. In terzo luogo, la loro valorizzazione risponde a esigenze sempre più stringenti di sostenibilità ambientale, riduzione degli sprechi e miglioramento dell'efficienza dei sistemi produttivi.

La caratterizzazione dei principali scarti dell'avocado non può limitarsi a una descrizione compositiva. È necessario, infatti, considerare anche le proprietà bioattive, le possibili applicazioni, gli aspetti sensoriali e i limiti di impiego, poiché il reale potenziale di valorizzazione dipende dall'interazione tra qualità intrinseche della matrice, fattibilità tecnologica, sicurezza d'uso, accettabilità e sostenibilità economica. Nel presente capitolo tali aspetti verranno approfonditi separatamente per il seme, la buccia e le foglie, al fine di costruire un quadro critico e sistematico delle opportunità offerte da ciascuna di queste matrici residuali.

3.1 Seme

Il seme dell'avocado rappresenta una delle principali frazioni residuali della filiera e, allo stesso tempo, una delle matrici più interessanti. Esso costituisce una parte rilevante del peso totale del frutto e viene normalmente separato e scartato durante il consumo domestico o la trasformazione industriale. Nonostante ciò, negli ultimi anni il seme ha attirato una crescente attenzione in virtù della sua composizione chimica, della presenza di metaboliti secondari e delle possibili applicazioni innovative. La sua valorizzazione, tuttavia, richiede un'analisi attenta delle caratteristiche nutrizionali, delle proprietà funzionali, dei limiti tecnologici e degli aspetti sensoriali che ne possono condizionare l'impiego.

3.1.1 Composizione

Dal punto di vista compositivo, il seme dell'avocado si distingue nettamente dalla polpa. Mentre quest'ultima è caratterizzata da una prevalenza della frazione lipidica, il seme presenta una struttura più ricca in carboidrati complessi, fibre e composti fenolici. Il suo contenuto in umidità può risultare relativamente elevato nel materiale fresco, ma dopo essiccamento la matrice si presenta particolarmente interessante per l'elevata quota di sostanza secca. La composizione esatta varia in funzione della cultivar, del grado di maturazione, delle condizioni pedoclimatiche e dei trattamenti post-raccolta, ma nel complesso il seme può essere descritto come una matrice amidacea e fibrosa con rilevante presenza di composti bioattivi (Araújo et al., 2018).

Una componente importante è rappresentata dall'amido e, più in generale, dai polisaccaridi di riserva. Questa caratteristica rende il seme differente non solo dalla polpa, ma anche da molti altri sottoprodotti frutticoli. La presenza di carboidrati strutturati può conferire interesse per applicazioni legate alla produzione di farine, ingredienti tecnofunzionali o substrati per processi fermentativi. Accanto a ciò, il seme contiene fibra alimentare, in parte insolubile, che contribuisce alla sua struttura e al suo potenziale d'impiego in formulazioni funzionali.

Il contenuto proteico, pur non particolarmente elevato, non è trascurabile e può contribuire al valore nutrizionale della matrice se opportunamente trattata. Anche la componente lipidica, sebbene nettamente inferiore a quella della polpa, può essere presente in misura variabile. Sul piano minerale, il seme può contenere potassio, calcio, magnesio e altri elementi, la cui concentrazione dipende dalle caratteristiche del suolo e dalla fisiologia della pianta. Questi costituenti, se considerati nel loro insieme, fanno del seme una matrice più complessa di quanto suggerirebbe la sua tradizionale classificazione come rifiuto.

Particolarmente rilevante è la presenza di sostanze fenoliche e di altri metaboliti secondari. Il seme dell'avocado è stato spesso descritto come una matrice ricca di composti antiossidanti, il che ne accresce l'interesse per applicazioni ad alto valore aggiunto. Tali composti possono essere presenti in forma libera o legata alla matrice fibrosa e risultano influenzati sia dalla varietà sia dalle condizioni di estrazione.

Dal punto di vista tecnologico, occorre inoltre considerare che il seme presenta una consistenza dura, una colorazione chiara tendente al beige o al marrone chiaro dopo essiccamento, e una marcata suscettibilità a fenomeni di imbrunimento ossidativo quando viene tagliato o macinato. Queste proprietà fisiche influenzano i processi di trasformazione e la stabilità del prodotto ottenuto. Di conseguenza, la composizione del seme deve essere interpretata insieme alle sue caratteristiche strutturali, poiché entrambe incidono sulle opportunità di valorizzazione.

3.1.2 Proprietà biologiche

L'interesse per il seme dell'avocado è fortemente legato alle sue proprietà biologiche. Le ricerche condotte su questa matrice hanno evidenziato la presenza di composti potenzialmente capaci di esercitare attività antiossidante, antimicrobica e, in termini più generali, funzionale. Sebbene la portata di tali proprietà dipenda da numerosi fattori e richieda una valutazione rigorosa in relazione alla sicurezza e alla biodisponibilità, il seme si configura come una fonte promettente di molecole bioattive.

L'attività antiossidante è la proprietà più frequentemente associata al seme. Essa deriva in larga misura dalla presenza di composti fenolici, che possono contribuire alla neutralizzazione dei radicali liberi e alla protezione delle matrici biologiche o alimentari dai processi ossidativi. Da un punto di vista applicativo, questa caratteristica può risultare utile sia per lo sviluppo di ingredienti funzionali destinati al consumo umano sia per l'utilizzo di estratti naturali come stabilizzanti in formulazioni alimentari. La capacità antiossidante del seme appare di particolare interesse in un'epoca in cui si ricerca la sostituzione di additivi sintetici con composti naturali ottenuti da sottoprodotti.

Oltre all'attività antiossidante, il seme può mostrare proprietà antimicrobiche nei confronti di alcuni microrganismi aprendo a possibili utilizzi come fonte di estratti con funzione conservante o come componente di formulazioni bioattive. L'attività antimicrobica non può tuttavia essere generalizzata, poiché dipende dalla concentrazione, dal tipo di estratto, dal solvente impiegato e dalla specie microbica considerata.

Un ulteriore profilo di interesse riguarda il potenziale effetto del seme sul mantenimento della stabilità degli alimenti. Alcuni studi hanno suggerito che gli estratti di seme potrebbero contribuire a rallentare fenomeni di ossidazione lipidica, alterazioni cromatiche o degradazioni di natura proteica in diversi sistemi alimentari. Questo rende il seme particolarmente interessante non solo dal punto di vista nutrizionale, ma anche come fonte di ingredienti tecnologicamente utili. In questo caso, la proprietà bioattiva si traduce in una funzione applicativa concreta, in grado di collegare la ricerca di base all'innovazione di prodotto (Guzmán-Rodríguez et al. 2022).

Va inoltre considerato che il seme può contenere composti che, pur essendo bioattivi, possono presentare limiti di impiego se assunti in quantità elevate o in forma non adeguatamente trattata. La valutazione delle proprietà bioattive deve quindi sempre accompagnarsi a un'attenta analisi tossicologica e normativa. Non ogni presenza di metaboliti secondari corrisponde infatti a un vantaggio immediato per il consumo umano. Proprio per questo motivo, le potenzialità salutistiche del seme devono essere interpretate in un quadro scientifico prudente, fondato sulla distinzione tra attività rilevate in vitro e reale applicabilità negli alimenti o negli integratori.

Il seme contiene una quantità variabile di grassi nella sua composizione (3-15%) costituita da acidi grassi insaturi. I carboidrati costituiscono una parte significativa del peso (42-81%) e la maggior parte sono costituiti da fibre. Contiene anche una quantità modesta di proteine (0,14-9%), ma la sua percentuale rispetto al peso totale è relativamente bassa. Quindi, i semi di avocado sono generalmente più ricchi di grassi e carboidrati rispetto alle proteine. Il seme di avocado può contenere anche alcuni minerali essenziali (1,3-4,3 %) come calcio, potassio, magnesio, rame e fosforo. Inoltre, anche se in quantità minori, il seme può contenere alcune vitamine, come la vitamina E.

3.1.3 Possibili applicazioni

Le possibili applicazioni del seme dell'avocado sono molteplici e riflettono la natura polifunzionale della matrice. Una prima area di interesse riguarda il settore alimentare, in cui il seme può essere valorizzato sotto forma di farina, polvere o estratto. La produzione di farine da seme essiccato e macinato potrebbe consentire l'impiego della matrice in formulazioni da forno, snack, prodotti funzionali o miscele ad alto contenuto di fibra. Tuttavia, l'utilizzo diretto in alimenti richiede una valutazione accurata della sicurezza, del profilo sensoriale e della compatibilità tecnologica con la matrice finale.

Una seconda area riguarda l'estrazione di composti bioattivi. Attraverso processi di estrazione convenzionali o innovativi è possibile ottenere frazioni arricchite in polifenoli e altre sostanze di interesse. Tali estratti possono essere destinati al settore nutraceutico, alla formulazione di integratori o all'impiego come ingredienti naturali ad attività antiossidante.

Nel settore cosmetico, gli estratti di seme potrebbero trovare applicazione in prodotti destinati alla protezione della pelle o alla formulazione di cosmetici naturali, in virtù della presenza di composti ad azione antiossidante. Analogamente, in ambito farmaceutico o parafarmaceutico, il seme potrebbe essere studiato come fonte di molecole bioattive da impiegare in preparazioni specifiche, purché supportate da adeguata validazione scientifica.

Un'ulteriore prospettiva di impiego riguarda i processi biotecnologici. Grazie al contenuto in carboidrati complessi e sostanza organica, il seme può essere utilizzato come substrato per fermentazioni o conversioni microbiche finalizzate alla produzione di composti di interesse industriale. In alternativa, la biomassa residua può essere destinata a compostaggio o digestione anaerobica per la produzione di ammendanti o biogas. Sebbene queste applicazioni si collochino su un livello di valore inferiore rispetto al recupero di composti ad alto pregio, esse restano importanti nella gestione integrata della matrice, soprattutto quando le caratteristiche qualitative non consentono usi più nobili.

Da ultimo, il seme può essere considerato come materia prima per materiali bio-based, adsorbenti naturali o ingredienti per packaging biodegradabile. In questo caso la valorizzazione non avviene in ambito alimentare diretto, ma nel quadro più ampio della bioeconomia circolare. Il reale sviluppo di tali applicazioni dipenderà dalla capacità di standardizzare la materia prima, ottimizzare i processi e costruire mercati per i prodotti derivati (Guzmán-Rodríguez et al. 2022).

3.1.4 Aspetti sensoriali e limiti di impiego

Nonostante il notevole potenziale compositivo e funzionale, il seme dell'avocado presenta alcuni limiti che ne condizionano l'impiego. Uno dei principali è rappresentato dal profilo sensoriale. La matrice può infatti presentare gusto amaro, astringenza marcata e note aromatiche non sempre gradite, soprattutto quando viene incorporata direttamente in alimenti. Tali caratteristiche sono correlate alla presenza di composti fenolici e altri metaboliti secondari, che da un lato conferiscono bioattività, ma dall'altro possono compromettere l'accettabilità sensoriale del prodotto finale.

Anche l'aspetto visivo può costituire un limite. La polvere o la farina ottenuta dal seme può presentare colorazioni che tendono a scurirsi a seguito di ossidazione, influenzando negativamente l'aspetto del prodotto in cui viene incorporata. Inoltre, la tessitura della matrice può risultare poco favorevole in alcune applicazioni, soprattutto se la granulometria non è adeguatamente controllata. Di conseguenza, l'impiego diretto del seme in alimenti richiede spesso trattamenti di stabilizzazione, raffinazione o mascheramento sensoriale.

Un ulteriore limite riguarda la sicurezza d'uso. La presenza di composti bioattivi impone una valutazione rigorosa della dose, della biodisponibilità e della possibile presenza di sostanze indesiderate o antinutrizionali. Non tutte le matrici naturali ricche di composti secondari sono automaticamente sicure per il consumo in qualsiasi forma e quantità. Da ciò deriva la necessità di studi approfonditi, sia chimici sia tossicologici, prima di proporre il seme come ingrediente per alimenti o integratori.

Sul piano tecnologico, la durezza del seme e la necessità di essiccamento e macinazione possono comportare costi energetici e complessità operative non trascurabili. La convenienza economica del recupero dipende dunque non soltanto dal valore potenziale dei composti presenti, ma anche dalla fattibilità industriale dei processi necessari per renderli disponibili. Inoltre, la variabilità compositiva tra cultivar e lotti può rendere difficile la standardizzazione della materia prima.

Pertanto, il seme dell'avocado deve essere considerato una matrice promettente ma complessa. Il suo impiego richiede strategie mirate di trattamento e valorizzazione, capaci di ridurne i limiti sensoriali e garantire sicurezza, stabilità e riproducibilità. Solo in questo modo il suo potenziale potrà tradursi in reali applicazioni industriali.

3.2 Buccia

La buccia dell'avocado rappresenta una frazione residuale inevitabilmente generata sia nel consumo domestico sia, soprattutto, nei processi di trasformazione industriale. Se in passato essa è stata considerata un semplice involucro protettivo privo di interesse economico, oggi viene sempre più studiata come matrice ricca di sostanze bioattive e componenti strutturali potenzialmente valorizzabili. La sua composizione, le sue proprietà biologiche e le applicazioni possibili ne fanno uno scarto di particolare rilevanza nell'ottica della sostenibilità e della bioeconomia circolare.

3.2.1 Composizione

Dal punto di vista compositivo, la buccia dell'avocado si distingue per una struttura fibrosa e per la presenza di numerosi composti localizzati negli strati epidermici e subepidermici. La sua funzione biologica primaria è quella di proteggere la polpa dalle aggressioni esterne, dalla disidratazione, dagli urti e dagli attacchi microbici. Questa funzione si riflette nella composizione della matrice, che presenta polisaccaridi strutturali, pigmenti, sostanze fenoliche e altri metaboliti secondari con ruolo difensivo.

La componente fibrosa risulta particolarmente significativa. La buccia contiene cellulosa, emicellulose, lignina e altri polisaccaridi che le conferiscono consistenza e resistenza. Tali caratteristiche la rendono interessante non solo sotto il profilo nutrizionale, se opportunamente trattata, ma anche per applicazioni in materiali biodegradabili o in formulazioni dove sia richiesta una componente strutturante. La quota di fibra può variare in funzione della cultivar e del grado di maturazione, ma in generale si mantiene elevata rispetto alla polpa.

Oltre alla fibra, la buccia contiene una frazione rilevante di composti fenolici. Questi metaboliti, spesso concentrati nelle parti più esterne del frutto, possono svolgere una funzione protettiva contro stress ambientali e attacchi biologici. La loro presenza contribuisce all'attività antiossidante della matrice e ne accresce l'interesse per il recupero di ingredienti naturali. La buccia può inoltre contenere pigmenti, cere cuticolari e altre sostanze superficiali che influenzano sia le proprietà tecnologiche sia il comportamento in estrazione.

Anche il contenuto minerale può essere degno di nota, sebbene inferiore, in termini di interesse diretto, rispetto alla componente fenolica e fibrosa. Come per altre matrici residuali, la composizione della buccia è influenzata da fattori varietali, ambientali e fisiologici. Le bucce di cultivar diverse possono differire per spessore, rugosità, colore, consistenza e profilo chimico, il che implica la necessità di una caratterizzazione specifica quando si vogliano ipotizzare applicazioni industriali (Muhammad et al. 2025).

Dal punto di vista della stabilità, la buccia può essere soggetta a degradazione e contaminazione se non viene rapidamente trattata dopo la separazione dal frutto. Questo aspetto è particolarmente importante nei processi di valorizzazione, poiché la qualità della materia prima condiziona la resa e la qualità degli estratti o dei prodotti ottenuti. La composizione della buccia, dunque, non può essere considerata in astratto, ma in relazione alle condizioni di raccolta, conservazione e processamento.

3.2.2 Proprietà biologiche

La buccia dell'avocado è una matrice di particolare interesse per la presenza di composti ad attività bioattiva. La concentrazione di sostanze fenoliche e di altri metaboliti secondari conferisce alla buccia un potenziale rilevante come fonte di ingredienti naturali destinati a differenti usi. Dal punto di vista biologico, tali composti possono contribuire alla protezione contro lo stress ossidativo e, in alcuni casi, esercitare effetti antimicrobici o funzionali (Castro-López et al. 2019).

L'attività antiossidante della buccia deriva soprattutto dalla presenza di polifenoli, flavonoidi e altre molecole capaci di interagire con specie reattive dell'ossigeno. In ambito alimentare, questa proprietà potrebbe essere sfruttata per sviluppare estratti naturali da utilizzare come conservanti o stabilizzanti, contribuendo a rallentare l'ossidazione di grassi, pigmenti e altri costituenti sensibili. La possibilità di ottenere antiossidanti naturali da una matrice residuale rappresenta un vantaggio sia economico sia ambientale, poiché consente di sostituire o integrare additivi di sintesi attraverso il recupero di una biomassa altrimenti destinata allo smaltimento.

La buccia può inoltre presentare attività antimicrobiche o inibenti nei confronti di alcuni microrganismi. Come già osservato per il seme, tali effetti dipendono dal tipo di estrazione, dalla composizione specifica del campione e dal microrganismo target.

Da un punto di vista più ampio, la bioattività della buccia può essere valutata anche in relazione all'impiego in formulazioni cosmetiche o dermocosmetiche, dove gli estratti ricchi in antiossidanti naturali sono particolarmente apprezzati. L'interesse in questo settore deriva non solo dall'efficacia biologica potenziale, ma anche dall'origine vegetale e dal legame con pratiche di upcycling, sempre più rilevanti nella comunicazione di sostenibilità dei prodotti.

La buccia di avocado è principalmente composta da carboidrati (43-81%) sotto forma di fibre costituita da cellulosa (28%), emicellulosa (25%) e lignina (4%), e acqua. Contiene una piccola quantità di grassi (2-9%), che contribuiscono alla sua composizione complessiva. Anche se in quantità limitata, contiene alcune proteine (0,17-8 %), vitamine, tra cui la vitamina E, nota per le sue proprietà antiossidanti e minerali, come potassio, magnesio e calcio.

3.2.3 Possibili applicazioni

Le possibili applicazioni della buccia dell'avocado si distribuiscono su più ambiti, dal recupero di composti ad alto valore aggiunto fino agli usi agronomici ed energetici. Una delle prospettive più interessanti è rappresentata dall'estrazione di antiossidanti naturali. Gli estratti di buccia, ottenuti con differenti tecniche, possono essere impiegati come ingredienti in alimenti funzionali, integratori, cosmetici o sistemi conservanti naturali. Questo tipo di applicazione appare particolarmente promettente nei contesti in cui si ricerca la sostituzione di ingredienti sintetici con alternative naturali e sostenibili.

Un'altra possibilità riguarda l'impiego della buccia essiccata e macinata come fonte di fibra. In linea teorica, la matrice potrebbe essere studiata come ingrediente funzionale in formulazioni alimentari ad alto contenuto di fibra. Tuttavia, l'impiego diretto richiede particolare attenzione per i limiti sensoriali, la sicurezza microbiologica e l'eventuale presenza di composti che possano influire negativamente sul gusto o sulla biodisponibilità dei nutrienti. Per questo motivo, l'utilizzo della buccia in alimenti è più plausibile quando la matrice viene sottoposta a processi di raffinazione o quando i suoi componenti vengono recuperati selettivamente.

Nel campo dei biomateriali, la buccia offre interessanti prospettive grazie al suo contenuto in polisaccaridi strutturali. Essa può essere utilizzata come rinforzo in materiali biodegradabili, come componente di film edibili o biodegradabili, oppure come materia prima per la produzione di composti a base biologica. In questo caso, la valorizzazione avviene in un ambito non food, ma altamente coerente con le strategie di economia circolare.

Sul piano agronomico, la buccia può essere destinata a compostaggio o a processi di conversione biologica per la produzione di ammendanti. Se trattata in modo appropriato, contribuisce al riciclo della sostanza organica e alla chiusura del ciclo dei nutrienti. Analogamente, la digestione anaerobica può rappresentare una soluzione per il recupero energetico della frazione non ulteriormente valorizzabile.

Infine, la buccia può trovare impiego come sorgente di pigmenti naturali o come substrato per applicazioni biotecnologiche. Anche se alcune di queste prospettive sono ancora in fase esplorativa, esse testimoniano la versatilità della matrice e la necessità di superare la sua tradizionale classificazione come rifiuto privo di utilità.

3.2.4 Aspetti sensoriali e limiti di impiego

Tra i principali limiti della buccia dell'avocado vi sono gli aspetti sensoriali. La matrice presenta in genere una tessitura coriacea e un profilo gustativo poco favorevole al consumo diretto. Il gusto può essere amaro o astringente, mentre l'aroma non sempre risulta neutro o piacevole. Inoltre, il colore

della buccia, spesso scuro o soggetto a variazioni durante il trattamento, può costituire un vincolo nelle applicazioni alimentari dove l'aspetto visivo del prodotto finale è un parametro determinante.
La buccia può anche presentare una superficie ricca di residui, cere o contaminanti ambientali, il che richiede procedure di pulizia e sanificazione particolarmente accurate prima di qualsiasi uso alimentare o cosmetico. Questo aspetto incide sulla complessità e sui costi del processo di valorizzazione. Inoltre, la composizione della buccia può essere eterogenea, sia tra varietà diverse sia all'interno dello stesso lotto, rendendo più difficile la standardizzazione.
Un ulteriore limite riguarda la possibile presenza di composti che, pur contribuendo alla bioattività, possono avere effetti indesiderati sul gusto, sulla digeribilità o sulla sicurezza. Anche in questo caso, la valorizzazione della buccia richiede una selezione attenta delle tecnologie di trattamento, in modo da massimizzare i vantaggi e ridurre i fattori limitanti.
Sul piano economico, la convenienza del recupero dipende dalla scala di produzione, dalla concentrazione dei flussi residuali e dalla disponibilità di tecnologie adeguate. La buccia è spesso generata in grandi quantità nella trasformazione industriale, il che rappresenta un vantaggio logistico; tuttavia, la sua rapida deperibilità e la necessità di stabilizzazione possono costituire ostacoli pratici.
Nel complesso, la buccia dell'avocado è una matrice ricca di potenzialità ma non priva di criticità. La chiave della sua valorizzazione risiede nell'individuazione dell'applicazione più coerente con le sue caratteristiche chimiche, fisiche e sensoriali, evitando impieghi forzati e puntando su filiere di recupero realmente sostenibili.

3.3 Foglie

Le foglie dell'avocado costituiscono una matrice residuale spesso trascurata nelle analisi di filiera, poiché non derivano direttamente dalla separazione del frutto durante il consumo o la trasformazione, ma dalle pratiche di gestione agronomica, potatura e manutenzione della chioma. Nonostante ciò, esse rappresentano un materiale di notevole interesse scientifico, soprattutto per la presenza di composti aromatici e bioattivi che le distinguono sia dal seme sia dalla buccia. In alcuni contesti tradizionali le foglie di avocado sono già state impiegate per usi domestici o erboristici, ma la loro valorizzazione in chiave moderna richiede una caratterizzazione rigorosa e una valutazione delle opportunità e dei limiti di impiego.

3.3.1 Composizione

Le foglie dell'avocado presentano una composizione profondamente diversa rispetto alle altre matrici residuali del frutto. Trattandosi di un organo vegetativo, esse contengono componenti strutturali tipici dei tessuti fogliari, come cellulosa, emicellulose e lignina, ma anche una quota rilevante di composti

secondari coinvolti nella fisiologia della pianta, nella difesa e nella comunicazione chimica. La composizione varia sensibilmente in funzione della cultivar, dell'età della foglia, della stagione, delle condizioni ambientali e delle tecniche colturali.

Dal punto di vista chimico, le foglie possono contenere composti fenolici, flavonoidi, terpeni, sostanze volatili aromatiche, pigmenti fotosintetici e minerali. Questa ricchezza compositiva spiega il crescente interesse nei confronti della matrice, soprattutto per applicazioni legate alla funzionalità biologica e al profilo sensoriale. A differenza di seme e buccia, nelle foglie la componente aromatica riveste un ruolo particolarmente importante, poiché può determinare note odorose distintive e potenzialmente valorizzabili.

Tra gli acidi organici possono essere presenti: acido citrico, acido malico, acido ossalico, acido ascorbico. Gli acidi organici, come l'acido citrico e l'acido malico, possono conferire un sapore acidulo alle foglie. Questo sapore può variare da leggermente aspro a più dolce, a seconda della proporzione degli acidi presenti oppure possono influenzare la stabilità delle foglie, ad esempio, possono svolgere un ruolo nella protezione della pianta da patogeni o insetti, agendo come agenti antimicrobici o repellenti. Sono state oggetto di interesse per le loro possibili proprietà medicinali in alcune tradizioni popolari. Le molecole che conferiscono alle foglie di avocado tali proprietà sono per lo più i polifenoli, composti naturali che hanno dimostrato avere diversi benefici sulla salute umana

Le foglie contengono inoltre acqua in misura significativa quando fresche, il che rende necessaria una corretta stabilizzazione per preservarne i composti di interesse. L'essiccamento, se ben gestito, consente di ridurre l'umidità e di ottenere una matrice più stabile, adatta a successive analisi o applicazioni. Tuttavia, trattamenti non ottimali possono alterare la composizione volatile e compromettere parte delle proprietà sensoriali e funzionali.

Una caratteristica particolarmente rilevante delle foglie è la presenza di composti aromatici specifici, che possono variare tra cultivar e conferire profili odorosi riconducibili a note erbacee, balsamiche, speziate o di anice. Questa variabilità rende le foglie un materiale interessante per studi finalizzati alla valorizzazione sensoriale e alla differenziazione varietale.

3.3.2 Proprietà biologiche

Le foglie dell'avocado sono considerate una fonte promettente di composti bioattivi. Tra le proprietà maggiormente studiate figura l'attività antiossidante, attribuibile alla presenza di polifenoli, flavonoidi e altri metaboliti secondari. Tale attività può rendere le foglie interessanti per applicazioni come ingredienti funzionali, estratti naturali o componenti di preparazioni erboristiche.

Alcuni dei composti bioattivi presenti nelle foglie di avocado includono:

- Flavonoidi: noti per le loro proprietà antiossidanti, antinfiammatorie e antitumorali;
- Triterpeni: sono composti che si trovano anche nelle foglie di avocado e hanno dimostrato attività antiossidante e antinfiammatoria in alcuni studi. Questi composti possono contribuire alle proprietà protettive delle foglie;
- Composti fenolici: come l'acido clorogenico, sono presenti nelle foglie di avocado e possono avere proprietà antiossidanti e antinfiammatorie. L'acido clorogenico, in particolare, è noto per il suo potenziale benefico sulla salute cardiovascolare;
- Alcaloidi: Alcuni alcaloidi possono essere presenti nelle foglie di avocado. Tuttavia, la loro concentrazione può variare e potrebbe essere influenzata dalla varietà di avocado;
- Acidi grassi essenziali: come l'acido linoleico, presenti nelle foglie di avocado, possono avere effetti positivi sulla salute, inclusa l'attività antinfiammatoria.

L'interesse per la bioattività delle foglie è rafforzato dalla loro composizione aromatica, che può essere associata non solo a qualità sensoriali, ma anche alla presenza di molecole biologicamente attive. In alcuni casi, i composti volatili possono contribuire a effetti funzionali o essere considerati marcatori di qualità della matrice. Le foglie possono inoltre presentare attività antimicrobiche o altre potenziali funzionalità biologiche, la cui intensità dipende dalla varietà e dal metodo di estrazione.
Va però sottolineato che la valutazione delle proprietà bioattive delle foglie richiede particolare cautela. La presenza di composti attivi non implica automaticamente l'idoneità al consumo o all'uso indiscriminato. Come per tutte le matrici vegetali ricche di metaboliti secondari, è necessario valutare attentamente il profilo tossicologico, la dose, la stabilità e il contesto applicativo.
Dal punto di vista della ricerca, le foglie dell'avocado risultano particolarmente interessanti perché combinano bioattività e identità aromatica. Questa duplice natura le rende candidate ideali per lo sviluppo di prodotti a valenza funzionale percepibile anche sul piano sensoriale, come tisane, infusi o estratti aromatici. La valorizzazione delle foglie, dunque, potrebbe avvenire non soltanto in funzione della loro composizione chimica, ma anche del loro potenziale esperienziale per il consumatore.

3.3.3 Possibili applicazioni

Tra le possibili applicazioni delle foglie di avocado, un ruolo di primo piano è occupato dagli infusi e dalle tisane. Il profilo aromatico di alcune varietà, caratterizzato da note fresche, erbacee, balsamiche o anisate, può rendere le foglie particolarmente adatte a formulazioni per bevande funzionali o aromatiche. In questo ambito, la combinazione tra aroma e presenza di composti bioattivi rappresenta un vantaggio competitivo importante.

Oltre al suo valore nutrizionale, le foglie di avocado vengono ampiamente utilizzate nella medicina tradizionale di molti paesi africani per vari scopi. In alcune culture, è possibile utilizzare le foglie di avocado crude, tostate e tritate come aromatizzanti nelle insalate o minestre iniziando con una piccola quantità come una foglia o un cucchiaino di polvere di foglie. Le foglie di avocado, simili alle foglie di banana e ad altre foglie grandi e robuste, possono essere utilizzate come involucro per cucinare alimenti. Vengono riscaldate per renderle flessibili e avvolgere alimenti come carne, pesce e riso creando un involucro naturale che trattiene umidità e aromi durante la cottura. Dopo l'avvolgimento, gli alimenti sono cotti al forno o sulla griglia. Questo metodo, oltre a conferire un aroma erbaceo e un sapore unico agli alimenti, può essere una pratica sostenibile in quanto elimina la necessità di utilizzare carta stagnola o altri materiali di imballaggio, riducendo così i rifiuti. Altri modi per consumarle è utilizzarle per la preparazione del tè, in quanto sembrano migliorare la digestione e alleviare i disturbi gastrointestinali. Nella medicina tradizionale e popolare vengono infatti utilizzate sotto forma di infusi ed estratti idroalcolici per le loro proprietà biologiche, come le attività antiossidanti, ipoglicemizzanti, analgesiche e antinfiammatorie.

Un secondo ambito di applicazione riguarda il settore nutraceutico e degli integratori. Le foglie potrebbero essere valorizzate come fonte di estratti ricchi in composti fenolici o antiossidanti, da impiegare in formulazioni specifiche.

Nel settore alimentare, le foglie potrebbero essere studiate come aromatizzanti naturali o come fonte di estratti per conferire note sensoriali caratteristiche a determinate preparazioni. Tale prospettiva appare interessante soprattutto nelle cultivar che presentano profili aromatici peculiari e gradevoli. In alternativa, le foglie possono essere impiegate in applicazioni non food, ad esempio in cosmetica naturale o come fonte di sostanze aromatiche per prodotti da benessere.

Come per le altre matrici residuali, anche le foglie possono essere inserite in processi di valorizzazione a cascata. Dopo il recupero di composti aromatici o bioattivi, la biomassa residua potrebbe essere destinata a compostaggio, estrazione di fibre o conversione energetica. Questo approccio consente di massimizzare l'efficienza d'uso della materia prima e di ridurre la quota di residuo finale.

Le foglie presentano inoltre il vantaggio di derivare da operazioni colturali ordinarie, come la potatura, e quindi di costituire un flusso residuale relativamente prevedibile. Se opportunamente raccolte e trattate, potrebbero diventare una risorsa stabile per filiere secondarie dedicate.

3.3.4 Aspetti sensoriali e limiti di impiego

Le foglie dell'avocado presentano un interesse sensoriale superiore rispetto a molte altre matrici residuali, ma anche in questo caso non mancano limiti di impiego. Il loro profilo aromatico può essere piacevole e distintivo in alcune varietà, ma meno armonico o più intenso in altre. Ciò significa che la valorizzazione sensoriale delle foglie deve necessariamente basarsi su un'accurata selezione varietale e su un'analisi delle preferenze dei consumatori. Le foglie di avocado contengono oli essenziali che contribuiscono al profumo caratteristico della pianta. I fattori ambientali come la luce solare, la temperatura, l'umidità e la qualità del suolo, possono stimolare la produzione di oli essenziali. Inoltre, gli oli essenziali presenti nelle foglie delle piante, inclusi gli avocado, hanno spesso una funzione biologica importante, in particolare come meccanismo di difesa contro attacchi di insetti e patogeni.
Tra gli aspetti sensoriali positivi si possono includere freschezza aromatica, note erbacee, speziate o di anice, e una certa riconoscibilità olfattiva che può costituire un elemento di differenziazione del prodotto. Tuttavia, l'intensità aromatica può anche trasformarsi in un limite, soprattutto quando alcune note risultano troppo marcate, medicinali o non familiari al consumatore. Analogamente, eventuali sensazioni amare o astringenti possono ridurre l'accettabilità della matrice in applicazioni alimentari dirette.
Sul piano della sicurezza, le foglie richiedono una valutazione ancora più attenta rispetto a seme e buccia, poiché la presenza di metaboliti secondari nei tessuti vegetativi può includere sostanze non sempre adatte al consumo regolare senza appropriata validazione. L'uso in tisane, infusi o integratori deve pertanto basarsi su dati scientifici solidi, sia in termini compositivi sia tossicologici.
Un altro limite riguarda la standardizzazione del materiale. Le foglie possono differire notevolmente per età, esposizione, stagione di raccolta e stato fisiologico, con conseguente variabilità nella composizione aromatica e bioattiva. Questa eterogeneità costituisce una sfida per la costruzione di filiere industriali affidabili. Anche i metodi di essiccamento e conservazione influenzano profondamente la qualità finale, rendendo necessario lo sviluppo di protocolli specifici. alcune parti della pianta possono contenere composti potenzialmente tossici. La persina è una tossina fungicida che si trova nelle foglie e nei frutti di alcune piante del genere Persea, tra cui l'avocado (Oelrichs et al. 1995).
Nonostante tali criticità, le foglie dell'avocado appaiono tra le matrici residuali più interessanti in ottica di innovazione, in quanto associano bioattività, caratterizzazione sensoriale distintiva e potenziale di applicazione ad alto valore percepito. La loro valorizzazione richiede tuttavia rigore scientifico, selezione accurata e un approccio prudente alla definizione degli usi alimentari.

Capitolo 4. Effetti dell'essiccamento sull'aroma e sulle proprietà sensoriali della farina di semi di avocado come aromatizzante alimentare

Negli ultimi anni, la coltivazione di avocado (*Persea americana* Mill.) si è notevolmente ampliata nei paesi dell'area mediterranea, spinta dalla crescente domanda globale e dalle favorevoli condizioni agroclimatiche (Carceles Rodríguez et al., 2023). Questa rapida espansione ha portato a un aumento sostanziale della trasformazione dell'avocado e quindi dei suoi sottoprodotti (Tesfaye et al., 2022), che rimangono in gran parte poco utilizzati nonostante il loro promettente potenziale nutrizionale, funzionale e bioattivo (Feliz-Jimenez & Sanchez-Rosario, 2024; Marra et al., 2024; Otero-Guzman & Andrade-Pizarro, 2025). Tra i sottoprodotti dell'avocado, i semi costituiscono circa il 20-26% del peso totale del frutto (Dabas et al., 2013), e sono particolarmente ricchi di amido (fino al 60 - 70%) e fibra alimentare; essi, inoltre, contengono un'ampia gamma di molecole bioattive, inclusi polifenoli, carotenoidi, tocoferoli e fitosteroli (Jimenez et al., 2021), che sono stati associati a diversi benefici per la salute. Studi recenti hanno incorporato polvere di semi di avocado di dimensioni nanometriche nello yogurt, riportando aumenti nel contenuto di ceneri, carboidrati e fibre alimentari, insieme a livelli più elevati di polifenoli e attività antiossidante che hanno supportato la crescita di ceppi probiotici selezionati (Elsayed & Elsayed, 2024). Inoltre, la polvere di semi di avocado è stata proposta come sostituto parziale della farina di frumento, migliorando notevolmente il contenuto di fibre e di polifenoli, così come l'attività antiossidante di snack, pane e altri prodotti a base di cereali (Nyakang'I et al., 2023; Siol & Sadowska, 2023). Inoltre, il potenziale del seme dell'avocado è stato evidenziato nella scoperta di nuovi farmaci per la prevenzione e il trattamento del cancro, delle malattie microbiche, delle malattie infiammatorie, del diabete e delle malattie cardiovascolari (Bhuyan et al., 2019). Nonostante la vasta gamma di potenziali applicazioni alimentari, grazie all'elevato contenuto di amido e fibre alimentari (Charles et al., 2022), e alla loro capacità di sviluppo funzionale degli alimenti grazie alla ricchezza di composti bioattivi (Fufa et al., 2025a), i semi di avocado sono ancora in gran parte scartati o riciclati per usi di basso valore come mangimi per animali o fertilizzanti agricoli. Una strategia innovativa e ancora inesplorata per la valorizzazione dei semi di avocado potrebbe risiedere nel loro potenziale utilizzo come agenti aromatizzanti. Infatti, grazie al loro profilo volatile distintivo, i semi di questo frutto hanno il potenziale di essere utilizzati come agenti aromatizzanti naturali negli alimenti processati (Zhang et al., 2025). Arango et al. (2025) hanno riportato la presenza di volatili terpenici e sesquiterpenici nei semi freschi di avocado, suggerendo un profilo olfattivo teorico caratterizzato da note legnose e balsamiche. Spada et al. (2020) e Ravindran et al. (2020) hanno dimostrato che il seme di giaca, dopo specifici trattamenti termici, può essere usato per conferire un intenso aroma di cioccolato. Recentemente, Chen et al. (2025) hanno caratterizzato i profili fenolici, la composizione chimica e i composti volatili della polpa, dei semi e

della buccia dei frutti di avocado non lavorati di diverse varietà coltivate in Nuova Zelanda. In precedenza, Bayomy et al. (2023) hanno indagato la composizione volatile dei semi di avocado Hass dopo la tostatura a 180 °C per 30 minuti. Ad oggi, il profilo volatile dei semi di avocado essiccati non è ancora stato completamente indagato. Infatti, studi precedenti si sono concentrati principalmente sull'essiccazione dei semi di avocado per preservarne i composti bioattivi o per facilitarne la macinazione in farina da utilizzare come ingredienti funzionali (Babiker et al., 2021; Figueroa et al., 2025; Fufa et al., 2025b). Tuttavia, il processo termico modula reazioni chimiche chiave, tra cui le reazioni di Maillard, l'ossidazione lipidica, la caramellizzazione e la trasformazione di composti fenolici (Wang et al., 2022), influenzando così in modo significativo il profilo volatile e la percezione del sapore. Alla luce di quanto detto, il presente studio indaga come diverse tecnologie di essiccazione e l'intensità del processo influenzino il profilo volatile e la qualità sensoriale dei semi di avocado della cultivar Pinkerton, con l'obiettivo di produrre una farina di semi di avocado con un profilo aromatico desiderabile, adatto all'uso come ingrediente aromatizzante naturale. Per raggiungere questo obiettivo, è stato adottato un approccio incentrato sulla valutazione dell'aroma, integrando la diversi processi di essicazione, la volatilomica mediante HS-SPME-GC-MS, l'analisi descrittiva quantitativa con panel formato da esperti e i test di accettabilità da parte dei consumatori. L'avocado Pinkerton è una cultivar ibrida ampiamente coltivata e agronomicamente stabile, caratterizzata da un periodo di fioritura prolungato, che porta a una finestra di allegagione estesa, tipicamente compresa tra novembre e febbraio in Sicilia. I suoi frutti mostrano caratteristiche fisico-chimiche idonee a diverse applicazioni di trasformazione, inclusa l'estrazione dell'olio. Tuttavia, a differenza della cultivar Hass ampiamente studiata, sia i frutti sia i sottoprodotti di Pinkerton hanno ricevuto una limitata attenzione scientifica, supportando ulteriormente la rilevanza dello studio di questa varietà. Nell'ambito di un modello di economia circolare, questa ricerca è destinata a supportare la valorizzazione dei semi di avocado come sottoprodotto ed esplorare il loro potenziale come ingrediente naturale sostenibile e di alto valore per l'industria alimentare.

4.1. Materiali e metodi

4.1.1 Campionamento

I frutti di avocado della varietà Pinkerton, provenienti da un frutteto situato nel nord-est della Sicilia (Italia), sono stati acquistati da un fruttivendolo locale in tre occasioni separate tra novembre e dicembre 2024. I frutti presentavano una morfologia a forma di pera e un peso individuale compreso tra 200 e 230 g. Erano caratterizzati da un esocarpo sottile di colore verde intenso che racchiudeva un mesocarpo giallo-verde e cremoso e semi di dimensioni medie. All'arrivo in laboratorio, venti

frutti sono stati selezionati dal lotto in base alla consistenza, alla colorazione uniforme verde intenso della buccia e all'assenza di ammorbidimenti esterni, tutti indicatori di una fase precoce della maturazione. I semi sono stati separati con cura dal mesocarpo, risciacquati sotto un flusso continuo di acqua corrente e tamponati con un panno di carta. Per standardizzare sia lo spessore delle fette sia l'area superficiale esposta, i semi sono stati rapidamente affettati in dischi di circa 1 mm di spessore utilizzando una affettatrice in acciaio inox (Fackelmann, 32 × 12,45 × 3,73 cm, modello 45.331), garantendo un'area di trasferimento del calore costante tra i trattamenti (Maskan, 2000). Per le prove di essiccazione, i dischi sono stati divisi casualmente in sei aliquote di circa 60 g ciascuna e immediatamente processati per minimizzare le reazioni di imbrunimento enzimatico.

4.1.2 Processi di essiccazione

Sono state applicate tecniche di essiccamento ad aria calda (HAD) e microonde (MWD). Per ogni procedura, sono state posizionate circa 20 fette (da circa 20 g), ben distanziate tra esse, su ciascuno dei tre rack uniformi per disidratatori a rete, per esporre entrambe le superfici dei semi e garantire una perdita uniforme d'acqua. I' HAD è stato eseguito a tre diverse temperature (40 °C, 50 °C e 60 °C) a velocità costante dell'aria (1,5 m/s), utilizzando un essiccatore a vassoio (UOP8, Armfield Ltd., Hampshire, Inghilterra). Per il MWD, sono stati testati tre diversi livelli di potenza (400 W, 567 W e 700 W) utilizzando un forno a microonde digitale (YC-PC322AE-S, Sharp, Milano, Italia). Le potenze a microonde sono state selezionate sulla base di studi preliminari per (i) comprendere un intervallo significativo di intensità di trattamento, (ii) prevenire bruciature visibili o surriscaldamento localizzato, e (iii) garantire il raggiungimento dell'obiettivo finale di umidità entro tempi di lavorazione pratici. Durante i processi di essiccazione, i campioni venivano periodicamente prelevati dall'asciugatrice e pesati utilizzando una bilancia analitica (QUINTIX 65–1S, Sartorius, Göttingen, Germania) con una precisione di 0,0001 g, per monitorare il rapporto di umidità nel tempo. Per quanto riguarda il processo MWD, le durate dei cicli di riscaldamento sono state accuratamente valutate per prevenire il surriscaldamento localizzato del campione. È stato scelto un contenuto finale di umidità dell'11% come parametro per definire il punto finale della disidratazione. Ogni processo è stato ripetuto tre volte nelle stesse condizioni e sono stati presi in considerazione i valori medi. Non sono stati applicati inibitori enzimatici dell'imbrunimento (ad esempio, acido ascorbico, acido citrico o solfiti) prima dell'essiccazione per valutare l'effetto diretto delle condizioni di essiccazione sulla formazione del colore e sullo sviluppo volatile.

4.1.3 Modellazione matematica delle curve di essiccazione

L'equazione 1 permette il calcolo del rapporto di umidità (MR) durante gli esperimenti di essiccazione

$$(1)\ MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

dove M_t, M_0, M_e rappresentano rispettivamente il contenuto di umidità in un qualsiasi tempo t (min), il contenuto di umidità iniziale e il contenuto di umidità di equilibrio. Nel caso di materiali biologici ad alto contenuto di umidità (come frutta, verdure, matrici amidacee), il contenuto di umidità di equilibrio (M_e) è trascurabile rispetto a M_t e M_0 (Karaaslan & Ekinci, 2023). Inoltre, durante il periodo a caduta di velocità, l'umidità del materiale rimane ben al di sopra dell'equilibrio, e M_e può essere ragionevolmente considerato insignificante nella forza motrice per l'essiccazione. In queste condizioni, il rapporto di umidità è stato calcolato utilizzando l'equazione semplificata:

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

Per ciascun trattamento, i valori di MR sono stati tracciati in funzione del tempo (t) per ottenere le curve di essiccazione sperimentali. Per descrivere il comportamento matematico di queste curve, i dati sperimentali sono stati adattati a tre modelli di essiccazione a strato sottile, vale a dire quelli proposti da Henderson e Pabis (1961), Lewis (1921) e Yagcioglu et al. (1999), ed è stato identificato il modello che forniva il miglior adattamento. È stata applicata la regressione non lineare dei minimi quadrati per stimare i parametri del modello utilizzando l'algoritmo di ottimizzazione Levenberg–Marquardt, mentre il coefficiente di determinazione (R^2), il chi-quadro ridotto (χ^2), e l'errore quadrato medio (RMSE) sono stati utilizzati come criteri per valutare la bontà dell'adattamento.

4.1.4 Produzione di farina

I semi essiccati sono stati macinati finemente utilizzando un macinino elettrico per spezie (SG21BE, Cuisinart, Stamford, Connecticut, USA) per 5 minuti, e la distribuzione della dimensione delle particelle delle farine ottenute è stata misurata attraverso setacciatura. A causa dell'elevato contenuto di umidità e amido dei semi freschi, la macinazione è stata effettuata solo dopo l'essiccazione. La macinazione a umido ha prodotto una massa simile a una pasta, soggetta ad agglomerazione, riscaldamento non uniforme e reazioni ossidative ed enzimatiche accelerate. Le farine sono state prontamente trasferite in barattoli di vetro ambrato, sigillate con tappi metallici e conservate in un luogo fresco, asciutto e buio fino all'uso. In queste condizioni, le farine sono rimaste stabili (dati non mostrati) fino a sei mesi.

4.1.5 Contenuto di umidità

Il contenuto finale di umidità dei campioni essiccati è stato valutato utilizzando il metodo di essiccazione in stufa, dove i campioni sono stati mantenuti a 110 ± 0,5 °C fino al raggiungimento di un peso costante (Condurso et al., 2019).

4.1.6 Analisi del colore

L'analisi del colore è stata eseguita secondo il metodo riportato da Merlino et al. (2022). Le misurazioni sono state condotte secondo SCE (componenti speculari escluse). Sono state effettuate dodici replicazioni per ciascun campione di farina, e i risultati sono stati espressi come valori medi. I valori medi di *L*, a** e *b** sono stati impiegati per calcolare la differenza totale di colore tra i campioni trattati con la stessa tecnologia di essiccazione ma in condizioni diverse, secondo la seguente equazione.

$$\Delta E_{Lab} = \sqrt{\Delta L *^2 + \Delta a *^2 + \Delta b *^2}$$

Se $0 < \Delta E_{Lab} < 1$ l'osservatore non nota alcuna differenza; $1 < \Delta E_{Lab} < 2$, solo un osservatore esperto può notare la differenza; $2 < \Delta E_{Lab} < 3{,}5$, anche un osservatore inesperto nota la differenza; $3{,}5 < \Delta E_{Lab} < 5$, si nota una chiara differenza di colore, $\Delta E_{Lab} > 5$ si osservano 2 colori diversi (Mokrzycki & Tatol, 2011).

4.1.7 Analisi sensoriale QDA

L'Analisi Descrittiva Quantitativa (QDA) è stata effettuata seguendo la metodologia descritta da Cincotta et al. (2025). Un panel di otto valutatori (4 maschi e 4 femmine di età compresa tra 25 e 50 anni) è stato reclutato presso il Dipartimento di Scienze Veterinarie, Università di Messina, e istruito secondo le linee guida ISO 8586:2023. I valutatori sono stati selezionati tra soggetti sani non fumatori che non segnalavano allergie o condizioni temporanee (ad esempio raffreddori) che potessero interferire con la percezione sensoriale. Per evitare interferenze sensoriali, è stato loro consigliato di non consumare alimenti dal sapore forte, caffè o prodotti alla menta prima delle sessioni. Solo gli individui che hanno dimostrato risposte affidabili e ripetibili durante l'addestramento sono stati inclusi nel panel. Durante le sessioni di addestramento, è stato stabilito un vocabolario sensoriale comune, e sono stati selezionati 15 descrittori di odore- intensità, dolce, erbaceo, fruttato, legnoso, speziato, arancia/citrico, ceroso, pungente, fermentato, vernice, fieno, fresco, miele e floreale - basati sulla frequenza di citazione. I campioni sono stati analizzati in triplo in tre diverse sessioni e presentati in ordine randomizzato. I valutatori hanno valutato l'intensità di ciascun attributo su una scala a 9

punti (1 = basso, 9 = alto). Per minimizzare l'affaticamento olfattivo, le sessioni sono state intervallate da pause di un'ora. Tutti i giudici hanno firmato un modulo di consenso informato in conformità ai principi etici della Dichiarazione di Helsinki. I risultati sono stati espressi come media dei valori di intensità per ogni descrittore.

4.1.8 Test di accettabilità dei consumatori

L'accettabilità sensoriale delle farine di semi è stata valutata da un gruppo di 86 consumatori non formati (40 maschi e 46 femmine) di età compresa tra i 22 e i 60 anni e reclutati dal Dipartimento di Scienze Veterinarie (Università di Messina, Italia). Valutatori non addestrati sono stati selezionati tra non fumatori sani che non hanno riportato allergie o condizioni temporanee (ad esempio, raffreddori) che potessero interferire con la percezione sensoriale. La partecipazione al sondaggio è stata completamente volontaria e, prima delle sessioni di degustazione, tutti i partecipanti hanno firmato un modulo di consenso informato in conformità con i principi etici della Dichiarazione di Helsinki. Per evitare interferenze sensoriali, ai consumatori è stato detto di non consumare cibi dal sapore forte, caffè o prodotti alla menta prima delle sessioni. Ogni giudice ha valutato le 6 farine di semi come tali, in triplicato, in tre diverse sessioni. In ogni sessione, i campioni sono stati valutati in ordine casuale e intervallati da pause di 15 minuti per ridurre al minimo l'affaticamento olfattivo. Ai partecipanti è stato chiesto di valutare odore e colore secondo una scala edonica di nove punti (1=estremamente sgradevole; 2=molto sgradevole; 3=sgradevole; 4=leggermente sgradevole; 5=né piacevole né sgradevole; 6=leggermente piacevole; 7=piacevole; 8=molto piacevole; 9=estremamente piacevole). L'accettabilità complessiva era calcolata dalla media di tutte le valutazioni raccolte.

4.1.9 Profilo volatile

I composti aromatici volatili delle farine di semi di avocado essiccati sono stati analizzati utilizzando microestrazione in fase solida dello spazio di testa abbinata a cromatografia gassosa-spettrometria di massa (HS-SPME-GC–MS), seguendo il metodo descritto da Cincotta et al. (2024). Un grammo di farina di semi è stato miscelato con 18 mL di una soluzione satura di NaCl in una fiala di vetro da 40 mL, e la miscela è stata equilibrata a 40 °C sotto agitazione continua per 30 minuti. I volatili venivano estratti utilizzando una fibra DVB/CAR/PDMS esposta allo spazio di testa per 30 minuti, poi desorbito termicamente nella porta di iniezione del GC (280 °C). La separazione è stata effettuata su una colonna capillare SLB-5 ms e la rilevazione è stata effettuata utilizzando uno spettrometro di massa quadrupolo triplo in modalità scansione completa (40–400 m/z). L'identificazione dei composti si basava sul confronto con le librerie NIST '20 e FFNSC 3.0, gli indici di ritenzione, i dati della letteratura e gli standard di riferimento.

4.1.10 Analisi statistica

I dati sono stati elaborati statisticamente utilizzando il software XLStat, versione 2019.1.2 (Addinsoft, Damremont, Parigi, Francia). È stata effettuata un'analisi della varianza (ANOVA), seguita dal test di Range multiplo di Duncan ($p < 0,05$). L'analisi di clustering gerarchico è stata effettuata utilizzando lo strumento web ClustVis.

4.2 Risultati e discussione

4.2.1 Processi di essiccazione

È ben risaputo che i materiali biologici generalmente mostrano un periodo di essiccazione a velocità costante trascurabile, con la rimozione dell'umidità che si verifica quasi interamente durante il periodo a velocità decrescente (Madamba et al., 1996). Questo comportamento indica che la diffusione interna è il meccanismo dominante che governa la migrazione dell'umidità all'interno dei campioni. In tali condizioni, affettare i semi di avocado in sezioni sottili (1 mm) aiuta a minimizzare i gradienti di umidità interna, riduce l'esposizione termica e garantisce un trasferimento di calore e massa più uniforme durante la disidratazione. Questa preparazione consente inoltre l'uso di modelli di essiccazione a strato sottile che, sebbene originariamente sviluppati per sistemi controllati dalla diffusione, sono ampiamente applicati per descrivere le variazioni del rapporto di umidità (MR) in un'ampia gamma di tecnologie di essiccazione, inclusi i processi assistiti da microonde (Onwude et al., 2016). La Figura 4.1 mostra il rapporto di umidità dei semi di avocado, sia sperimentale che previsto dal modello, in funzione del tempo di essiccazione, in diverse tecnologie e condizioni di essiccazione.

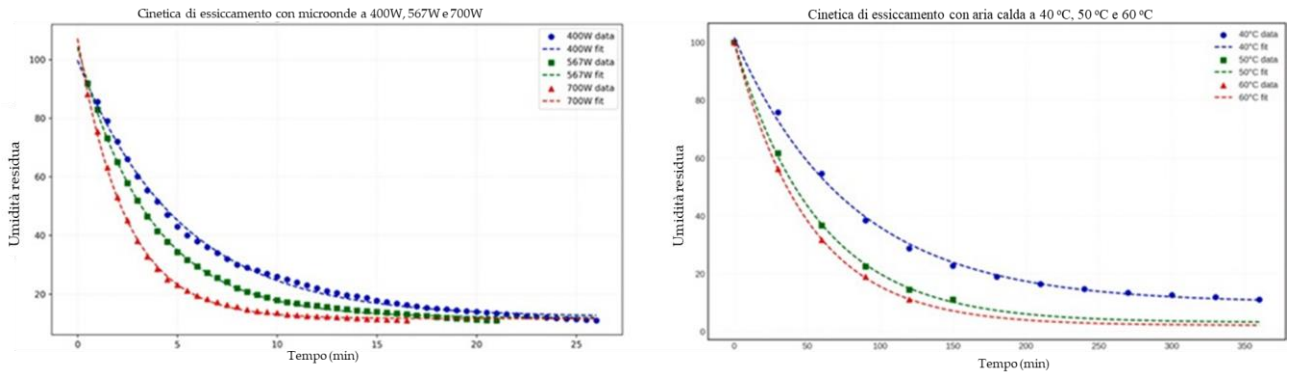


Figura 4.1. Rapporto di umidità sperimentale e previsto dal modello dei semi di avocado in funzione del tempo di essiccazione utilizzando diverse tecnologie e condizioni di essiccazione.

Tra i modelli valutati, l'equazione esponenziale-asintotica proposta da Yagcioglu et al. (1999), $MR = ae^{-kt} + c$, ha fornito la migliore descrizione del comportamento di essiccazione a strato

sottile dei semi di avocado in tutti i metodi e le condizioni operative di essiccazione. L'idoneità dei modelli esponenziali–asintotici per l'essiccazione controllata dalla diffusione è stata anche dimostrata per altri prodotti vegetali (Doymaz, 2007). La Tabella 4.1 riporta i parametri adattati a, k e c, insieme ai corrispondenti valori di R2, $\chi 2$ e RMSE per ogni trattamento. I campioni MWD hanno mostrato costanti di decadimento significativamente più elevate (k variabile da 0,1950 a 0,4211), indicando una rapida diminuzione del rapporto di umidità. Questo è coerente con il meccanismo di riscaldamento volumetrico del microonde, che genera vapore interno e aumenta la migrazione dell'umidità dal nucleo alla superficie. Con l'aumento della potenza delle microonde, i gradienti di pressione interna diventano più intensi, riducendo il percorso effettivo della diffusione e accorciando il periodo a velocità decrescente. Tendenze simili sono state riportate per altre matrici vegetali essiccate in condizioni di microonde, dove il rapido riscaldamento interno accelera la migrazione dell'umidità (Condurso et al., 2019; Maskan, 2000). Al contrario, l'HAD ha mostrato costanti di decadimento significativamente più basse (k = 0,00863–0,02308), riflettendo la cinetica più lenta tipica dei sistemi controllati dalla diffusione. Nell'essiccazione convettiva, il calore è fornito esternamente attraverso la superficie del prodotto, mentre il movimento dell'umidità all'interno del materiale è principalmente governato dalla diffusione interna. Questi risultati sono coerenti con studi precedenti che riportano valori di k similmente bassi per l'HAD e confermano che l'essiccazione convettiva è prevalentemente un processo limitato dalla diffusione (Joardder & Karim, 2023; Tauhiduzzaman et al., 2021). Indipendentemente dal metodo e dalle condizioni di essiccazione utilizzate, tutti i campioni di farina hanno raggiunto lo stesso punto finale di umidità di circa l'11%. Il raggiungimento di questo livello di umidità ha richiesto tra 16 e 26 minuti con MWD, mentre con l'HAD sono stati necessari tra 120 e 360 minuti. Questi risultati sono in linea con studi precedenti che hanno descritto l'essiccazione a microonde come una tecnica efficiente dal punto di vista energetico che può aumentare notevolmente i tassi di trasferimento di massa rispetto all'essiccazione convettiva convenzionale (Maskan, 2000).

Tabella 4.1 Parametri stimati (a, k, c), coefficiente di determinazione (R^2), chi-quadro ridotto (χ_r^2) e errore quadratico medio (RMSE) del modello cinetico esponenziale–asintotico $MR=ae^{kt}+c$, adattato ai set di dati sperimentali ottenuti con diverse tecnologie e condizioni di essiccazione.

	a	k	c	R^2	χ^2	RMSE
HAD_40 ◦C	88.6760	0.00863	11.0400	0.9995	0.1323	0.3237
HAD_50 ◦C	92.0400	0.01538	10.9820	0.9998	0.0501	0.2238
HAD_60 ◦C	95.0200	0.02308	10.9500	0.9999	0.0309	0.1760
MWD_400W	87.5509	0.19500	12.1878	0.9973	0.0203	0.1425
MWD_567W	92.2652	0.27840	12.0608	0.9993	0.0757	0.3059
MWD_700W	95.5482	0.42110	11.6514	0.9993	0.0906	0.2967

I valori costantemente elevati di R^2, insieme ai bassi valori di χ^2 e RMSE, indicano una forte correlazione tra le previsioni del modello e i dati sperimentali. Ciò conferma che, sebbene i diversi meccanismi di riscaldamento alla base di MWD e HAD influenzino fortemente il tasso di rimozione dell'umidità, nelle condizioni studiate il comportamento di essiccazione dei semi di avocado può essere descritto efficacemente utilizzando modelli di essiccazione a strato sottile. In particolare, la buona performance del modello esponenziale–asintotico è coerente con la presenza di una frazione di umidità residua, tipica dei materiali alimentari disidratati.

4.2.2 Proprietà fisiche

Dopo l'essiccazione, i semi di avocado sono stati trasformati in farina di granulometria paragonabile. La distribuzione delle dimensioni delle particelle ha mostrato che circa il 34–35% di ogni campione di farina era costituito da particelle grossolane (>400 μm), circa il 19% era trattenuto tra 250 e 400 μm, mentre il restante 44-45% passava attraverso il crivello da 250 μm. Questi risultati indicano che la maggior parte delle farine era composta da particelle fini (<250 μm). Per quanto riguarda il colore della farina (Figura 4.2), i valori ΔE hanno evidenziato che i campioni trattati a 700 W apparivano molto diversi nel colore rispetto ai campioni da 400 W e 567 W, che, al contrario, mostravano lo stesso colore. Tra i campioni di HAD, gli osservatori possono distinguere facilmente i diversi colori tra campioni essiccati a 40 °C e quelli essiccati a 50 °C o 60 °C. In dettaglio, per i campioni MWD, l'aumento della potenza delle microonde da 400 W a 700 W ha portato a un aumento graduale dei valori di L*, indicando un aspetto più leggero associato a tempi di asciugatura più brevi. Questa tendenza potrebbe essere associata a una minore esposizione all'arrossimento ossidativo e a una degradazione limitata del pigmento a tempi di lavorazione più brevi, dovuta all'elevata potenza delle microonde. Al contrario, i valori di a* diminuivano, suggerendo una diminuzione dei toni rosso-marroni, mentre i valori di b* sono rimasti relativamente stabili, indicando piccoli cambiamenti nella componente gialla. I campioni di HAD hanno mostrato il valore L* più basso a 40 °C, confermando una colorazione più scura, probabilmente dovuta alla bassa temperatura di lavorazione che non riusciva a inibire l'ossidazione enzimatica dei composti fenolici. La massima luminosità si è verificata a 50 °C, mentre una diminuzione del valore di L* a 60 °C può riflettere un arrossimento non enzimatico aumentato dovuto all'accelerazione termica delle reazioni di Maillard. Sia a* che b* aumentarono con la temperatura nell'HAD, riflettendo uno spostamento verso tonalità giallo-rossastre più pronunciate, indicativo della formazione di pigmenti di imbrunimento. Poiché non sono stati applicati agenti antiossidanti (ad es. acido ascorbico o citrico), lo sviluppo del colore riflette la risposta intrinseca dei tessuti del seme di avocado ai diversi trattamenti di essiccazione. Questo è

rilevante perché i composti antiossidanti possono modulare le vie ossidative e alterare la formazione dei pigmenti durante la lavorazione termica (Chen et al., 2025). Questi risultati concordano con i risultati di Süfer et al. (2025), che affermano che tecniche convenzionali come l'essiccazione al sole e ad aria calda favorivano le gli imbrunimenti enzimatici e non enzimatici, mentre le tecnologie di essiccazione che riducono temperatura e tempo di trattamento conservano meglio il colore.

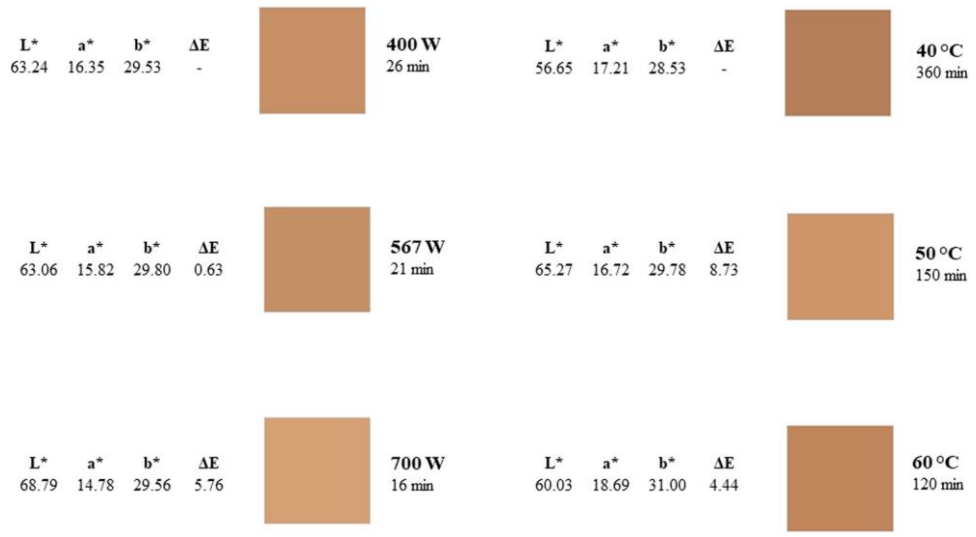


Figura 4.2. Parametri di colore (L*, a*, b*) delle farine di semi di avocado ottenute con diverse tecnologie e condizioni di essiccazione.

4.2.3 Analisi sensoriale

Il trattamento di essiccazione ha influenzato significativamente le caratteristiche dell'odore, come evidenziato dai risultati della QDA (Figura 4.3). All'interno dei trattamenti MWD, sono emerse chiare differenze tra i diversi livelli di potenza del microonde. I campioni essiccati a 400 W erano caratterizzati da note erbacee, speziate e mielate più pronunciate, mentre i campioni a 567 W mostravano una riduzione delle caratteristiche erbacee e speziate e venivano invece descritti come più fruttati e meno cerosi. Al contrario, i campioni essiccati a 700 W avevano un profilo olfattivo dominato da note pungenti, accompagnate da una riduzione delle caratteristiche fruttate e di fieno, suggerendo che un'intensità eccessiva del microonde influisca negativamente sulla qualità sensoriale, probabilmente a causa della degradazione termica dei principali composti volatili. Per quanto riguarda i campioni HAD, le farine essiccate a 40 °C e 60 °C hanno mostrato profili sensoriali simili, mentre il campione essiccato a 50 °C ha mostrato un profilo olfattivo più gradevole, con note più dolci, fruttate e agrumate e meno attributi erbacei. Ciò indica che una temperatura di 50 °C favorisce lo sviluppo di composti volatili associati a note olfattive più gradevoli.

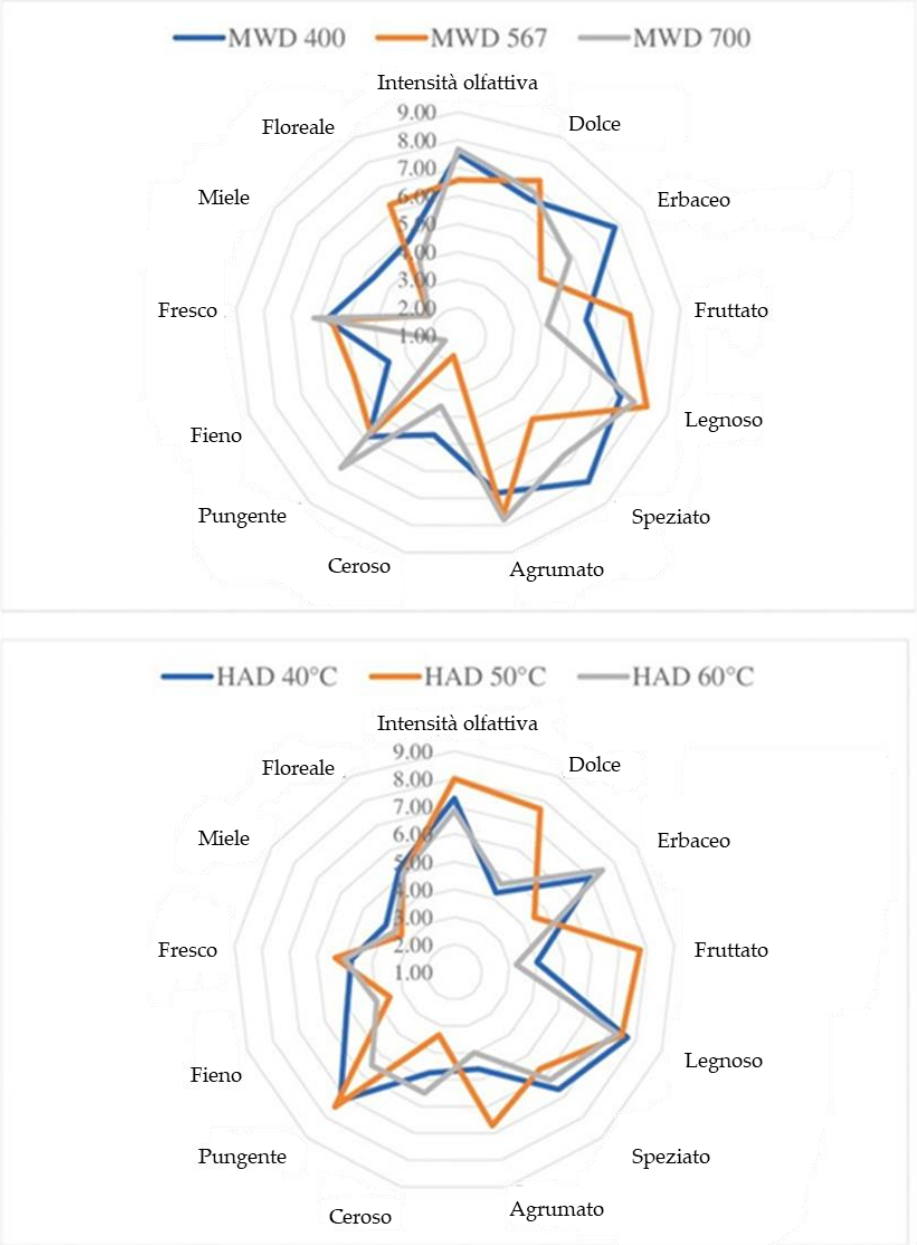


Figura 4.3. Rappresentazione grafica dei risultati QDA per gli attributi dell'odore delle farine di semi di avocado ottenute con diverse tecnologie e condizioni di essiccazione.

4.2.4 Accettabilità da parte dei consumatori

I risultati combinati del test di classificazione edonica e del sondaggio sull'intenzione di acquisto sono presentati nella Figura 4.4. Sono emerse differenze chiare e significative tra i trattamenti, confermando che sia la tecnologia di essiccazione sia le condizioni del processo influenzano fortemente la percezione dei consumatori e la potenziale accettazione sul mercato delle farine ottenute dai semi di avocado. I campioni trattati a 567 W e 50 °C hanno ricevuto i punteggi edonici più alti per colore, odore e gradimento generale, riflettendo la più alta intenzione di acquisto tra i consumatori. Al contrario, i trattamenti condotti a 400 W e 40 °C hanno prodotto punteggi sensoriali

significativamente più bassi e una ridotta disponibilità all'acquisto, associata sia a caratteristiche di odore sia di colore meno favorevoli. L'aumento della temperatura a 60 °C e della potenza a 700 W ha portato a una leggera diminuzione delle valutazioni edoniche rispetto a 50 °C e 567 W, mentre l'intenzione di acquisto dei consumatori è rimasta relativamente alta. Rispetto ai risultati del QDA, i campioni valutati più piacevoli sono stati quelli apprezzati dal panel sensoriale per le loro note distintamente fruttate, dolci e agrumate.

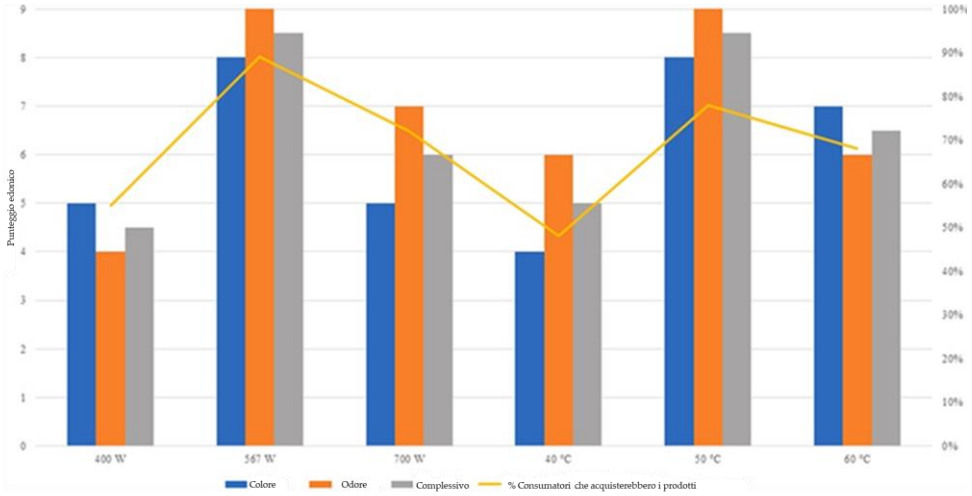


Figura 4.4. Grafico combinato dei punteggi edonici e delle intenzioni d'acquisto per le farine di semi di avocado ottenute con diverse tecnologie e condizioni di essiccazione.

4.2.5 Profilo volatile

La Tabella 4.2 riporta la composizione dei campioni di farina ottenuti dalle tecnologie MWD e HAD a diverse potenze (400 W, 567 W e 700 W) e temperature (40 °C, 50 °C e 60 °C) come singoli componenti e classi di sostanze. Tutti i campioni di farina di semi hanno mostrato un profilo aromatico volatile complesso, con circa 115 composti identificati. La classe chimica più abbondante, in tutti i campioni, era quella dei sesquiterpeni, in particolare dei sesquiterpeni idrocarburici, seguiti da monoterpeni (principalmente idrocarburici), composti furanoici, aldeidi, alcoli, esteri, chetoni e fenilpropanoidi, con differenze nella percentuale di ciascuna classe tra i diversi campioni (Figura 4.5).

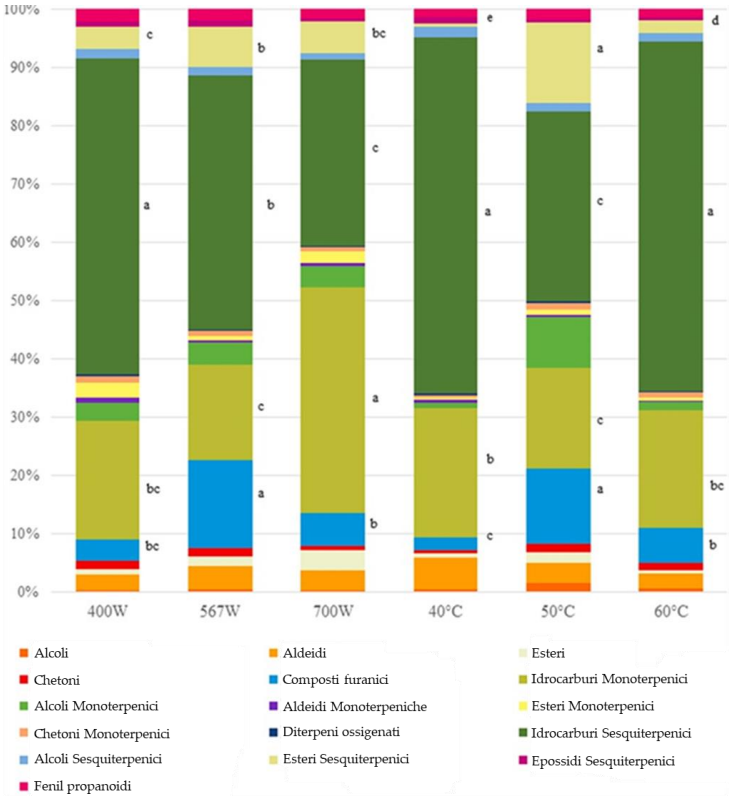


Figura 4.5. Distribuzione percentuale comparativa per classi di composti volatili nelle farine di semi di avocado ottenute con diverse tecnologie e condizioni di essiccazione. Diverse lettere indicano differenze statisticamente significative tra i campioni secondo il test di intervallo multiplo di Duncan a $p < 0,05$.

I composti maggiormente rappresentati erano D-germacrene, α-trans-bergamotene, α- e β-cubebene, α- e β-pinene, (E)-cariofillene, 2-tridecilfurano, (E)-β-santalolo acetato, δ-cadinene, canfene, α-copaene e limonene (Tabella 4.2). Inoltre, esanolo, (2E)-2-esen-1-olo, (4Z)-4-decen-1-olo, (2E)-2-nonenale, benzaldeide, nerolo e geraniolo sono stati trovati esclusivamente nelle farine ottenute da semi essiccati ad aria calda. Le tecnologie di essiccazione hanno influenzato qualitativamente la composizione della frazione volatile dei campioni di farina, mentre, da un punto di vista quantitativo, sono emerse differenze statisticamente significative in funzione sia dei metodi di essiccazione sia delle condizioni del processo. Per ottenere una comprensione più chiara delle differenze nei profili aromatici volatili, è stata eseguita un'analisi di clustering gerarchico e i risultati sono stati presentati sotto forma di Heat Map nella Figura 4.6. La figura mostra chiaramente i campioni divisi in due gruppi principali. Il primo gruppo è costituito da 700 W, 567 W e 50 °C, mentre il secondo gruppo include 400 W, 40 °C e 60 °C.

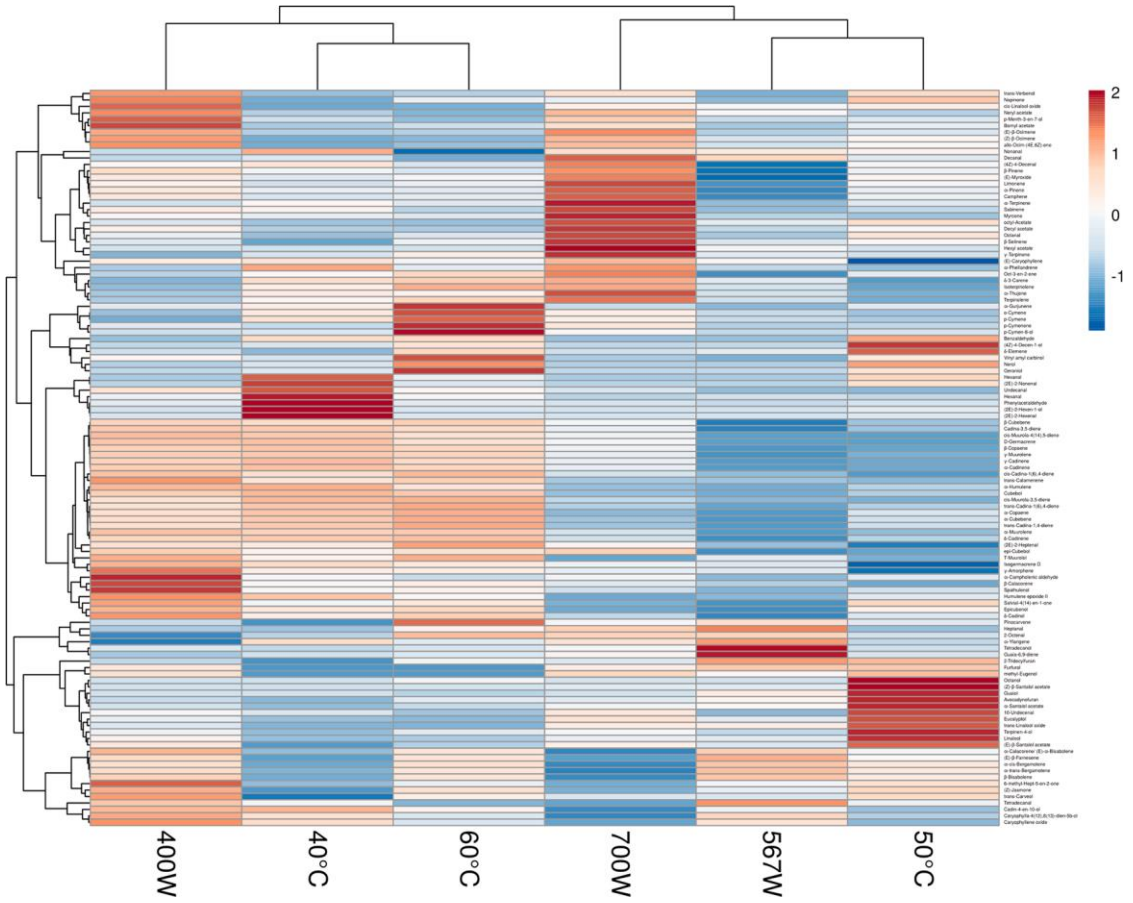


Figura 4.6. Heat Map dei composti volatili rilevati nelle farine di semi di avocado ottenute con diverse tecnologie e condizioni di essiccazione.

Questo mostra che le condizioni di essiccazione, più che le tecnologie di essiccazione, hanno un maggiore impatto sul profilo volatili finale della farina di semi di avocado. Ciò suggerisce che il processo di essiccazione può essere utilizzato per modificare il profilo volatile della farina di semi di avocado. Nel primo gruppo, i campioni essiccati a 567 W erano strettamente raggruppati con i campioni a 50 °C, mostrando generalmente una minore abbondanza di molti composti volatili rispetto agli altri trattamenti. Erano caratterizzati dal contenuto più elevato di 2-tridecilfurano, che conferisce note fruttate, insieme a una buona quantità di sesquiterpeni come α-cis-bergamotene, α-trans-bergamotene e β-bisabolene con note agrumate e legnose. Al contrario, gli altri sesquiterpeni erano meno rappresentati, così come i monoterpeni idrocarburici, questi ultimi contributori chiave agli odori erbacei, agrumati e resinosi. Inoltre, nei campioni essiccati a 50 °C erano presenti anche composti ossigenati (inclusi monoterpeni, sesquiterpeni e composti alifatici) quali eucaliptolo, terpinen-4-olo, linalolo, ossido di linalolo trans, nerolo, geraniolo, acetato di α-santalolo, acetato di (Z)-β-santalolo, acetato di (E)-β-santalolo, ottanolo e (4Z)-4-decene-1-olo. Alcuni di questi composti sono chiaramente prodotti di ossidazione, la cui formazione probabilmente è stata favorita dal tempo di riscaldamento più lungo nel trattamento HAD rispetto al MWD.

Un altro composto volatile che era particolarmente ben rappresentato in entrambi i campioni a 567 W e 50 °C era l'avocadinofurano, cioè 2-(tridec-12-in-1-il)furano; questo composto, insieme al 2-tridecilfurano, derivava dalla degradazione della persina, un acetogenina sintetizzata nelle cellule oleose dei tessuti di avocado (Rodriguez-Saona & Trumble, 2000). L'avocadynofurano è presente naturalmente anche nelle foglie, nei semi e nei frutti di *Persea americana* Mill, così come in altre specie del genere Persea, indipendentemente dal trattamento ricevuto. Studi più recenti riportano l'avocadynofurano come prodotto della degradazione dei flavonoidi, la cui formazione dipende dalle condizioni di estrazione (Laurentcya et al., 2025). Ad oggi, questo composto è stato identificato solo all'interno del genere Persea e manifesta sia proprietà insetticide che antimicrobiche (Fahs et al., 2025; Rodriguez-Saona & Trumble, 2000). Tuttavia, il seme di avocado è già stato esplorato in diverse applicazioni alimentari, tra cui formulazioni a base di farina, arricchimento del pane (Jaramillo-De la Garza et al., 2025) e snack estrusi pronti al consumo (Permal et al., 2023), con prodotti derivati da semi trasformati che generalmente presentano livelli sicuri per un consumo moderato (Paternina-Ricardo et al., 2025). Nel presente studio, la farina di semi è stata utilizzata solo come componente aromatizzante, il che prevede un basso apporto il quale, sostanzialmente, attenua qualsiasi problema di sicurezza. La composizione dei profili di composti volatili nei campioni essiccati a 567 W e 50 °C è risultata in linea con le loro caratteristiche sensoriali identificate tramite analisi QDA. L'analisi sensoriale ha infatti evidenziato la prevalenza di attributi fruttati, dolci e agrumati, insieme ad una minore presenza di odori erbacei, speziati e cerosi, che nel complesso hanno contribuito ad una maggiore accettabilità da parte dei consumatori. I campioni essiccati a 567 W e 50 °C sono stati ulteriormente raggruppati con i campioni essiccati a 700 W. Questi ultimi erano caratterizzati principalmente da elevati livelli di monoterpeni idrocarburici, tra cui β-pinene, α-canfene, limonene, α-pinene, β-terpinene, γ-terpinene, sabinene, mircene, α-fellandrene, δ3-carene, isoterpinolene, α-tujene e terpinolene. Contenevano anche sesquiterpeni come il β-selinene e il (E)-cariofillene, insieme ad aldeidi come l'ottanale, il decanale e il (4Z)-4-decenale, nonché l'ott-3-en-2-one ed esteri, tra cui l'acetato di ottile, esile e decile.

Questa combinazione di terpeni e prodotti di ossidazione lipidica indica che l'alta potenza del microonde ha facilitato il rilascio dei terpeni e la formazione di prodotti di degradazione dei lipidi, generando così note di odore fresche, pungenti, agrumate e legnose, come percepito dai panelisti sensoriali. Il secondo cluster è costituito da campioni essiccati a 40 °C e 60 °C, che sono strettamente correlati e successivamente raggruppati con i campioni a 400 W. I campioni a 40 °C e 60 °C mostravano profili volatili molto simili, principalmente a causa della presenza di sesquiterpeni idrocarburici, tra cui β-cubebene, cadina-3,5-diene, D-β-copaene, α-germacrene, α-copaene, -humulene, trans-cadina-1(6),4-diene e γ-muurolene, che contribuiscono anche all'aroma con attributi

agrumati, fruttati, simili al ravanello, speziati, erbacei e legnosi. Inoltre, la presenza di sesquiterpeni ossigenati come cubebolo, T-muurololo e δ-cadinolo fornisce odori speziati, mentolati ed erbacei, aumentando la complessità complessiva della frazione volatile. Inoltre, i campioni essiccati a 40 °C hanno mostrato una quantità significativa di aldeidi e alcoli con sei atomi di carbonio, noti come volatili di foglia verde. Questi composti sono responsabili delle note erbacee e vegetali e derivano dall'ossidazione dei lipidi. Sebbene la temperatura di essiccazione fosse bassa, la lunga durata del processo probabilmente ha promosso l'ossidazione.

Da una prospettiva meccanicistica, la formazione di composti volatili indotta dall'essiccazione nella farina di semi di avocado può essere razionalizzata considerando il seme come una matrice prevalentemente ricca di amido con una frazione lipidica insatura più piccola ma reattiva. Sottoponendo la matrice a un'essiccazione lieve e prolungata, l'inattivazione enzimatica incompleta insieme all'ossidazione dei lipidi può favorire la formazione di aldeidi e alcoli C6/C9, contribuendo a note verdi e erbacee. A intensità di essiccazione più elevate, il rilascio di terpeni e la formazione di ulteriori prodotti di ossidazione diventano più rilevanti. Sebbene le matrici ricche di carboidrati possano anche generare composti furanici attraverso la degradazione degli zuccheri e reazioni di tipo Maillard, questo percorso sembra avere un contributo diretto limitato nelle condizioni sperimentali del presente studio. Infatti, nei nostri campioni non sono stati rilevati marcatori tipici della degradazione avanzata degli zuccheri/reazioni di Maillard, come composti furanici a catena corta, pirazine o pirroli. I composti furanici identificati nel presente studio erano principalmente furani a catena lunga, come il 2-tridecilfurano e l'avocadinofurano, che sono più plausibilmente associati alla degradazione del persina e/o lipidici rispetto alla classica formazione di furani derivati dagli zuccheri. Di conseguenza, i cambiamenti dei composti volatili erano più coerenti con processi legati all'ossidazione dei lipidi e alla modulazione dei terpeni durante l'essiccazione, mentre la matrice ricca di amido può anche modulare la ritenzione e il rilascio dei volatili (Naknean & Meenune, 2010). Per fornire una panoramica completa degli aspetti chimici e sensoriali combinati, è stata effettuata un'analisi integrata dei componenti principali (PCA) su classi selezionate di composti volatili e i principali descrittori olfattori della QDA (Figura 4.7), offrendo una visione complessiva del panorama chimico-sensoriale della farina di semi di avocado.

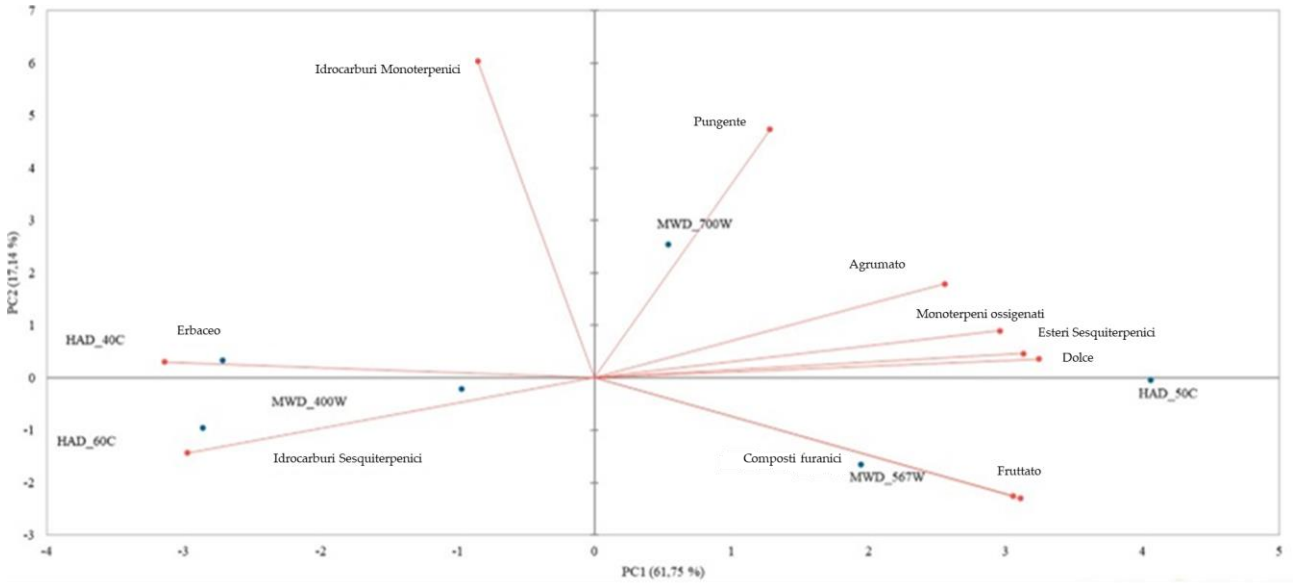


Figura 4.7. Biplot dell'Analisi delle Componenti Principali (PCA) che evidenzia la correlazione tra composti volatili (come classi chimiche) e principali descrittori olfattivi (QDA) nelle farine di semi di avocado essiccate con diverse tecnologie e condizioni.

Le prime due componenti principali rappresentavano il 78,9% della variabilità totale, discriminando efficacemente tra i trattamenti di essiccazione. I campioni di farina essiccati a 567 W e 50 °C erano raggruppati nella regione definita da attributi "dolce", "fruttato" e "arancia/agrumi", rappresentati odori più piacevoli. D'altra parte, i campioni essiccati a 40 °C, 60 °C e 400 W erano più strettamente associati a note erbacee. Il campione essiccato a 700 W è stato principalmente differenziato lungo la seconda componente principale (PC2), che era correlato a note pungenti e idrocarburi monoterpeni. Nel complesso, questi risultati evidenziano la stretta relazione tra composizione volatile e percezione sensoriale nella farina di semi di avocado, affrontando al contempo una lacuna nella letteratura attraverso un approccio chimico-sensoriale integrato. Allo stato delle conoscenze attuali, ci sono informazioni molto limitate riguardo alla composizione volatile dei semi di avocado. Younis et al. (2022) hanno studiato la frazione non saponificabile dei semi avocado, essiccati a 50 °C, provenienti da varie regioni del mondo, concentrandosi sulle varietà Rossa, Hass, Verde e Pinkerton. Hanno riferito che i principali composti della varietà Pinkerton includevano α-cubebene, α-trans-bergamotene, (E)-cariofilene e α-elemene, insieme ai sesquiterpeni ossigenati ossido di cariofilene ed epi-α-santalolo. Tutti questi composti sono stati identificati anche nei nostri campioni. Tuttavia, il nostro studio, che fornisce una caratterizzazione completa della frazione volatile della farina di seme, ha rivelato la presenza di molti altri composti appartenenti a varie classi chimiche. Inoltre, Bayomy et al. (2023) hanno esaminato la composizione degli estratti metanolici sia da semi di avocado crudi che tostati della varietà Hass. Hanno rilevato principalmente alcol, aldeidi e idrocarburi, tra cui (E)-esa-2-en-1-ol, (E)-hept-2-enal, pentadecano e cicloess-3-ene-1-carbaldeide, nei semi grezzi, e hanno riportato la formazione di piroli e pirazine nei semi tostati come risultato della lavorazione. Questi

risultati differiscono da quelli riportati nel presente studio, cosa prevedibile a causa delle significative differenze sia nei metodi di lavorazione (tostatura vs essiccamento) sia nelle procedure di analisi impiegate nei due studi. Infine, Arango et al. (2025) hanno caratterizzato i profili volatili della polpa, buccia e semi non processati dell'avocado Hass utilizzando HS-SPME-GC–MS. Gli autori hanno identificato quarantadue composti nel seme, costituiti principalmente da terpeni e sesquiterpeni-idrocarburi, che hanno contribuito a un profilo aromatico teorico caratterizzato da note resinose, legnose e medicinali.

Molti dei composti volatili rilevati nei semi di avocado Hass non trattati sono stati trovati nei nostri campioni. Tuttavia, i nostri campioni mostravano una composizione volatile più complessa, contenente oltre cento composti. Questa differenza può essere attribuita alla varietà di semi di avocado esaminati e, più significativamente, al processo di essiccazione. Ciò suggerisce che l'essiccazione può migliorare il profilo volatile della matrice, introducendo note più piacevoli di frutta, dolci e agrumate. Il potenziale dei semi tropicali come ingredienti aromatici ha finora ricevuto una limitata attenzione, e i semi di frutta tropicale rimangono una fonte poco esplorata di composti attivi dal punto di vista aromatico nonostante le loro promettenti applicazioni nei sistemi alimentari. Nella maggior parte dei casi, questo potenziale aromatico non si esprime pienamente nella materia prima stessa, ma emerge o viene potenziato dopo tostatura, fermentazione o altri trattamenti termici, principalmente attraverso reazioni di Maillard, ossidazione dei lipidi e il rilascio o la trasformazione di precursori aromatici legati. Per quanto a nostra conoscenza, i semi di giaca e durian sono tra i pochi semi di frutta tropicale che sono stati specificamente studiati per applicazioni aromatiche. In entrambi i casi, la tostatura ha favorito la formazione di diverse pirazine, che hanno contribuito allo sviluppo di note sensoriali simili al cacao e al caffè (Natania e Wijaya, 2022; Ravindran et al., 2020; Spada et al., 2020).

Al contrario, la farina di semi di avocado presenta un profilo volatile complesso particolarmente ricco di terpeni e sesquiterpeni, anche dopo un trattamento termico leggero. Come mostrano i nostri dati, questa composizione distintiva rende possibile modulare il profilo aromatico della farina di semi di avocado attraverso l'applicazione di diversi metodi di essiccazione e condizioni di lavorazione.

Tabella 4.2. Composizione volatile espressa come area del picco, divisa per 100000, nel cromatogramma TIC di farine di semi di avocado ottenute da diverse tecnologie di essiccazione e processi di condizionamento, e relative note olfattive.

			MWD			HAD			
COMPOSTI	**RT**	**LRI**	**400W**	**567W**	**700W**	**40°C**	**50°C**	**60°C**	**ODORE**
Alcoli									
(*2E*)-2-Hexen-1-olo	5,26	862	-c	-c	-c	27a	3b	1b	pungente, verde, fogliaceo, fruttato, banana acerba
Esanolo	5,36	865	-d	-d	-d	56a	36b	14c	verde, erbaceo, legnoso, dolce
1-Otten-3-olo	9,60	980	32b	16d	20cd	24c	36b	54a	fungo, terroso, verde, simil-fieno
Ottanolo	13,93	1073	28d	27d	35c	24d	341a	87b	ceroso, verde, arancia, aldeidico, rosa, fungo
(*4Z*)-4-Decen-1-olo	22,81	1259	-d	-d	-d	6c	66a	31b	ceroso, grasso, fruttato
Tetradecanolo	40,15	1681	16c	75a	25b	7d	9d	13c	ceroso, debole
Totale			***76***	***118***	***80***	***144***	***491***	***200***	
Aldeidi									
Esanale	3,69	802	236b	149c	107d	667a	119d	259b	verde, grasso, fogliaceo, vegetale, fruttato
(*2E*)-2- esanale	4,90	848	3c	2c	2c	77a	6b	5b	fresco, fogliaceo, verde, pulito, fruttato, erbaceo, speziato
Eptanale	6,39	903	4d	46a	35b	3d	2d	23c	fresco, verde, agrumato
(*2E*)-2-eptenale	8,61	956	17ab	10c	15b	16ab	7c	20a	pungente, verde, grasso, leggermente agrumato
Benzaldeide	8,83	962	-c	-c	-c	14b	18a	14b	fruttato, dolce
Ottanale	10,62	1004	23c	14d	51a	13d	33b	20c	aldeidico, ceroso, agrumato, scorza d'arancia, verde, erbaceo, fresco, grasso
Fenilacetaldeide	12,48	1043	8b	3c	5bc	38a	5bc	8b	verde, dolce, floreale
2-Ottanale	13,24	1059	38c	51a	51a	42b	43b	52a	grasso, verde, erbaceo
Nonanale	15,47	1105	52d	69c	73b	81a	65c	34e	fruttato, floreale, aldeidico, rosa, scorza d'arancia
(*2E*)-2-Nonenale	18,16	1161	-d	-d	-d	32a	17b	4c	grasso, verde, agrumato
(*4Z*)-4-Decenale	20,08	1199	131c	49e	195a	149b	127c	105d	agrumato, aldeidico, arancia
Decanale	20,37	1206	39d	90b	121a	50c	51c	23e	dolce, aldeidico, ceroso, scorza d'arancia, agrumato, floreale
10-Undecenale	24,75	1300	358c	247f	408b	312d	553a	259e	ceroso, aldeidico, rosa, agrumato, grasso

Undecanale	25,08	1308	97b	51e	67d	133a	49e	84c	ceroso, floreale, aldeidico, agrumato, verde, grasso
Tetradecanale	37,78	1614	63b	71a	26d	46c	45c	29d	ceroso, agrumato
Totale			***1068***	***852***	***1156***	***1673***	***1140***	***939***	
Esteri									
acetato di esile	11,04	1013	33c	57b	168a	27c	29c	31c	fruttato, verde, dolce
acetato di ottile	20,55	1211	147c	182c	595a	47d	373b	44d	fruttato, leggermente ceroso, floreale
acetato di decile	29,60	1410	214b	137d	347a	132d	197c	128d	ceroso, fresco, agrumato
Totale			***394***	***376***	***1100***	***206***	***599***	***203***	
Chetoni									
6-metil-ept-5-en-2-one	9,79	985	202a	116c	60d	69d	147b	109c	fruttato, intenso, grasso, verde, agrumato
Ott-3-en-2-one	12,33	1040	7cd	3d	20a	12c	10c	16b	terroso, speziato, erbaceo, dolce, fungo, fieno, mirtillo
(*Z*)-giasmone	28,89	1394	341a	213d	128e	105f	306b	292c	legnoso, erbaceo, floreale, speziato
Totale			***550***	***332***	***208***	***186***	***463***	***417***	
Composti furanici									
Furfurale	4,39	829	17b	20a	16b	4c	20a	4c	dolce, tostato, legnoso, tipo pane, caramellato
2-Tridecilfuranale	43,63	1797	1129c	2598a	1357bc	627d	2425a	1596b	legnoso, fruttato
Avocadinofurano	44,37	1827	270e	747b	482d	70f	1783a	508c	//
Totale			***1416***	***3365***	***1855***	***701***	***4228***	***2108***	
Monoterpeni									
Idrocarburi Monoterpeni									
α-tujene	7,32	925	31d	52c	196a	107b	15e	100b	legnoso, verde, erbaceo
α-pinene	7,67	934	1505b	390e	2211a	1159c	1172c	1074d	erbaceo, legnoso
Canfene	8,30	949	688b	82e	1071a	426d	514c	473d	legnoso
Sabineno	9,24	972	81b	17d	150a	71b	30c	28c	terpenico, legnoso, agrumato, tipo pino, speziato
β-Pinene	9,51	978	1624b	386e	1989a	1226c	1213c	1040d	legnoso, erbaceo, tipo pino, fresco mentolato, speziato, nota di noce moscata

Mircene	9,97	989	564b	394d	917a	495c	366d	464c	speziato, legnoso, balsamico
α-fellandrene	10,71	1006	32c	44c	260a	244a	19d	91b	agrumato, terpenico, leggermente verde, legnoso, erbaceo, pepato
δ-3-Carene	10,85	1009	122e	493d	1202a	967c	6f	1066b	agrumato, dolce, pungente
α-Terpinene	11,21	1018	14c	7d	57a	25b	18c	18c	legnoso, terpenico, limone, erbaceo, medicinale, agrumato
o-Cimene	11,34	1019	14d	42c	129b	138b	17d	265a	agrumato
p-Cimene	11,57	1024	52e	100d	188c	217b	83d	320a	fresco, agrumato, legnoso, speziato, terpenico, leggermente terroso
Limonene	11,84	1030	1226b	739e	1721a	1001d	1169c	1122c	agrumato
(*Z*)-β-Ocimene	12,16	1037	887a	290c	802a	66e	487b	102d	floreale, erbaceo, dolce
(*E*)-β-Ocimene	12,64	1046	432a	162c	466a	162c	211b	161c	dolce, legnoso, floreale
γ-Terpinene	13,17	1058	26e	57c	142a	50cd	47d	78b	terpenico, oleoso, legnoso, fresco, erbaceo, agrumato
Isoterpinolene	14,32	1081	23d	70c	235a	143b	-e	232a	floreale, legnoso
Terpinolene	14,49	1085	174e	209d	557a	328c	128f	433b	erbaceo, fresco, legnoso, dolce, pino, agrumato
p-Cimenene	14,71	1090	34c	24d	51b	27d	26d	84a	fresco, agrumato, terpenico, legnoso, speziato
allo-Ocim-(*4E,6Z*)-ene	16,65	1128	275a	73c	236a	7e	135b	26d	dolce, floreale, nocciolato, pepato, erbaceo, tropicale
Totale			***7804***	***3631***	***12580***	***6859***	***5656***	***7177***	
Monoterpeni Ossigenati									
Alcoli Monoterpeni									
Eucaliptolo	11,99	1033	367c	344c	549b	173d	875a	151d	agrumato, erbaceo, fruttato, dolce, vaniglia, mentolato, pepato, speziato, legnoso
cis-ossido di linalolo	13,85	1072	44a	24b	27b	10c	28b	11c	floreale, erbaceo, terroso, verde
trans- ossido di linalolo	14,63	1088	6c	12b	12b	-d	24a	-d	floreale, erbaceo, terroso, verde
Linalolo	15,28	1101	659b	396d	463c	49f	1545a	124e	agrumato, floreale, dolce, legnoso, verde, mirtillo
trans-Verbenolo	17,52	1148	35a	19b	30a	20b	31a	21b	balsamico, erbaceo
Terpinen-4-olo	19,13	1181	90b	38d	98b	15e	257a	67c	muffoso, polveroso
p-Cimen-8-olo	19,46	1187	7c	6c	13b	9bc	8bc	33a	erbaceo, simil-sedano
trans-Carveolo	20,94	1220	30a	15b	15b	4c	25ab	21b	speziato

Nerolo	21,31	1227	-c	-c	-c	5b	30a	32a	dolce, floreale, agrumato, magnolia
Geraniolo	22,54	1253	-d	-d	-d	4c	14b	29a	dolce, floreale, fruttato, rosa, ceroso, agrumato
Totale			***1238***	***854***	***1207***	***289***	***2837***	***489***	
Aldeidi Monoterpeni									
aldeide α-canfollenica	16,54	1127	214a	14e	80b	83b	61c	39d	erbaceo, verde, legnoso
p-Ment-3-en-7-ale	19,93	1197	127a	51d	101b	52d	60c	40e	agrumato, scorza d'arancia, legnoso, speziato
Totale			***341***	***65***	***181***	***135***	***121***	***79***	
Esteri Monoterpeni									
(*E*)-Mirossido	17,36	1144	27b	8c	37a	21b	25b	24b	aromatico, erbaceo, fruttato
acetato di bornile	24,03	1285	730a	33f	418b	45e	211c	98d	balsamico, legnoso, speziato
acetato di nerile	27,38	1360	203a	116b	180a	63c	63c	46d	floreale, rosa, agrumato, rugiadoso, pera
Totale			***960***	***157***	***635***	***129***	***299***	***168***	
Chetoni Monoterpeni									
Nopinone	17,11	1139	340a	86d	169c	75d	289b	175c	fresco, mentolato, canforato, legnoso
Pinocarvone	18,24	1162	65c	119a	92b	36d	79c	156a	verde, erbaceo
Totale			***405***	***205***	***261***	***111***	***368***	***331***	
Diterpeni ossigenati									
Salvial-4(14)-en-1-one	37,00	1593	129a	27c	39c	80b	110ab	96b	legnoso, speziato
Sesquiterpeni									
Idrocarburi Sesquiterpeni									
δ-Elemene	26,19	1333	32d	46c	32d	15e	129a	91b	dolce, erbaceo, legnoso
α-Cubebene	26,99	1351	3868b	894e	1598d	4215a	2093c	4604a	erbaceo, ceroso
α-Ylangene	27,81	1369	61e	280a	220b	230b	127d	160c	speziato, pepato
α-Copaene	28,15	1377	1629b	426e	617d	1830a	992c	1958a	legnoso, speziato, miele
β-Cubebene	28,63	1388	1221a	310d	902b	1194a	569c	1233a	agrumato, fruttato, ravanello
α-Gurjunene	29,45	1407	11bc	3d	7c	18b	11bc	35a	legnoso, balsamico

α-*cis*-Bergamotene	29,73	1414	84b	100a	4d	15c	80b	86b	legnoso, agrumato
(*E*)-Cariofillene	30,02	1420	1477c	1386d	1711a	1549b	768e	1376d	dolce, legnoso, speziato
β-Copaene	30,40	1430	228a	42c	151b	237a	52c	223a	legnoso, terroso, leggermente dolce
α-*trans*-Bergamotene	30,66	1436	2364b	2675a	130e	625d	2108c	2158c	legnoso, agrumato
Guaia-6,9-diene	30,92	1442	11d	65a	30b	16c	19c	20c	legnoso
Isogermacrene D	31,05	1445	50a	25c	29c	44b	-d	38b	legnoso
Cadina-3,5-diene	31,09	1446	114a	trd	65b	114a	31c	108a	speziato
cis-Muurola-3,5-diene	31,23	1449	192b	82d	105c	226a	77d	229a	legnoso, speziato
(*E*)-β-Farnesene	31,41	1454	122b	146a	tre	tre	82d	108c	Woody, citrus, herbal, sweet
α-umulene	31,51	1456	838a	222e	286d	864a	339c	674b	legnoso, chiodi di garofano speziati
cis-Cadina-1(6),4-diene	31,66	1459	79a	29d	41c	69b	20d	81a	legnoso, terroso, speziato
cis-Muurola-4(14),5-diene	31,75	1462	232a	52d	147c	224a	51d	199b	erbaceo, leggermente resinoso, legnoso
trans-Cadina-1(6),4-diene	32,19	1472	310b	69d	130c	360ab	129c	394a	legnoso, terroso, speziato
γ-Muurolene	32,38	1477	586a	122c	366	592a	174b	577a	erbaceo, legnoso, speziato
D-Germacrene	32,64	1483	2515a	567d	1693c	2560a	567d	2194b	erbaceo, legnoso, speziato
β-Selinene	32,87	1489	83c	81c	163a	54d	100b	94b	erbaceo, simil-sedano, legnoso
γ-Amorfene	32,98	1491	719a	362c	385c	477b	107d	479b	legnoso, terroso, speziato
α-Muurolene	33,29	1499	408a	77e	197c	382b	125d	394a	legnoso
β-Bisabolene	33,69	1509	808a	841a	4d	120c	630b	690b	balsamico, legnoso
γ-Cadinene	33,88	1514	638ab	105e	385c	682a	141d	610b	legnoso, erbaceo
δ-Cadinene	34,15	1518	1157b	310d	629c	1210a	579c	1242a	timo, erbaceo, legnoso secco
trans-Cadina-1,4-diene	34,66	1534	652c	116f	222e	733b	311d	806a	Legnoso, erbaceo, terroso, speziato
α-Cadinene	34,82	1537	187ab	36d	112c	195a	44d	180b	legnoso secco
α-Calacorene/ (E)-α-Bisabolene	34,95	1541	249a	228a	31e	73d	153c	197b	legnoso / balsamico, speziato, floreale
β-Calacorene	35,78	1562	22a	10c	12c	14b	8d	15b	neutro, leggermente terroso
Totale			***20947***	***9707***	***10404***	***18937***	***10616***	***21253***	

Sesquiterpeni ossigenati									
Alcoli Sesquiterpeni									
epi-Cubebolo	33,17	1496	229a	69d	228a	184c	84d	212b	legnoso, terroso, speziato, balsamico
Cubebolo	33,99	1516	51a	3c	8b	56a	12b	52a	speziato, mentolato
Spathulenolo	36,39	1577	42a	7d	12c	20b	13c	22b	terroso, erbaceo, fruttato
Guaiolo	37,20	1597	61c	129b	60c	64c	251a	50d	legnoso
Epicubenolo	38,35	1630	25a	3c	5c	19b	17b	22a	terroso, mentolato, fresco, legnoso
Cariofilla-4(12),8(13)-dien-5b-ol	38,7	1640	33a	30a	14c	29a	19b	22ab	legnoso, speziato, terroso
δ-Cadinolo	38,87	1645	39a	4d	14c	26b	18c	33a	erbaceo
T-Muurolol	38,96	1647	24a	13b	6c	17b	7c	24a	erbaceo, speziato, miele
Cadin-4-en-10-olo	39,39	1659	93a	70b	42c	94a	52c	76b	erbaceo, legnoso
Totale			***597***	***328***	***389***	***509***	***473***	***513***	
Esteri Sesquiterpeni									
acetato di α-santalolo	43,44	1791	453d	909b	793c	90f	2336a	328e	legnoso, sandalo, talcato
acetato di (Z)-β-santalolo	44,21	1820	20c	68b	69b	2d	583a	21c	Legnoso, sandalo, cipriato
acetato di (E)-β-santalolo	45,5	1872	999b	565d	899c	109f	1606a	383e	Legnoso, simil-sandalo
Totale			***1472***	***1542***	***1761***	***201***	***4525***	***732***	
Epossidi Sesquiterpeni									
ossido di cariofillene	36,59	1582	260a	215b	123d	225b	134d	167c	Legnoso, dolce, fresco, speziato
epossido di umulene II	37,66	1611	137a	24d	15d	115b	55c	76c	legnoso, speziato, luppolo
Totale			***397***	***239***	***138***	***340***	***189***	***243***	
Fenilpropanoidi									
metil-eugenolo	29,26	1402	382b	315c	407ab	117d	440a	116d	dolce, fresco, speziato
trans-calamenene	34,23	1523	418a	123d	131d	306c	108e	351b	erbaceo
Totale			***800***	***438***	***538***	***423***	***548***	***467***	

4.3 Conclusioni

In questo studio, è stata valutata l'idoneità della farina di semi di avocado come ingrediente aromatizzante naturale attraverso un approccio focalizzato sulle caratteristiche aromatiche che integra l'impiego di diversi processi di essiccazione, la volatilomica HS-SPME-GC–MS, l'analisi sensoriale descrittiva quantitativa da parte di un panel addestrato e il test di accettabilità da parte dei consumatori. I risultati hanno mostrato che sia la tecnologia di essiccazione sia l'intensità del processo giocano un ruolo chiave nella definizione della composizione dei composti volatili e delle proprietà sensoriali della farina di semi di avocado, con lo sviluppo dell'aroma guidato principalmente da vie legate all'ossidazione lipidica e dalla modulazione dei terpeni durante l'essiccazione. L'essiccazione a microonde (MWD) è risultata notevolmente più veloce ed efficiente dal punto di vista energetico rispetto all'essiccazione ad aria calda (HAD), riducendo notevolmente i tempi di lavorazione e potenzialmente limitando i danni termici. Indipendentemente dalla tecnica di essiccazione, il comportamento di essiccazione dei semi di avocado è stato descritto in modo soddisfacente con un modello esponenziale-asintotico, coerente con la presenza di una frazione residua di umidità tipica dei materiali alimentari disidratati. L'aroma della farina di semi era influenzato più dall'intensità del processo che dalla tecnologia di essiccazione stessa. Intensità di essiccazione intermedie, ovvero 567 W per MWD e 50 °C per HAD, hanno prodotto i profili aromatici più favorevoli, caratterizzati da note dolci, fruttate e agrumate, e hanno prodotto i punteggi di apprezzamento più alti tra i consumatori. I dati volatilomici e le valutazioni sensoriali erano fortemente allineati, confermando una chiara corrispondenza tra marcatori chimici e attributi aromatici percepiti. Questo lavoro offre la prima valutazione integrata della farina di semi di avocado come potenziale ingrediente aromatizzante naturale e fornisce forti prove che strategie di essiccazione controllate possano essere utilizzate per adattarne il profilo olfattivo. I risultati supportano la valorizzazione dei semi di avocado come ingrediente aromatizzante di alto valore e sostenibile, contribuendo all'uso circolare di un sottoprodotto agroindustriale poco utilizzato. Sulla base di questi risultati promettenti, verranno esaminate ulteriori cultivar di avocado, dando priorità a quelle più ampiamente lavorate. Parallelamente, studi in corso stanno quantificando la persina e le acetogenine correlate nei semi di avocado freschi ed essiccati provenienti da cultivar comuni per supportare meglio future valutazioni di sicurezza e potenziali applicazioni industriali.

Capitolo 5 - Gestione dei residui fogliari di avocado: tecnologia di essiccazione e qualità di infusi ottenuti da foglie di diverse varietà coltivate in Sicilia

La coltivazione di frutti tropicali è in aumento nell'area mediterranea a causa dei cambiamenti climatici e dell'interesse dei consumatori verso alimenti salutari. In Sicilia, negli ultimi 5 anni, la coltivazione di frutti tropicali è aumentata fino a superare i 500 ettari, mentre quella degli agrumi è diminuita di circa il 30%. L'avocado (*Persea americana* Mill.) è il frutto tropicale più coltivato nell'area mediterranea, dove ha conosciuto una crescita significativa grazie al suo elevato contenuto nutrizionale e ai potenziali benefici per la salute (Duarte et al., 2016); esso rappresenta una fonte di composti bioattivi quali acidi grassi insaturi, acido ascorbico, vitamina E, polifenoli e carotenoidi. *Persea americana* Mill. è una specie con diversi taxa o sottospecie, tra cui le varietà botaniche messicana (*P. americana* var. *drymifolia*), delle Indie Occidentali o antillana (*P. americana* var. *americana*) e guatemalteca (*P. nubigena* var. *nubigena* e *P. nubigena* var. *guatemalensis*). Le varietà commerciali attuali sono ibride di queste razze, come Hass, la varietà più diffusa commercialmente, che è un ibrido guatemalteco × messicano. A livello globale, la produzione di avocado è in aumento e nell'ultimo anno ha raggiunto 8,69 milioni di tonnellate (FAO, 2023); all'aumento della produzione corrisponde un incremento dei residui agro-industriali, che rappresentano uno dei principali problemi per la sostenibilità ambientale. Il contributo maggiore è dovuto alle foglie, derivanti dalle pratiche agronomiche, principalmente dall'attività di potatura degli alberi: infatti, per evitare la diffusione di malattie delle piante, gli alberi di avocado sono sottoposti a frequenti operazioni di potatura, che generano una grande quantità di biomassa (rami e foglie) che deve essere rimossa dai campi e smaltita correttamente. Lo smaltimento delle foglie ha un forte impatto sulla produzione di avocado, considerando che la quantità di residui fogliari dovuti alla potatura annuale varia da 1 a 5 tonnellate per ettaro coltivato (Tesfaye et al., 2022). D'altra parte, è stato dimostrato che le foglie di avocado contengono quantità apprezzabili di alcaloidi, triterpenoidi, saponine, carboidrati, acidi grassi e soprattutto polifenoli, che possiedono la capacità di prevenire alcune malattie degenerative associate allo stress ossidativo, come malattie neurodegenerative e cardiovascolari, tumori o invecchiamento cutaneo attraverso la fotoprotezione dai raggi UV (Jimenez et al., 2021).

Infatti, le tosane a base di foglie di avocado vengono utilizzate per diversi scopi nella medicina tradizionale dei paesi dell'America Centrale e Meridionale, tra cui: riduzione della pressione sanguigna e della glicemia, attività antivirale, effetto antidiarroico, supporto nelle malattie cardiovascolari, trattamento dei disturbi mestruali, uso come contraccettivo (Bhore et al., 2021). Nel contesto dell'economia circolare e considerando il numero di composti bioattivi presenti nelle foglie di avocado, potrebbe essere di grande interesse utilizzare questi residui come materia prima per prodotti alimentari ad alto valore aggiunto. Recentemente, De Montijo-Prieto et al. (2023) hanno

proposto l'uso delle foglie di avocado per l'estrazione di composti bioattivi; tuttavia, il loro utilizzo diretto come materia prima per prodotti alimentari ad alto valore potrebbe risultare più sostenibile dal punto di vista ambientale.

Il mercato delle tisane e degli infusi è cresciuto negli ultimi anni grazie all'interesse e alla consapevolezza dei consumatori verso alimenti salutari; si prevede che raggiungerà i 5 milioni di dollari entro il 2030 (Verified Market Research, 2022). Un mercato in crescita richiede innovazione, e le strategie possono riguardare lo sviluppo di nuovi prodotti e la diversificazione.

Le erbe sono generalmente commercializzate essiccate; il processo di essiccazione è uno strumento utile per la gestione post-raccolta e per prolungare la shelf-life, anche se può comportare modifiche indesiderate delle caratteristiche sensoriali, come aspetto, aroma, colore e proprietà salutistiche. L'effetto del processo di essiccazione dipende dalla composizione della matrice, e non esistono regole generali applicabili all'essiccazione delle piante aromatiche, anche se appartenenti allo stesso genere (Orphanides et al., 2016). A questo proposito, è noto che i composti aromatici volatili delle foglie distinguono le varietà di avocado, anche se i dati presenti in letteratura non sono sempre concordi (King & Knight, 1992; Sagrero-Nieves & Bartley, 1995). Seguendo un approccio "waste-to-value", questa ricerca ha puntato a valorizzare le foglie di scarto dell'avocado, offrendo nuove sfide e opportunità nel settore delle tisane e infusi. A tal fine, sono state considerate diverse varietà di avocado coltivate nell'area mediterranea e diverse tecnologie di essiccazione per la preparazione delle stesse. Per definire la qualità del prodotto, sono state effettuate analisi strumentali, basate sull'analisi di sostanze bioattive e composti aromatici volatili, e analisi sensoriali. Poiché l'efficacia dell'innovazione dipende dall'accettazione da parte dei consumatori, sono stati condotti anche test edonici, e l'accettabilità degli infusi è stata confrontata con quella dell'infuso di alloro, appartenente alla stessa famiglia botanica.

5.1 Materiali e metodi

5.1.1 Campionamento

Le foglie di avocado sono state ottenute dalle attività di gestione della potatura di quattro diverse varietà di *P. americana* L.: "Reed", varietà guatemalteca, "Hass", ibrido guatemalteco × messicano, "Fuerte" e "Bacon", due ibridi messicano × guatemalteco. Le foglie sono state raccolte dopo la raccolta dei frutti e prima della fioritura, nei mesi di marzo e aprile, in un campo di un frutteto di avocado situato a Giarre (Catania, Italia), in contrada San Leonardello (37°41′14.200″ N; 15°10′31.000″ E), caratterizzato da un terreno di origine vulcanica, con consistenza sabbiosa e bassa capacità di ritenzione idrica. Il clima è mediterraneo, caratterizzato da inverni miti e piovosi, primavere con scarse precipitazioni e temperature in aumento, precipitazioni concentrate nel periodo

autunnale-invernale. Le piante erano coltivate con una densità di 400 piante per ettaro e sottoposte ogni anno alla rimozione del 10–30% dei rami, al fine di contenere lo sviluppo eccessivo e favorire la raccolta e i trattamenti agronomici. Una volta raccolte, le foglie sono state immediatamente trasportate in laboratorio per le successive lavorazioni.

5.1.2 Processo di essiccamento

Le foglie di ciascuna varietà sono state sottoposte a due diversi processi di essiccazione, ovvero, essiccazione ad aria calda (HAD) ed essiccazione a microonde (MWD). Circa dieci foglie per ogni varietà sono state disposte, ben distanziate tra loro, su un vassoio metallico (27 × 18,5 × 1,5 cm) e inserite in un essiccatore a vassoio (Armfield Ltd., modello UOP8, Hampshire, Inghilterra) a temperatura di 50 °C per 3 ore e velocità dell'aria costante di 1,5 m/s per l'HAD. Per MWD, le foglie sono state posizionate su una piastra in ceramica in un forno a microonde ad una potenza di 400 W per 4 minuti. Le combinazioni tempo–temperatura/potenza sono state definite sulla base di prove preliminari, considerando le migliori caratteristiche sensoriali degli infusi. Il processo è stato condotto fino a raggiungere una perdita di umidità del 98%, determinata mediante pesate periodiche con bilancia analitica (Sartorius mod. QUINTIX 65-1S) con accuratezza di 0,0001 g. Ogni procedura di essiccazione è stata ripetuta tre volte nelle stesse condizioni.

5.1.3 Contenuto di umidità

Il contenuto di umidità dei campioni essiccati è stato determinato mediante essiccazione in stufa a temperatura: 110 ± 0,5 °C fino al raggiungimento di un peso costante. (Official Method 14 003, AOAC, 1980).

5.1.4 Preparazione degli infusi di foglie di avocado

Gli infusi di foglie di avocado sono stati preparati secondo il metodo riportato da Han et al. (2022), con leggere modifiche. Nel dettaglio sono state aggiunte 3 g di foglie tritate a 120 mL di acqua minerale bollente (~95 °C) e lasciate in infusione per 10 minuti, mantenendo agitazione con agitatore magnetico. Successivamente l'infuso è stato filtrato con carta da filtro (Munktell & Filtrak, Bärenstein, Germania), lasciato raffreddare a temperatura ambiente ed utilizzato per le analisi successive.

5.1.5 Misura del pH

Il pH degli infusi è stato determinato mediante un pHmetro XS pH 80 PRO Stirrer (XS Instruments, Carpi, Italia).

5.1.6 Contenuto fenolico totale e capacità antiossidante

Il contenuto totale di polifenoli (TPC) e la capacità antiossidante (AC) degli infusi sono stati determinati mediante analisi spettrofotometrica usando il metodo Folin–Ciocalteu (TPC) ed il saggio DPPH (AC) secondo quanto riportato da Vinci et al. (2022).

5.1.7 Analisi dei composti volatili

I composti aromatici volatili degli infusi sono stati analizzati mediante HS-SPME-GC–MS (Headspace Solid Phase Micro Extraction – Gas Chromatography–Mass Spectrometry). Diciotto mL infuso sono stati messi in una fiala di vetro da 40 mL, con aggiunta di 4 g di NaCl ed equilibrati per 30 min a 30 °C. Una fibra trifasica DVB/CARB/PDMS è stata esposta nello spazio di testa per 30 min per l'estrazione dei composti volatili e successivamente trasferita nel GC a 260 °C per 3 min. Per le analisi GS-MS è stato usato il gascromatografo GC Shimadzu 2010 Plus accoppiato ad uno spettrometro di massa TQMS 8040 (triplo quadrupolo) dotato di colonna capillare CP-Wax-52-CB (60 m 0,25 mm di diametro; spessore del rivestimento 0,25 μm) alle condizioni di temperatura dell' iniettore di 260 °C; in modalità iniezione, splitless; temperatura del forno, 45 °C per 5 min, poi aumentata a 110 °C a velocità di 5 °C/min, ed a 260 °C a 20 °C/min; gas vettore: elio usato a flusso costante di 1 mL/min; temperatura della linea di trasferimento pari a 250 °C; portata di acquisizione di 40–400 m/z; velocità scansione: 1250 amu/s. L'identificazione dei composti è stata effettuata tramite dati dello spettro di massa, libreria NIST'20 (NIST/EPA/NIH Mass Spectra Library, Wiley USA), database FFNSC 3.0, indici di ritenzione lineare (LRI), dati di letteratura e l'inserimento degli standard disponibili. L'IRL è stato calcolato secondo l'equazione di Van den Dool e Kratz.

5.1.8 Analisi qualitativa descrittiva

L'analisi sensoriale descrittiva (QDA) è stata effettuata secondo Merlino et al. (2022), e tutti i partecipanti hanno firmato un consenso informato secondo i principi della Dichiarazione di Helsinki prima dell'inizio dello studio. Il panel è stato formato secondo ISO 8586:2023; un vocabolario comune è stato sviluppato in sessioni preliminari per la spiegazione dei descrittori sensoriali e per la familiarizzazione con le scale e le procedure. Ogni descrittore è stato ampiamente descritto e spiegato per evitare qualsiasi dubbio sul significato rilevante. In base alla frequenza delle citazioni, sono stati selezionati 21 descrittori (Tabella 5.5). I giudici hanno valutato l'intensità di ciascun descrittore assegnando un punteggio compreso tra 1 (assenza della sensazione) e 9 (estremamente intensa). Ogni giudice ha valutato i campioni in quattro sessioni. Tutte le valutazioni sono state effettuate dalle 10:00 alle 12:00 in cabine individuali illuminate a luce bianca. L'ordine di presentazione è stato randomizzato tra giudici e sessioni. Tra un campione e l'altro sono stati forniti acqua e cracker non

salati ai giudici. Tutti i dati sono stati acquisiti tramite un sistema di registrazione computerizzato diretto (FIZZ Byosistemes ver. 2.00 M, Couternon, Francia). I risultati sono stati espressi come media per ciascun descrittore sensoriale.

5.1.9 Test di accettabilità dei consumatori

Il test di accettabilità è stato valutato da consumatori selezionati casualmente (80, 37 uomini e 43 donne, età 24–60 anni) reclutati tra studenti e personale dell'Università di Messina. La partecipazione all'indagine dei consumatori era su base volontaria. I consumatori hanno valutato i campioni basandosi su quattro attributi, cioè aspetto, odore, sapore e accettabilità complessiva. I punteggi sono stati registrati secondo il metodo della scala edonica, dove 9 = piace estremamente e 1 = non piace estremamente. Dopo ogni prova, è stata servita acqua per evitare imprecisioni dovute alle elevate somiglianze dei campioni.

5.1.10 Analisi statistica

I dati sono stati analizzati utilizzando il software XLStat, versione 2019.1.2 (Addinsoft, Damremont, Parigi, Francia). Sono state applicate l'analisi della varianza a due vie (ANOVA) e il test di Duncan a intervallo multiplo con un livello di confidenza del 95% ai dati chimici e sensoriali per determinare differenze significative tra i campioni. L'analisi delle componenti principali (PCA) è stata eseguita sui dati sui composti volatili dell'aroma e sui dati sensoriali QDA.

5.2 Risultati e discussione

5.2.1 Parametri chimico-fisici e attività antiossidante

La ricerca ha evidenziato l'influenza della varietà e della tecnologia di essiccazione sui parametri fisico-chimici e sull'attività antiossidante degli infusi. Il pH è un parametro importante degli infusi in quanto può influenzare il colore e l'efficienza di estrazione dei composti antiossidanti come i polifenoli (Vinci *et al.* 2022). Non sono state osservate differenze statisticamente significative tra i campioni analizzati come riportato nella Tabella 5.1. Il TPC variava tra 2,86 e 4,27 mg L^{-1} GAE, gli infusi MWD avevano sempre valori più alti rispetto a quelli HAD per ogni varietà. Lo stesso comportamento è stato osservato per l'AC, di cui i polifenoli sono i principali contributori. In particolare, l'infuso Fuerte MWD ha mostrato una percentuale di AC significativamente più alta. L'essiccazione influenza generalmente il contenuto di composti bioattivi e l'attività antiossidante in relazione al metodo utilizzato. A questo proposito, diversi autori hanno affermato che l'MWD ha portato a un TPC e AC più elevati di diverse matrici vegetali e frutti se confrontati con i processi di

essiccazione tradizionali; questo comportamento è stato correlato al minor tempo di essiccazione dell'MWD (Saifullah et al., 2019, 2021; Özcan et al., 2020).

Tabella 5.1. Parametri chimico-fisici degli infusi preparati con foglie essiccate ad aria calda (HAD) e al microonde (MWD) di diverse varietà.

	Hass HAD	Hass MWD		Reed HAD	Reed MWD		Fuerte HAD	Fuerte MWD		Bacon HAD	Bacon MWD	
pH	6.45	6.22	ns	6.43	6.48	ns	6.56	6.45	ns	6.12	6.03	ns
Polifenoli totali	2.65^{c}	3.98^{b}	*	3.07^{b}	4.06^{b}	*	3.02^{b}	4.27^{a}	*	2.86^{c}	3.80^{c}	*
AC%	34.44^{c}	44.79^{c}	*	34.80^{c}	49.37^{b}	*	37.71^{b}	49.89^{a}	**	38.24^{b}	46.11^{b}	*

I polifenoli totali sono espressi come mg/L eq. GA; Diverse lettere minuscole in apice nella stessa riga indicano differenze significative a $P < 0,05$ tra i campioni tramite il test a intervallo multiplo di Duncan; Differenze statisticamente significative tra campioni HAD e MWD a $P < 0,001$ (***), $P < 0,01$ (**), o $P < 0,05$ (*); ns = non statisticamente significativo ($P > 0,05$).

5.2.2 Composti volatili

La Tabella 5.2 riporta la composizione percentuale totale come classi di sostanze per i campioni di AHT ottenuti dalle diverse varietà e utilizzando le due tecnologie di essiccazione.

Tabella 5.2. Composizione percentuale dei composti aromatici volatili come classi di sostanze degli infusi di foglie di avocado preparati con foglie fresche, essiccate ad aria calda (HAD) e essiccate a microonde (MWD) di diverse varietà.

Classe di sostanza	Hass Fresco	Hass HAD	Hass MWD		Reed Fresco	Reed HAD	Reed MWN		Fuerte Fresco	Fuerte HAD	Fuerte MWD		Bacon Fresco	Bacon HAD	Bacon MWD		
Aldeidi	42.48^{b}	61.26^{a}	42.48^{b}	**	33.11^{c}	39.50^{b}	31.17^{c}	*	3.37^{f}	4.10^{f}	1.22^{g}	*	12.69^{d}	13.75^{d}	6.99^{e}	*	*
Alcoli	17.44^{c}	15.00^{c}	14.09^{c}	ns	35.75^{a}	23.34^{b}	15.56^{c}	**	2.72^{e}	2.03^{e}	1.20^{f}	*	7.86^{d}	5.90^{d}	0.99^{f}	**	**
Chetoni	3.75^{a}	2.80^{a}	3.24^{a}	ns	1.66^{a}	2.75^{a}	1.97^{a}	ns	2.43^{a}	2.09^{a}	2.50^{a}	ns	1.46^{a}	2.12^{a}	0.85^{b}	*	*
Esteri	23.19^{a}	5.42^{b}	5.92^{b}	***	2.85^{c}	1.48^{d}	0.43^{e}	*	0.53^{e}	3.26^{c}	0.21^{e}	*	0.92^{d}	3.57^{c}	0.57^{e}	**	**
Acidi	0.64^{c}	2.71^{a}	2.19^{a}	**	1.77^{b}	-^{e}	-^{e}	*	0.40^{c}	0.08^{d}	0.15^{d}	*	0.41^{c}	0.32^{c}	0.20^{c}	ns	ns
Composti furanici	1.29^{a}	1.81^{a}	0.40^{b}	*	-^{c}	$1,09^{a}$	-^{c}	*	-^{c}	0.18^{b}	-^{c}	*	-^{c}	0.47^{b}	-^{c}	ns	ns
Fenilpropanoidi	0.89^{f}	2.06^{e}	$2,.25^{e}$	**	5.76^{d}	7.11^{c}	8.69^{c}	*	72.72^{a}	68.67^{a}	66.00^{a}	ns	61.33^{b}	59.76^{b}	63.01^{b}	ns	ns
Monoterpeni					12.46^{d}	18.75^{c}	36.56^{a}	**	17.04^{c}	16.72^{c}	24.19^{b}	*	13.98^{c}	11.77^{c}	24.46^{b}	**	**
Sesquiterpeni	0.08^{e}	-^{f}	0.30^{d}	*	0.80^{d}	2.74^{b}	4.00^{a}	*	0.38^{d}	2.54^{b}	4.43^{a}	**	0.34^{d}	1.36^{c}	2.49^{b}	**	**
Altri	0.70^{c}	0.17^{d}	-^{e}	*	5.84^{a}	3.24^{b}	1.61^{c}	**	0.40^{d}	0.33^{d}	0.11^{d}	*	1.01^{c}	0.98^{c}	0.44^{d}	*	*

Differenti lettere minuscole in apice nella stessa riga indicano differenze significative a $P<0,05$ tra i campioni secondo il test di intervalli multipli di Duncan; differenze statisticamente significative tra campioni freschi, HAD e MWD a $P<0,001$ (***), $P<0,01$ (**), o $P<0,05$ (*); ns = non statisticamente significativo ($P>0,05$).

La Tabella 5.3 riporta i composti aromatici volatili identificati negli infusi delle diverse varietà, insieme alla composizione delle foglie fresche (non essiccate). Complessivamente, sono stati identificati 114 composti aromatici volatili appartenenti alla classe di aldeidi, alcoli, chetoni, esteri, acidi, furanoici e fenilpropanoidi, composti, mono- e sesquiterpeni. Sono state osservate differenze date dalla varietà, in accordo con diversi autori, i quali hanno affermato che la composizione volatile delle foglie di avocado dipende in gran parte dalla varietà e dalla razza (King & Knight, 1992; Sagrero-Nieves & Bartley, 1995; Guzman-Geronimo et al., 2008; Wuet et al., 2014). In accordo con Sagrero-Nieves & Bartley (1995), i campioni Fuerte e Bacon (entrambe razze ibride messicane x guatemalteche), erano caratterizzati da un'elevata quantità di fenilpropanoidi, principalmente estragolo (odore simile all'anice), che rappresentavano oltre il 40% della composizione totale dei

composti volatili, seguiti dal metil eugenolo (odore dolce, speziato e di chiodi di garofano) e dall'eucalipolo (odore di eucalipto, di canfora). La composizione volatile delle altre due varietà, Hass (ibrido guatemalenco x messicano) e Reed (razza guatemalteca), era caratterizzata da una percentuale molto bassa di fenilpropanoidi; tuttavia, aldeidi e alcoli, principalmente (E)-2-hexenal, (Z)-3-hexen-1-ol (verde, foglie e odore di erba appena tagliata), erano la classe chimica dei composti prevalenti in queste due varietà. Il profilo aromatico volatile è stato influenzato dal metodo di essiccazione utilizzato, e sono risultate differenze significative tra MWD e HAD; HAD ha determinato un aumento delle aldeidi (principalmente E-2 hexenal) in tutte le varietà; un comportamento opposto si verificò per MWD. D'altra parte, la MWD ha portato a un aumento dei terpeni, sia mono che sesquiterpeni, la cui quantità dipende dalle varietà.

Tabella 5.3. Composizione percentuale dei composti volatili dell'aroma (come singoli composti) degli infusi di avocado preparati con foglie fresche, essiccate ad aria calda (HAD) e con microonde (MWD) di diverse varietà.

	LRI	Hass Fresco	Hass HAD	Hass MWD		Reed Fresco	Reed HAD	Reed MWD		Fuerte Fresco	Fuerte HAD	Fuerte MWD		Bacon Fresco	Bacon HAD	Bacon MWD	
Aldeidi																	
2-metil-Butanale	919	-^{b}	0,09^{a}	-^{b}	ns	-^{b}	0,32^{a}	-^{b}	*	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	0,01^{b}	-^{b}	ns
3-metil-Butanale	923	-^{b}	0,19^{a}	-^{b}	*	-^{b}	0,64^{a}	-^{b}	*	-^{b}	0,01^{a}	-^{b}	ns	-^{b}	0,02^{a}	-^{b}	ns
Pentanale	988	0,06^{a}	0,30^{a}	0,66^{a}	*	-^{b}	0,21^{a}	0,59^{a}	*	-^{b}	0,01^{a}	0,04^{a}	*	-^{b}	0,02^{a}	0,09^{a}	*
Esanale	1086	7,10^{b}	5,56^{d}	8,93^{a}	*	6,07^{c}	7,19^{b}	8,06^{a}	*	0,21^{h}	0,12^{i}	0,29^{h}	*	1,39^{f}	0,56^{g}	2,06^{e}	**
(*E*)-3-Esanale	1137	0,17^{a}	0,11^{a}	0,04^{a}	ns	-^{b}	0,13^{a}	-^{b}	*	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns
(*E*)-2-Pentanale	1138	0,38^{a}	0,27^{a}	0,15^{a}	ns	-^{b}	0,24^{a}	-^{b}	*	-^{b}	0,04^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	0,13^{a}	-^{b}	*
Eptanale	1188	0,47^{c}	1,28^{b}	2,18^{a}	*	0,77^{b}	1,06^{b}	1,74^{b}	*	0,04^{f}	0,04^{f}	0,06^{e}	*	0,18^{d}	0,03^{g}	0,34^{c}	*
(*E*)-2-Esanale	1227	25,35^{a}	22,63^{b}	5,59^{e}	***	11,16^{c}	10,08^{d}	4,75^{f}	**	2,22^{g}	2,00^{g}	-^{h}	*	4,11^{f}	5,70^{e}	-^{h}	**
(*Z*)-2-Esanale	1238	0,10^{a}	0,19^{a}	0,14^{a}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	0,02^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	0,04^{b}	-^{c}	*
Ottanale	1293	0,86^{d}	2,64^{b}	4,75^{a}	*	1,28^{c}	1,28^{c}	1,18^{c}	ns	0,04^{h}	0,02^{i}	0,04^{h}	*	0,74^{e}	0,06^{g}	0,28^{f}	*
(*E*)-2-Eptanale	1333	0,28^{c}	1,49^{a}	1,13^{a}	*	-^{f}	0,94^{b}	0,64^{b}	*	0,06^{d}	0,01^{e}	0,04^{d}	*	0,08^{d}	0,04^{d}	0,08^{d}	ns
Nonanale	1400	3,55^{d}	17,42^{b}	22,46^{a}	**	7,11^{c}	6,77^{c}	6,66^{c}	ns	0,52^{e}	0,50^{e}	0,50^{e}	ns	3,39^{d}	3,76^{d}	3,79^{d}	ns
(*E*)-2-Ottanale	1440	0,40^{b}	0,52^{b}	0,97^{a}	*	0,34^{c}	0,31^{c}	0,34^{c}	ns	-^{e}	-^{e}	-^{e}	ns	0,21^{d}	0,18^{d}	0,09^{d}	ns
(*E*,*E*)-2,4-Esadienale	1415	0,32^{c}	0,71^{b}	-^{d}	*	-^{d}	0,20^{c}	-^{d}	*	-^{d}	0,29^{c}	-^{d}	*	-^{d}	1,03^{a}	-^{d}	*
(*E*,*E*)-2,4-Eptadienale	1476	-^{d}	-^{d}	-^{d}	ns	-^{d}	2,37^{a}	-^{d}	*	-^{d}	0,23^{c}	-^{d}	*	-^{d}	0,73^{b}	-^{d}	*
Decanale	1507	2,50^{b}	2,66^{b}	2,47^{b}	ns	6,27^{a}	7,75^{a}	7,11^{a}	ns	0,21^{d}	0,13^{d}	0,19^{d}	ns	2,47^{b}	0,79^{c}	0,17^{d}	**
Undecanale	1613	0,49^{a}	0,31^{a}	0,42^{a}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	0,06^{b}	-^{c}	*
Benzaldeide	1543	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	0,04^{b}	-^{c}	*	0,05^{b}	0,10^{a}	-^{c}	*
(2*E*)-2-Decenale	1656	0,44^{b}	4,80^{a}	-^{d}	*	-^{d}	-^{d}	-^{d}	ns	-^{d}	-^{d}	-^{d}	ns	-^{d}	0,05^{c}	-^{d}	*
(*E*,*E*)-2,4-Nonadienale	1718	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	0,08^{a}	-^{c}	*	-^{c}	0,04^{b}	-^{c}	ns
Dodecanale	1721	-^{b}	0,09^{a}	-^{b}	*	0,11^{a}	-^{b}	0,10^{a}	*	0,07^{a}	0,08^{a}	0,07^{a}	ns	0,06^{a}	0,13^{a}	0,10^{a}	ns
p-etil-Benzaldeide	1736	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	0,35^{a}	-^{b}	*	-^{b}	0,15^{a}	-^{b}	*
Tridecanale	1824	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	0,07^{a}	-^{b}	*	-^{b}	0,08^{a}	-^{b}	*
Pentadecanale	2057	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	0,06^{a}	-^{b}	*	-^{b}	0,07^{a}	-^{b}	*
Totale		***42,48^{b}***	***61,26^{a}***	***49,86^{b}***	**	***33,11^{c}***	***39,50^{b}***	***31,17^{c}***	*	***3,37^{f}***	***4,10^{f}***	***1,22^{g}***	*	***12,69^{d}***	***13,75^{d}***	***6,99^{e}***	*
Alcoli																	
Etanolo	928	0,04^{b}	0,18^{a}	0,03^{b}	*	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns

1-Penten-3-olo	1165	0,21[a]	0,12[b]	0,05[c]	*	-[d]	-[d]	-[d]	ns	-[d]	0,01[d]	-[d]	ns	-[d]	0,02[c]	-[d]	*
(*Z*)-2-Penten-1-olo	1314	0,08[a]	-[c]	-[c]	*	-[c]	-[c]	-[c]	ns	0,05[a]	0,09[a]	-[c]	*	0,03[b]	0,04[b]	-[c]	*
Esanolo	1355	0,42[c]	0,29[d]	0,18[e]	*	2,25[a]	2,14[a]	1,23[b]	*	0,13[e]	0,02[f]	-[g]	*	0,25[d]	0,19[e]	-[g]	*
(*E*)-3-Esen-1-olo	1365	0,02[a]	0,03[a]	0,03[a]	ns	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	0,01[b]	-[b]	ns
(*Z*)-3-Esen-1-olo	1388	14,34[b]	10,38[c]	9,31[d]	**	27,27[a]	13,87[b]	8,63[d]	**	1,20[g]	0,47[h]	-[i]	*	4,88[e]	3,32[f]	-[i]	**
(*E*)-2-Esen-1-olo	1408	0,24[b]	1,02[a]	0,85[b]	*	1,38[a]	1,95[a]	1,14[a]	ns	-[d]	0,13[c]	-[d]	*	0,76[b]	0,77[b]	-[d]	*
1-Otten-3-olo	1450	0,18[b]	0,25[a]	0,32[a]	*	-[b]	0,36[a]	0,17[b]	*	-[b]	0,11[b]	-[b]	ns	-[b]	0,06[b]	-[b]	*
2-etil-1-Esanolo	1490	0,98[a]	0,20[b]	0,11[c]	*	0,45[b]	0,31[b]	0,18[c]	*	-[d]	0,01[d]	-[d]	ns	0,15[c]	0,03[d]	-[d]	*
Nonan-2-olo	1518	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	-[b]	-[b]	ns	0,21[a]	0,65[a]	-[b]	*	0,34[a]	0,38[a]	-[b]	*
1-Ottanolo	1559	0,19[b]	0,95[a]	1,69[a]	*	0,57[b]	0,19[b]	0,21[b]	ns	0,11[c]	0,05[d]	0,17[c]	*	0,31[b]	0,37[b]	0,54[b]	ns
(*E*)-2-Otten-olo	1614	-[d]	-[d]	-[d]	ns	1,12[a]	-[d]	-[d]	*	0,51[b]	-[d]	-[d]	*	0,16[c]	-[d]	-[d]	*
1-Nonanolo	1661	-[c]	-[c]	-[c]	ns	0,53[a]	-[c]	-[c]	*	0,10[b]	-[c]	-[c]	ns	0,22[b]	0,22[b]	0,11[b]	ns
1-Dodecanolo	1970	0,44[d]	1,48[b]	0,88[c]	*	2,18[b]	4,52[a]	3,99[a]	*	0,30[d]	0,38[d]	0,85[c]	*	0,69[c]	0,39[d]	0,25[d]	*
Tetradecanolo	2158	0,31[b]	0,10[b]	0,64[a]	*	-[d]	-[d]	-[d]	ns	0,11[b]	0,12[b]	0,18[b]	ns	0,08[c]	0,10[c]	0,09[c]	ns
Totale		***17,44[c]***	***15,00[c]***	***14,09[c]***	***ns***	***35,75[a]***	***23,34[b]***	***15,56[c]***	**	***2,72[e]***	***2,03[e]***	***1,20[f]***	*	***7,86[d]***	***5,90[d]***	***0,99[f]***	**
Chetoni																	
Penten-3-one	1027	0,47[a]	0,04[c]	0,14[b]	*	-[d]	0,12[b]	-[d]	*	-[d]	-[d]	-[d]	ns	-[d]	0,05[c]	-[d]	*
6-Metil-2-eptanone	1243	0,03[b]	0,08[a]	0,09[a]	*	-[c]	-[c]	0,06[b]	ns	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	-[c]	-[c]	ns
1-Otten-3-one	1306	0,12[b]	0,14[b]	0,61[a]	**	-[d]	0,24[b]	0,10[b]	*	-[d]	0,01[c]	0,01[c]	ns	-[d]	0,01[c]	0,05[c]	*
2,5-Ottandione	1327	0,54[a]	0,35[a]	0,46[a]	ns	-[d]	0,60[a]	0,40[a]	*	-[d]	0,04[c]	0,02[c]	ns	-[d]	0,14[b]	0,06[c]	*
6-Metil-5-epten-2-one	1344	1,96[a]	1,46[a]	1,64[a]	ns	1,66[a]	1,79[a]	1,31[a]	ns	0,03[c]	0,02[c]	0,03[c]	ns	0,51[b]	0,06[c]	0,06[c]	*
2-Nonanone	1395	0,10[d]	0,08[d]	0,08[d]	ns	-[e]	-[e]	0,04[d]	*	2,40[a]	1,61[b]	1,77[b]	*	0,95[c]	1,46[b]	0,23[c]	*
Oct-3-en-2-one	1402	0,53[b]	0,65[a]	0,22[c]	**	-[e]	-[e]	0,07[d]	*	-[e]	-[e]	-[e]	ns	-[e]	-[e]	-[e]	ns
2-undecanone	1607	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	0,42[a]	0,55[a]	ns	-[c]	0,40[a]	0,14[b]	*
2-Dodecanone	1712	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	-[c]	0,12[b]	*	-[c]	-[c]	0,32[a]	*
Totale		***3,75[a]***	***2,80[a]***	***3,24[a]***	***ns***	***1,66[a]***	***2,75[a]***	***1,97[a]***	ns	***2,43[a]***	***2,09[a]***	***2,50[a]***	ns	***1,46[a]***	***2,12[a]***	***0,85[b]***	*
Esteri																	
Acetato di butile	1065	0,07[a]	0,09[a]	0,08[a]	ns	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	-[b]	-[b]	ns
Acetato di 5-metil-2-ile	1264	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	0,22[a]	0,21[a]	ns	-[b]	0,13[a]	0,57[a]	*
Butanoato di 3-metilbutilo	1268	0,63[a]	0,02[b]	0,05	*	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	0,01[b]	-[c]	ns
Acetato di (Z)-3-esen-1-olo	1320	2,27[a]	2,24[a]	0,94[b]	**	0,87[b]	0,60[c]	0,40[c]	*	-[d]	0,46[c]	-[d]	*	-[d]	1,09[b]	-[d]	**
Acetato di (E)-3-esen-1-olo	1321	0,11[b]	-[d]	0,03[c]	*	-[d]	0,77[a]	0,03[c]	**	0,09[b]	-[d]	-[d]	ns	0,14[b]	-[d]	-[d]	*

Acetato di (E)-2-esen-1-olo	1337	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	0,11^{a}	-^{b}	*	-^{b}	0,02^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	0,09^{a}	-^{b}	*
Butirrato di (Z)-esenile	1465	12,51^{a}	1,86^{c}	3,97^{b}	**	1,97^{c}	-^{e}	-^{e}	*	0,44^{d}	-^{e}	-^{e}	*	0,78^{d}	-^{e}	-^{e}	*
Isobutanoato di (Z)-3-esenile	1377	2,64^{a}	0,41^{b}	0,38^{b}	*	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns
2-metil-butanoato di (Z)-3-esenile	1483	4,96^{a}	0,80^{b}	0,48^{b}	*	-^{d}	-^{d}	-^{d}	ns	-^{d}	-^{d}	-^{d}	ns	-^{d}	0,16^{c}	-^{d}	*
Acetato di (Z)-2-otten-1-olo	1638	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	0,11^{a}	-^{b}	*	-^{b}	0,14^{a}	-^{b}	*
Acetato di (E)-2-otten-1-olo	1648	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	2,20^{a}	-^{c}	**	-^{c}	1,54^{b}	-^{c}	*
Esanoato di (Z)-3-esenile	1680	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	0,11^{a}	-^{b}	*	-^{b}	0,07^{a}	-^{b}	*
(Z)-3-esenil (Z)-3-esenoato	1729	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	0,15^{a}	-^{b}	*	-^{b}	0,34^{a}	-^{b}	*
Totale		***23,19^{a}***	***5,42^{b}***	***5,92^{b}***	***	***2,85^{c}***	***1,48^{d}***	***0,43^{e}***	*	***0,53^{e}***	***3,26^{c}***	***0,21^{e}***	*	***0,92^{d}***	***3,57^{c}***	***0,57^{e}***	**
Acidi																	
Acido acetico	1462	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	0,46^{a}	-^{c}	-^{c}	*	0,29^{b}	0,02^{c}	-^{c}	*	0,24^{b}	0,14^{b}	-^{c}	*
Acido esanoico	1853	-^{c}	0,51^{a}	-^{c}	*	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	0,08^{b}	-^{c}	*
Acido ottanoico	2066	0,08^{b}	0,72^{a}	0,76^{a}	*	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	0,05^{b}	*	-^{c}	-^{c}	0,05^{b}	*
Acido nonanoico	2154	0,56^{b}	1,48^{a}	1,43^{a}	*	1,30^{a}	-^{e}	-^{e}	ns	0,11^{c}	0,06^{d}	0,10^{c}	*	0,17^{c}	0,10^{c}	0,15^{c}	ns
Totale		***0,64^{c}***	***2,71^{a}***	***2,19^{a}***	**	***1,77^{b}***	***-^{e}***	***-^{e}***	*	***0,40^{c}***	***0,08^{d}***	***0,15^{d}***	*	***0,41^{c}***	***0,32^{c}***	***0,20^{c}***	***ns***
Composti furanici																	
2-etilfurano	958	1,16^{b}	1,74^{a}	0,40^{c}	**	-^{e}	1,07^{b}	-^{e}	**	-^{e}	0,18^{d}	-^{e}	*	-^{e}	0,45^{c}	-^{e}	*
2,3-diidrofurano	1049	-^{b}	0,02^{a}	-^{b}	ns	-^{b}	0,02^{a}	-^{b}	ns	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns
(E)-2-(2-pentenil)-furano	1303	0,13^{a}	0,05^{b}	-^{c}	*	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	0,01^{b}	-^{c}	*	-^{c}	0,02^{b}	-^{c}	*
Totale		***1,29^{a}***	***1,81^{a}***	***0,40^{b}***	*	***-^{c}***	***1,09^{a}***	***-^{c}***	*	***-^{c}***	***0,18^{b}***	***-^{c}***	*	***-^{c}***	***0,47^{b}***	***-c***	*
Fenilpropanoidi																	
Estragolo	1687	0,89^{c}	1,79^{b}	1,83^{b}	*	1,92^{b}	2,23^{b}	2,58^{b}	ns	49,37^{a}	46,80^{a}	43,26^{a}	ns	44,86^{a}	41,78^{a}	41,89^{a}	ns
(Z)-anetolo	1775	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	0,72^{a}	-^{b}	-^{b}	ns	0,86^{a}	0,94^{a}	-^{b}	*	0,77^{a}	0,82^{a}	-^{b}	*
(E)-anetolo	1848	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	2,23^{b}	1,61^{b}	1,18^{b}	ns	4,11^{a}	2,35^{a}	2,54^{a}	ns	3,56^{a}	2,68^{a}	2,70^{a}	ns
(Z)-metil isoeugenolo	2026	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	-^{b}	6,00^{a}	-^{b}	ns	-^{b}	8,54^{a}	-^{b}	*
Metileugenolo	2037	-^{h}	0,27^{g}	0,42^{g}	*	0,42^{g}	2,04^{f}	3,12^{e}	*	17,52^{b}	11,90^{c}	19,40^{a}	*	11,73^{c}	4,90^{d}	16,68^{b}	**
Eugenolo	2168	-^{d}	-^{d}	-^{d}	ns	-^{d}	-^{d}	-^{d}	ns	0,09^{b}	0,05^{c}	0,10^{b}	*	0,05^{c}	0,41^{a}	0,81^{a}	*
(E)-metil isoeugenolo	2175	-^{b}	-^{b}	-^{b}	ns	0,46^{a}	1,23^{a}	1,82^{a}	ns	0,78^{a}	0,64^{a}	0,69^{a}	ns	0,35^{a}	0,63^{a}	0,93^{a}	*
Totale		***0,89^{f}***	***2,06^{e}***	***2,25^{e}***	**	***5,76^{d}***	***7,11^{c}***	***8,69^{c}***	*	***72,72^{a}***	***68,67^{a}***	***66,00^{a}***	ns	***61,33^{b}***	***59,76^{b}***	***63,01^{b}***	ns
Terpeni																	
Monoterpeni																	
α-pinene	1025	0,04^{e}	0,08^{e}	0,63^{b}	**	0,48^{c}	0,41^{c}	1,51^{a}	**	0,27^{d}	0,36^{d}	0,83^{b}	**	0,70^{b}	0,17^{d}	1,96^{a}	*

α-tujene	1030	-[d]	-[d]	0,17[b]	*	-[d]	-[d]	0,14[b]	*	0,20[a]	0,14[b]	0,37[a]	*	0,05[c]	0,02[c]	0,26[c]	*
Canfene	1066	-[c]	0,02[b]	0,06[b]		-[c]	0,03[b]	0,10[a]	*	-[c]	0,02[b]	0,04[b]	*	-[c]	0,01[b]	0,01[b]	ns
β-pinene	1102	0,30[d]	0,24[d]	1,97[c]	**	0,42[d]	1,26[c]	6,00[a]	***	0,46[d]	0,73[d]	1,55[c]	*	1,00[c]	0,38[d]	3,46[b]	**
Sabinene	1115	-[h]	0,07[g]	0,86[c]	**	-[h]	0,06[g]	0,28[e]	**	0,60[d]	1,07[b]	2,18[a]	*	0,17[f]	0,13[f]	0,88[c]	*
Mircene	1158	-[d]	-[d]	0,17[c]	*	-[d]	0,46[a]	0,59[a]	*	0,22[b]	0,23[b]	0,50[a]	*	0,13[c]	0,10[c]	0,69[a]	**
α-fellandrene	1160	-[c]	-[c]	0,22[b]	*	-[c]	-[c]	-[c]	ns	0,17[b]	0,14[b]	0,31[a]	*	-[c]	-[c]	-[c]	ns
α-terpinene	1175	-[c]	-[c]	0,09[b]	*	-[c]	0,07[b]	-[c]	*	0,20[a]	0,22[a]	0,30[a]	ns	0,03[b]	0,02[b]	0,16[a]	*
Limonene	1195	0,25[c]	0,21[c]	0,60[b]	**	0,35[b]	0,34[b]	1,28[a]	**	0,44[b]	0,19[c]	0,39[b]	*	0,32[b]	0,12[c]	1,02[a]	**
β-fellandrene	1206	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	-[c]	-[c]	ns	0,28[a]	0,16[a]	0,27[a]	ns	0,02[b]	0,01[b]	0,14[b]	ns
Eucaliptolo	1211	2,46[h]	1,41[i]	9,51[c]	***	4,06[g]	4,48[g]	16,43[a]	***	5,95[e]	5,97[e]	10,84[b]	*	5,33[f]	4,83[g]	8,23[d]	*
γ-terpinene	1246	0,14[b]	0,08[b]	0,19[b]	*	-[c]	0,10[b]	0,15[b]	ns	0,36[a]	0,51[a]	0,59[a]	ns	0,05[b]	0,08[b]	0,49[a]	*
β-ocimene	1251	-[e]	-[e]	-[e]		1,15[a]	0,09[c]	0,38[b]	**	0,13[c]	0,17[c]	0,44[b]	*	0,04[d]	0,01[d]	0,09[d]	ns
p-cimene	1270	1,16[a]	0,23[b]	0,40[b]	*	-[d]	0,24[b]	0,15[b]	ns	-[d]	0,08[c]	0,08[c]	ns	-[d]	0,09[c]	0,04[c]	ns
Terpinolene	1285	-[c]	-[c]	0,06[b]	*	-[c]	0,19[a]	0,26[a]	*	-[c]	0,14[a]	0,20[a]	ns	-[c]	0,02[b]	0,18[a]	*
Linalolo	1548	0,20[c]	0,93[b]	0,21[c]	**	0,68[c]	2,02[a]	1,22[b]	*	0,95[b]	0,84[c]	0,58[c]	*	0,57[c]	0,61[c]	0,67[c]	ns
Pinocarvone	1588	0,13[b]	0,13[b]	0,26[a]	*	-[d]	0,12[b]	0,13[b]	ns	-[d]	0,08[c]	0,06[c]	ns	-[d]	0,06[c]	0,05[c]	ns
Acetato di bornile	1599	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	0,25[b]	0,22[b]	ns	-[c]	0,17[b]	0,70[a]	**
β-ciclocitrale	1640	0,29[c]	0,44[b]	0,17[c]	*	-[d]	1,20[a]	0,34[b]	**	-[d]	0,34[c]	-[d]	*	-[d]	0,16[c]	-[d]	*
trans-pinocarveolo	1653	0,16[b]	-[d]	0,43[a]	*	-[d]	-[d]	-[d]	ns	-[d]	-[d]	-[d]	ns	-[d]	0,07[c]	-[d]	*
Acetato di 1-norbornanemetanolo	1705	-[d]	-[d]	-[d]	ns	-[d]	-[d]	-[d]	ns	2,60[a]	2,16[a]	2,62[a]	ns	0,38[c]	1,35[b]	2,88[a]	*
α-terpineolo	1709	0,36[e]	0,28[f]	1,37[c]	**	-[h]	1,24[c]	2,26[b]	*	3,34[a]	0,94[d]	1,17[c]	**	0,08[g]	0,24[f]	0,98[d]	*
Geraniale	1747	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	0,03[a]	-[b]	*	-[b]	0,07[a]	-[b]	*
trans-piperitolo	1757	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	0,04[b]	-[c]	*	-[c]	0,13[a]	-[c]	*
Acetato di geranile	1764	-[c]	-[c]	-[c]	ns	-[c]	-[c]	-[c]	ns	0,23[b]	0,77[a]	-[c]	*	0,19[b]	0,31[b]	-[c]	*
trans-geranilacetone	1867	3,66[c]	3,81[c]	4,24[b]	*	5,31[a]	5,07[a]	5,19[a]	ns	0,65[e]	0,56[e]	0,59[e]	ns	4,93[b]	1,33[d]	1,51[d]	**
α-ionone	1871	-[d]	-[d]	-[d]	ns	-[d]	-[d]	-[d]	ns	-[d]	0,27[b]	0,04[c]	*	-[d]	0,59[a]	-[d]	*
β-ionone	1961	0,40[c]	0,82[b]	0,13[d]	**	-[f]	1,37[a]	0,17[d]	**	-[f]	0,31[d]	0,02[e]	*	-[f]	0,69[c]	0,06[e]	**
Totale		***9,54d***	***8,76d***	***21,73b***	***	***12,46d***	***18,75c***	***36,56a***	**	***17,04c***	***16,72c***	***24,19b***	*	***13,98c***	***11,77c***	***24,46b***	**
Sesquiterpeni																	
β-cubebene	1567	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	-[b]	-[b]	ns	-[b]	0,03[a]	-[b]	*	-[b]	0,03[a]	-[b]	*
Cariofillene	1623	-[f]	-[f]	-[f]	ns	-[f]	0,46[b]	0,98[a]	*	0,10[e]	0,07[e]	0,61[b]	**	0,30[c]	0,20[d]	0,98[a]	**
γ-cadinene	1782	-[e]	-[e]	-[e]	ns	-[e]	0,31[b]	0,67[a]	*	0,07[d]	0,31[b]	0,40[b]	*	0,03[d]	0,47[b]	0,20[c]	**

Cada-1,4-diene	1807	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	0,21^{b}	0,40^{a}	*	-^{c}	0,25^{b}	0,53^{a}	**
4-epi-cubebolo	1957	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	0,22^{b}	0,41^{a}	*	-^{c}	0,23^{b}	0,29^{b}	*
Ossido di cariofillene	2018	0,08^{d}	-^{e}	0,30^{a}	*	-^{e}	0,50^{a}	0,26^{b}	*	-^{e}	0,19^{c}	0,28^{b}	*	-^{e}	0,17^{c}	0,13^{c}	*
(E)-nerolidolo	2044	-^{d}	-^{d}	-^{d}	ns	0,80^{c}	1,11^{b}	1,40^{b}	*	0,21^{c}	1,22^{b}	2,09^{a}	*	-^{d}	-^{d}	0,12^{c}	*
β-elemolo	2094	-^{c}	-^{c}	-^{c}	ns	-^{c}	0,37^{a}	0,69^{a}	*	-^{c}	0,28^{b}	0,24^{b}	ns	-^{c}	-^{c}	0,25^{b}	*
Totale		***0,08^{e}***	***-^{f}***	***0,30^{d}***	*	***0,80^{d}***	***2,74^{b}***	***4,00^{a}***	*	***0,38^{d}***	***2,54^{b}***	***4,43^{a}***	**	***0,34^{d}***	***1,36^{c}***	***2,49^{b}***	**
Totale terpeni		***9,63^{c}***	***8,76^{c}***	***22,04^{b}***	**	***13,26^{c}***	***21,49^{b}***	***40,56^{a}***	**	***17,42^{b}***	***19,26^{b}***	***28,61^{b}***	ns	***14,32^{c}***	***13,13^{c}***	***26,95^{b}***	**
Altri																	
2-metil-anisolo	1420	-^{e}	-^{e}	-^{e}	ns	-^{e}	-^{e}	0,09^{d}	*	0,28^{c}	0,33^{c}	0,09^{d}	**	0,75^{a}	0,84^{a}	0,44^{b}	*
Salicilato di metile	1802	0,70^{d}	0,17^{e}	-^{f}	*	5,84^{a}	3,24^{b}	1,52^{c}	**	0,12^{e}	-^{f}	0,02^{e}	*	0,26^{d}	0,13^{d}	-^{f}	*
Totale		***0,70^{c}***	***0,17^{d}***	***-^{e}***	*	***5,84^{a}***	***3,24^{b}***	***1,61^{c}***	**	***0,40^{d}***	***0,33^{d}***	***0,11^{d}***	*	***1,01^{c}***	***0,98^{c}***	***0,44^{c}***	*

LRI = indice di ritenzione lineare calcolato su una colonna capillare VF-wax da 60 m; lettere minuscole diverse in apice nella stessa riga indicano differenze significative tra i campioni ($p < 0,05$) secondo il test dei range multipli di Duncan; le differenze statisticamente significative tra campioni freschi, essiccati ad aria calda (HAD) e a microonde (MWD) sono indicate come: $p < 0,001$ (***), $p < 0,01$ (**) o $p < 0,05$ (*); ns = non significativo ($p > 0,05$).

5.2.3 Analisi sensoriale e accettabilità dei consumatori

La Tabella 5.5 riporta i descrittori sensoriali relativi all'aspetto, odore, gusto e sensazione in bocca insieme ai punteggi dell'analisi sensoriale QDA. Sono state osservate differenze statisticamente significative per la maggior parte dei descrittori in base alla varietà e alle tecnologie di essiccazione. Per comprendere meglio le differenze tra le varietà e le tecnologie di essiccazione, è stata eseguita un'analisi PCA sui dati sensoriali come riportato nella Figura 5.1.

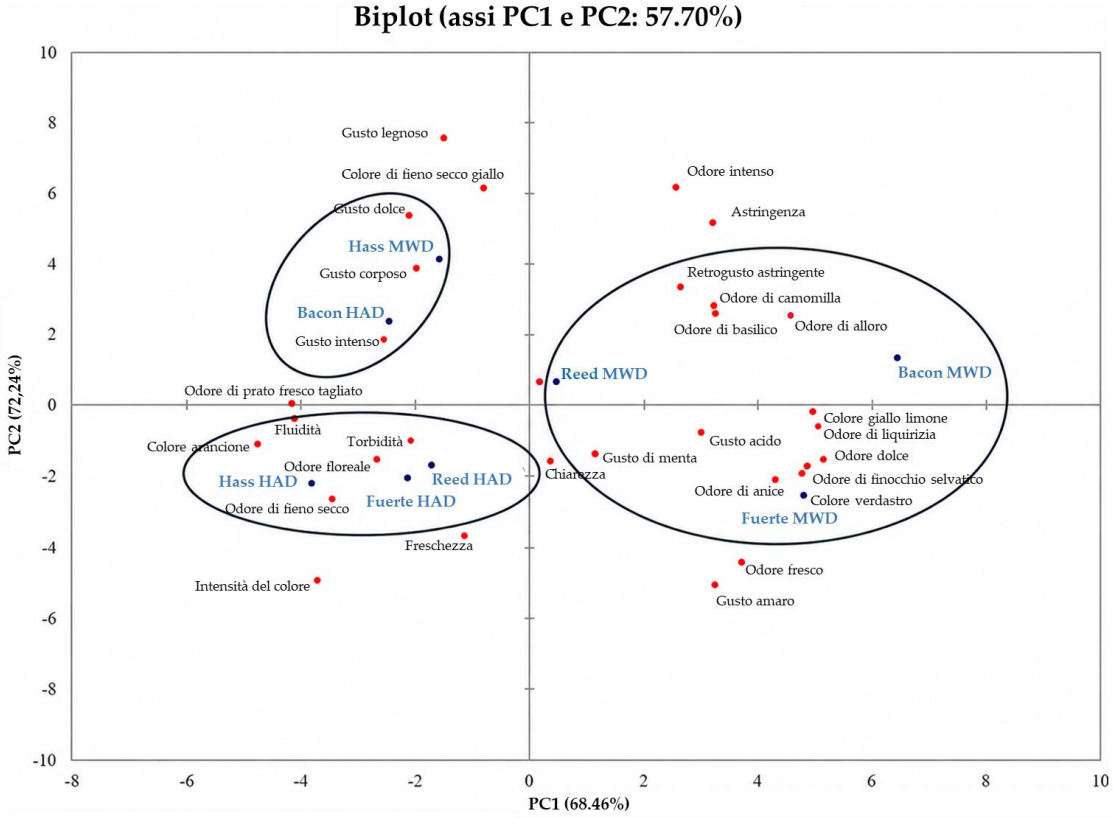


Figura 5.1. Grafico PCA dei dati sensoriali QDA degli infusi di avocado preparati con foglie essiccate ad aria calda (HAD) e essiccate a microonde (MWD) di diverse varietà.

La PCA è stata in grado di separare i campioni in base alla varietà e alla tecnologia di essiccazione utilizzata. Tutti gli infusi MWD, eccetto per Hass, si sono posizionati sul lato positivo di PC1 caratterizzati da odore di anice, liquirizia, basilico, finocchio selvatico, alloro e fresco, gusto acido e amaro e astringenza; questi ultimi descrittori sono probabilmente correlati al contenuto più elevato di polifenoli nei campioni MWD. I campioni MWD erano anche caratterizzati da un colore più giallo se confrontati con quelli HAD, che erano caratterizzati da un colore arancione più intenso. Il colore degli infusi è un indicatore importante della loro qualità; la temperatura e il tempo di essiccazione sono i principali fattori che influenzano il colore. Un'essiccazione prolungata ad alte temperature potrebbe risultare in imbrunimento non enzimatico includendo un ampio numero di reazioni come la reazione di Maillard, la caramellizzazione e la maderizzazione; inoltre, la degradazione dei pigmenti, come la clorofilla, potrebbe verificarsi durante lunghi processi di essiccazione, il che porterebbe alla

perdita del colore verde (Xiangyang et al., 2010; Roshanak et al., 2016). Infusi HAD, ad eccezione di Bacon, si trovavano sul lato negativo di PC1 e PC2, e le loro differenze erano principalmente legate, oltre al colore, anche all'odore di fieno secco, floreale e di erba tagliata fresca. Infine, Hass MWD e Bacon HAD erano sul lato negativo della PC1 e sul lato positivo della PC2, ed erano caratterizzate principalmente per un gusto intenso di terra e legno. Per quanto riguarda l'accettabilità sensoriale (Tabella 5.4), i consumatori hanno indicato una maggiore preferenza per MWD Fuerte e Bacon. Questa preferenza è principalmente basata sui punteggi di odore e sapore, che sono risultati molto simili a quelli dell'infuso con foglie di alloro, più popolare e ampiamente utilizzata, usata come confronto.

Tabella 5.4. Accettabilità sensoriale da parte dei consumatori degli infusi di avocado preparate con foglie essiccate ad aria calda (HAD) e a microonde (MWD) di varietà diverse rispetto agli infusi con foglie di alloro.

	Hass HAD	**Hass MWD**		**Reed HAD**	**Reed MWD**		**Fuerte HAD**	**Fuerte MWD**		**Bacon HAD**	**Bacon MWD**		**Infuso con foglie di alloro**
Colore	6.00	6.25	ns	6.00	5.75	ns	6.25	6.25	ns	6.25	6.75	ns	6.25
Odore	3.75^{c}	3.00^{c}	ns	3.75^{c}	5.25^{b}	*	4.75^{b}	7.25^{a}	*	5.25^{b}	8.00^{a}	*	6.75
Gusto	4.75^{b}	4.00^{b}	ns	4.75^{b}	4.50^{b}	ns	4.50^{b}	6.00^{a}	*	4.25^{b}	6.00^{a}	*	6.25
Accettabilità globale	4.83^{b}	4.42^{b}	ns	4.83^{b}	5.17^{b}	ns	5.17^{b}	6.50^{a}	*	5.25^{b}	6.92^{a}	*	6.00

Lettere minuscole in apice diverse nella stessa riga indicano differenze significative a $P < 0,05$ tra i campioni secondo il test di Duncan a intervalli multipli; ns = non statisticamente significativo ($P > 0,05$); Differenze statisticamente significative tra campioni HAD e MWD a $P < 0,001$ (***), $P < 0,01$ (**), o $P < 0,05$ (*)

La preferenza per gli infusi MWD Fuerte e Bacon potrebbe essere dovuta ai loro odori più simili all'anice e al finocchio selvatico, che conferiscono note più dolci e fresche, maggiormente apprezzate dai consumatori di tisane. Al contrario, il minore apprezzamento per gli infusi Hass e Reed era dovuto alle note verdi più persistenti di queste due varietà. La PCA è stata anche effettuata per indagare la correlazione tra la qualità sensoriale dell'aroma e i composti volatili. I valori delle concentrazioni relative dei principali composti volatili e dei descrittori sensoriali dell'odore sono stati inclusi nell'analisi multivariata dei dati. Come si può vedere dal loading plot dell'elaborazione PCA (Figura 5.2), gli infusi Fuerte e Bacon sono stati separati dai campioni Reed e Hass lungo la PC1, con le varietà Fuerte e Bacon nella regione positiva e Reed e Hass in quella negativa. La PC2 ha separato le varietà in relazione alla tecnologia di essiccazione. Le variabili maggiormente pesate sul lato positivo della PC1 erano odori di anice, basilico, alloro e finocchio selvatico insieme a estragolo, (E)-anetolo, metileugenolo ed eucaliptolo, mentre (E)-2-esanale, ottanale, nonanale, decanale, (Z)-3-esen-1-olo e i descrittori sensoriali di odori di erba tagliata fresca, fieno secco e legnoso erano principalmente pesati sul lato negativo. Le informazioni ottenute dall'analisi multivariata hanno permesso di correlare i volatili dell'odore a quei descrittori sensoriali e hanno facilmente consentito di verificare le differenze tra i campioni che influenzano l'accettabilità dei consumatori.

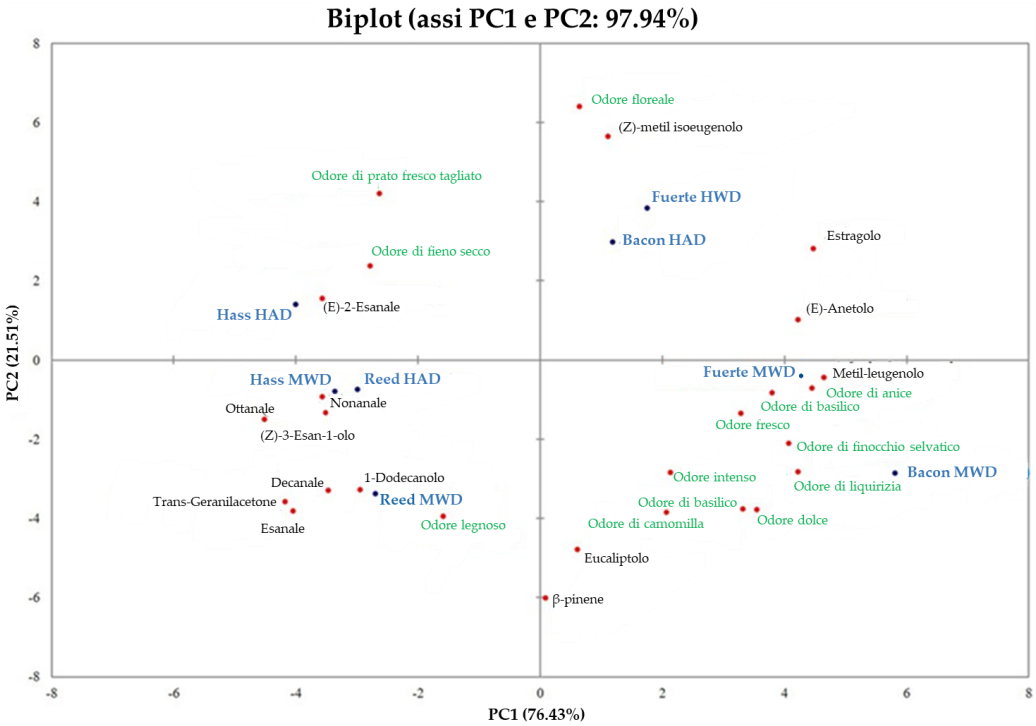


Figura 5.2. Grafico dei valori PCA dei principali composti aromatici volatili e dei descrittori sensoriali dell'odore degli infusi di foglie di avocado preparati con foglie essiccate ad aria calda (HAD) e microonde (MWD) di diverse varietà.

Tabella 5.5. Dati sensoriali QDA degli infusi di avocado preparate con foglie essiccate ad aria calda (HAD) e con microonde (MWD) di diverse varietà

	Hass HAD	Hass MWD		Reed HAD	Reed MWD		Fuerte HAD	Fuerte MWD		Bacon HAD	Bacon MWD	
Aspetto												
Colore giallo limone	1.00^{b}	1.75^{b}	ns	1.25^{b}	5.75^{a}	**	1.00^{b}	6.50^{a}	**	1.00^{b}	6.33^{a}	**
Colore giallo fieno secco	1.00^{c}	7.67^{a}	***	1.00^{c}	2.00^{b}	*	1.00^{c}	1.25^{c}	ns	1.75^{b}	1.33^{b}	ns
Colore verdastro	1.00^{c}	1.00^{c}	ns	1.00^{c}	2.50^{b}	*	1.00^{c}	4.67^{a}	*	1.00^{c}	3.00^{b}	*
Colore arancione	7.25^{a}	4.67^{b}	**	6.33^{a}	1.00^{c}	***	7.00^{a}	1.00^{c}	***	6.50^{a}	1.00^{c}	***
Intensità del colore	7.00^{a}	4.25^{b}	**	6.67^{a}	4.75^{b}	*	5.50^{b}	5.50^{b}	ns	5.75^{b}	3.00^{c}	*
Limpidezza	6.33^{a}	7.50^{a}	ns	7.33^{a}	5.50^{b}	*	7.25^{a}	6.75^{a}	ns	5.00^{b}	6.67^{a}	*
Torbidità	4.00^{a}	1.50^{b}	*	2.00^{b}	3.67^{a}	*	1.75^{b}	1.00^{c}	*	2.00^{b}	2.00^{b}	ns
Odore												
Erba appena tagliata	2.00^{b}	2.75^{a}	ns	2.50^{a}	2.00^{b}	ns	3.00^{a}	1.75^{b}	*	2.25^{a}	1.00^{c}	*
Alloro	1.00^{c}	1.25^{c}	ns	1.00^{c}	1.67^{b}	ns	1.00^{c}	1.50^{b}	ns	1.67^{b}	3.50^{a}	*
Basilico	1.00^{d}	1.00^{d}	ns	1.00^{d}	1.00^{d}	ns	1.33^{c}	2.00^{c}	ns	3.75^{b}	5.33^{a}	*
Anice	1.00^{c}	1.00^{c}	ns	1.00^{c}	1.00^{c}	ns	5.00^{b}	5.67^{b}	ns	1.00^{c}	7.25^{a}	***
Finocchio selvatico	1.00^{d}	1.00^{d}	ns	1.00^{d}	1.00^{d}	ns	1.33^{c}	8.33^{a}	***	1.67^{c}	6.33^{b}	***
Liquirizia	1.00^{d}	1.00^{d}	ns	1.00^{d}	1.00^{d}	ns	1.50^{c}	3.75^{b}	*	1.00^{d}	5.33^{a}	**
Camomilla	1.25^{c}	2.25^{b}	*	2.25^{b}	1.50^{c}	ns	1.33^{c}	1.00^{c}	ns	1.25^{c}	5.33^{a}	**
Floreale	1.67^{b}	1.00^{c}	ns	1.33^{b}	1.00^{c}	ns	4.00^{a}	1.00^{c}	*	3.00^{a}	1.00^{c}	*
Fieno secco	3.00^{a}	1.33^{b}	*	1.50^{b}	1.67^{b}	ns	1.75^{b}	1.00^{c}	*	1.50^{b}	1.25^{b}	ns
Legnoso	1.00^{c}	1.00^{c}	ns	1.25^{b}	3.50^{a}	*	1.00^{c}	1.00^{c}	ns	1.00^{c}	1.00^{c}	ns
Intenso	4.00^{b}	5.00^{a}	*	4.50^{b}	5.00^{a}	ns	4.25^{b}	4.50^{b}	ns	5.50^{a}	5.75^{a}	ns
Fresco	1.33^{c}	1.25^{c}	ns	3.50^{a}	1.75^{b}	*	3.50^{a}	4.25^{a}	ns	1.00^{d}	4.00^{a}	**
Dolce	1.25^{b}	1.25^{b}	ns	1.50^{b}	1.50^{b}	ns	1.00^{c}	3.50^{a}	*	1.00^{c}	3.25^{a}	*
Gusto												
Retrogusto astringente	2.50^{b}	4.33^{a}	*	2.33^{b}	4.00^{a}	*	3.00^{a}	3.75^{a}	ns	2.33^{b}	3.50^{a}	ns
Acido	1.25^{c}	1.00^{c}	ns	1.50^{a}	1.75^{a}	ns	1.00^{b}	1.25^{a}	*	1.00^{b}	1.75^{a}	*
Amaro	1.33^{a}	1.00^{a}	ns	1.67^{a}	1.67^{a}	ns	1.25^{a}	2.00^{a}	ns	1.00^{a}	1.50^{a}	ns
Dolce	1.00^{b}	3.75^{a}	*	3.50^{a}	3.50^{a}	ns	1.33^{b}	1.00^{b}	ns	4.25^{a}	1.33^{b}	*

Legnoso	1.50^{b}	3.75^{a}	*	1.50^{b}	2.00^{b}	ns	2.00^{b}	1.00^{b}	ns	3.50^{a}	2.25^{a}	ns
Corposo	1.50^{a}	2.00^{a}	ns	1.00^{b}	1.00^{b}	ns	1.00^{b}	1.00^{b}	ns	1.00^{b}	1.00^{b}	ns
Menta	1.00^{b}	1.00^{b}	ns	1.00^{b}	1.00^{b}	ns	2.50^{a}	1.00^{b}	*	1.00^{b}	2.00^{a}	ns
Intenso	4.67^{a}	2.50^{b}	*	1.67^{b}	2.75^{b}	ns	2.00^{b}	1.00^{c}	*	3.50^{a}	2.75^{a}	ns
Sensazione in bocca												
Astringenza	1.67^{b}	4.00^{a}	*	1.67^{b}	2.33^{b}	ns	2.33^{b}	3.00^{b}	ns	2.33^{b}	3.75^{a}	*
Fluidità	6.33^{a}	4.50^{b}	*	6.67^{a}	4.67^{b}	*	7.00^{a}	1.33^{c}	***	6.00^{a}	4.33^{b}	*
Freschezza	4.25^{a}	3.50^{a}	ns	2.33^{b}	2.00^{b}	ns	4.25^{a}	3.25^{a}	ns	1.00^{c}	2.25^{b}	*

Lettere diverse nella stessa riga indicano differenze significative a $p < 0,05$ tra i campioni mediante il test a intervalli multipli di Duncan; Differenze statisticamente significative tra campioni Fresh, HAD e MWD a $p < 0,001$ (***), $p < 0,01$ (**) o $p < 0,05$ (*); ns = non statisticamente significativo ($p > 0,05$).

5.3 Conclusioni

Seguendo i principi dell'economia circolare e rispondendo alla crescente domanda di infusi nei mercati europei, questo studio ha evidenziato il potenziale degli scarti delle foglie di avocado come materia prima per la produzione di infusi funzionali e graditi ai consumatori.

I risultati hanno mostrato che la tecnologia di essiccazione influisce in modo significativo sulla qualità finale degli infusi, con effetti differenti a seconda della varietà di avocado considerata. In particolare, l'essiccazione a microonde si è dimostrata la soluzione più vantaggiosa: oltre a essere più sostenibile grazie ai minori consumi energetici e ai tempi di lavorazione ridotti, questa tecnologia ha favorito un aumento dei composti bioattivi e un miglioramento delle caratteristiche sensoriali, soprattutto nelle varietà Fuerte e Bacon.

Queste ultime sono risultate le più apprezzate dai consumatori per le loro note aromatiche di anice e finocchio, associate alla maggiore presenza di composti volatili come estragolo e metil eugenolo.

Nel complesso, il recupero e la valorizzazione degli scarti delle foglie di avocado, considerando sia la varietà sia la tecnica di essiccazione impiegata, rappresentano una strategia efficace per aumentare la sostenibilità economica e ambientale della filiera produttiva. Inoltre, l'approccio adottato nello studio fornisce indicazioni utili per lo sviluppo di nuovi infusi sostenibili, funzionali e in linea con le aspettative dei consumatori.

Poiché le foglie eliminate durante le pratiche agronomiche mantengono un elevato contenuto di composti bioattivi, il loro riutilizzo per la produzione di infusi da scarti agricoli merita ulteriore attenzione e valorizzazione nell'ambito dell'industria alimentare sostenibile.

Capitolo 6 - Conclusioni generali

La presente tesi ha affrontato in maniera sistemica e multidisciplinare il tema della valorizzazione dei sottoprodotti della filiera dell'avocado coltivato in Sicilia, inserendosi pienamente nel quadro dell'economia circolare e della sostenibilità agroalimentare. L'analisi integrata degli aspetti agronomici, chimici, sensoriali e tecnologici ha permesso di dimostrare come matrici tradizionalmente considerate scarti, in particolare semi e foglie, possano essere reinterpretate come risorse ad elevato potenziale applicativo.

I risultati ottenuti evidenziano chiaramente che tali sottoprodotti sono caratterizzati da una composizione ricca di composti bioattivi, tra cui polifenoli, molecole aromatiche e componenti funzionali, capaci di conferire proprietà antiossidanti e di contribuire alla stabilità e qualità degli alimenti. In particolare, il seme di avocado si configura come una matrice versatile, idonea alla produzione di farine funzionali e alla possibile applicazione come agente aromatizzante naturale, grazie al suo profilo volatile modulabile attraverso specifici trattamenti tecnologici. Parallelamente, le foglie hanno mostrato un significativo contenuto in composti fenolici e una spiccata identità aromatica, risultando promettenti per lo sviluppo di infusi e preparazioni funzionali ad elevato valore aggiunto.

Un elemento chiave emerso dagli studi sperimentali riguarda il ruolo determinante dei processi di essiccazione nel definire la qualità finale delle matrici. Le condizioni operative adottate influenzano in modo significativo non solo la preservazione dei composti bioattivi, ma anche il profilo sensoriale e l'accettabilità dei prodotti. In particolare, trattamenti a condizioni intermedie (come microonde a media potenza o essiccazione ad aria a temperature controllate) si sono rivelati ottimali per ottenere farine e prodotti con caratteristiche aromatiche più equilibrate e maggiormente apprezzate dai consumatori.

Dal punto di vista sensoriale, la correlazione tra composizione chimica e percezione degli aromi ha fornito indicazioni fondamentali per lo sviluppo di ingredienti innovativi. I risultati dei test di accettabilità hanno confermato che le scelte tecnologiche incidono direttamente sulla percezione del consumatore, evidenziando come sia possibile orientare i processi produttivi per ottenere prodotti non solo sostenibili, ma anche competitivi sotto il profilo edonico.

Nel complesso, i risultati della ricerca dimostrano che la valorizzazione dei sottoprodotti dell'avocado rappresenta una strategia concreta per ridurre l'impatto ambientale della filiera, migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse e promuovere la diversificazione produttiva nel contesto agroalimentare siciliano. Il recupero di queste biomasse consente infatti di trasformare un problema gestionale, rappresentato dall'accumulo di scarti, in un'opportunità di innovazione e sviluppo di nuovi prodotti a elevato valore aggiunto.

Tuttavia, lo studio presenta alcuni limiti che richiedono ulteriori approfondimenti, tra cui la standardizzazione delle materie prime, la variabilità compositiva legata alla cultivar e alle condizioni agronomiche, nonché gli aspetti legati alla sicurezza e alla normativa per l'utilizzo alimentare di tali matrici. In particolare, la presenza di composti potenzialmente sensibili, come alcune sostanze bioattive, impone un approccio prudente nella definizione delle applicazioni industriali. Infine, per quanto riguarda le farine di semi, non sono state effettuate valutazioni di accettabilità da parte dei consumatori su prodotti ottenuti dalla loro incorporazione in matrici alimentari complesse (ad esempio prodotti da forno o bevande formulate). Di conseguenza, l'effettiva accettabilità commerciale dei prodotti finiti dovrà essere confermata attraverso ulteriori studi.

Alla luce di tali limiti, gli sviluppi futuri della ricerca dovranno orientarsi verso le seguenti direttrici:

- estensione del campionamento a più cultivar, areali di coltivazione siciliani (versante ionico, tirrenico, aree interne) e annate agrarie, al fine di distinguere la variabilità varietale da quella ambientale e di costruire un dataset rappresentativo della produzione regionale;
- quantificazione analitica della persina e di altri eventuali composti di interesse tossicologico nella farina di semi e nelle sue diverse condizioni di processo, mediante metodiche cromatografiche dedicate (es. HPLC-MS), con definizione di un margine di sicurezza in funzione delle dosi di impiego previste;
- sviluppo di prototipi alimentari reali (es. prodotti da forno con farina di semi) e valutazione della loro accettabilità in condizioni di consumo realistico, incluse prove di shelf-life e di stabilità del profilo aromatico nel tempo;
- approfondimento degli aspetti tecnologici ed economici di scala (resa di processo, costi energetici dell'essiccamento, fattibilità di una filiera di raccolta e trattamento dei sottoprodotti su scala industriale), al fine di valutare la reale sostenibilità economica delle applicazioni proposte.

In conclusione, questa tesi fornisce un contributo scientifico concreto alla comprensione e valorizzazione dei sottoprodotti dell'avocado, proponendo un modello replicabile di gestione sostenibile delle filiere agroalimentari. I risultati ottenuti aprono nuove prospettive di ricerca e applicazione, favorendo lo sviluppo di strategie integrate che coniughino innovazione tecnologica, sostenibilità ambientale e accettabilità da parte del consumatore, con l'obiettivo di promuovere un sistema alimentare più efficiente, resiliente e circolare.

Bibliografia

Alcaraz, M. L., & Hormaza, J. I. (2024). Inadequate pollination is a key factor determining low fruit-to-flower ratios in avocado. *Horticulturae*, *10*(2), 140.

Arango, J. P. B., Ospina, A. P., Ladino, J. A. F., & Ocampo, G. T. (2025). Volatilomic Analysis in Peel, Pulp and Seed of Hass Avocado (*Persea americana* Mill.) From the Northern Subregion of Caldas by Gas Chromatography With Mass Spectrometry. *Food Science & Nutrition*, 13(7), Article e70489.

Araújo, R. G., Rodriguez-Jasso, R. M., Ruiz, H. A., Pintado, M. M. E., & Aguilar, C. N. (2018). *Avocado by-products: Nutritional and functional properties*. *Trends in Food Science & Technology, 80*, 51–60.

Babiker, E. E., Ahmed, I. A. M., Uslu, N., O¨ zcan, M. M., Al Juhaimi, F., Ghafoor, K., & Almusallam, I. A. (2021). Influence of drying methods on bioactive properties, fatty acids and phenolic compounds of different parts of ripe and unripe avocado fruits. *Journal of Oleo Science*, 70(4), 589–598.

Bayomy, H. M., Alamri, E. S., & Rozan, M. A. (2023). Effect of roasting Hass avocado kernels on nutritional value and volatile compounds. *Processes*, 11(2), 377.

Bhore, S.J., Ochoa, D.S., Al Houssari, A. et al. (2021). The avocado (*Persea americana* Mill.): A review and sustainability perspectives. *Preprints*, 2021120523.

Bhuyan, D. J., Alsherbiny, M. A., Perera, S., Low, M., Basu, A., Devi, O. A.,Barooah, M. S., Li, C. G., & Papoutsis, K. (2019). The odyssey of bioactive compounds in avocado (*Persea americana*) and their health benefits. *Antioxidants*, 8 (10), 426.

C´arceles Rodríguez, B., Dur´an Zuazo, V. H., Franco Tarifa, D., Cuadros Tavira, S., Sacristan, P. C., & García-Tejero, I. F. (2023). Irrigation alternatives for avocado (*Persea americana* Mill.) in the Mediterranean subtropical region in the context of climate change: A review. *Agriculture,* 13(5), 1049.

Castro-López, C., Bautista-Hernández, I., González-Hernández, M. D., Martínez-Ávila, G. C., Rojas, R., Gutiérrez-Díez, A., ... & Aguirre-Arzola, V. E. (2019). Polyphenolic profile and antioxidant activity of leaf purified hydroalcoholic extracts from seven Mexican *Persea americana* cultivars. *Molecules*, *24*(1), 173.

Charles, A. C., Dadmohammadi, Y., & Abbaspourrad, A. (2022). Food and cosmetic applications of the avocado seed: A review. *Food & Function*, 13(13), 6894–6901.

Chen, P., Zhao, S., Li, C., Zhang, T., Xing, Y., Zhang, K., Lv, J., & Zhu, W. (2025). Changes and Analytical Techniques in Volatile Flavor Compounds in Dried Agricultural Products: A Review. *Foods*, 14(20), 3531.

Cincotta, F., Merlino, M., Condurso, C., Miller, A., Torre, M., & Verzera, A. (2024). Avocado leaf-waste management: Drying technology and quality of leaf herbal teas of different varieties cultivated in the Mediterranean area. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(4), 2516–2523.

Cincotta, F., Torre, M., Merlino, M., Condurso, C., Buda, M., & Verzera, A. (2025). Sustainable Herbal Teas from Fig (Ficus carica L.) Waste Leaves: Volatile Fingerprinting, Sensory Descriptors, and Consumer Acceptability. *Beverages*, 11(1),16.

Condurso, C., Cincotta, F., Tripodi, G., Merlino, M., & Verzera, A. (2019). Influence of drying technologies on the aroma of Sicilian red garlic. *Lwt,* 104, 180–185.

CREA – Centro di ricerca Politiche e Bioeconomia. (2024). *Annuario dell'agricoltura italiana 2023* (Vol. LXXVII). Roma: CREA.

Dabas, D., Shegog, R. M., Ziegler, G. R., & Lambert, J. D. (2013). *Avocado (Persea americana) seed as a source of bioactive phytochemicals*. *Current Pharmaceutical Design, 19*(34), 6133–6140.

De Montijo-Prieto, S., Razola-Dıaz, M.D.C., Barbieri, F. et al. (2023). Impact of lactic acid bacteria fermentation on phenolic compounds and antioxidant activity of avocado leaf extracts. *Antioxidants*, 12, 298.

Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 243–248.

Dreher, M. L., Cheng, F. W., & Ford, N. A. (2021). *A Comprehensive Review of Hass Avocado Clinical Trials, Observational Studies, and Biological Mechanisms*. *Nutrients, 13*(12), 4376.

Duarte, P.F., Chaves, M.A., Borges, C.D. & Mendonca, C.R.B. (2016). Avocado: characteristics, health benefits and uses. *Ciencia* rural, 46, 747–754.

Elsayed, S., & Elsayed, H. (2024). Boosting the nutritional value of stirred yogurt by adding nano-sized avocado seed powder and *Lactobacillus acidophilus*. *Egyptian Journal of Chemistry*, 67(13), 13–25.

Fahs, H. Z., Refai, F. S., Gopinadhan, S., Moussa, Y., Gan, H. H., Hunashal, Y., Battaglia, G., Cipriani, P. G., Ciancia, C., Rahiman, N., Kremb, S., Xie, X., Pearson, Y. E., Butterfoss, G. L., Maizels, R. M., Esposito, G., Page, A. P., Gunsalus, K. C., & Piano, F. (2025). A new class of natural anthelmintics targeting lipid metabolism. *Nature communications*, 16(1), 305.

FAO (2023). *Major Tropical Fruits Market Review– Preliminary Results 2022.* Rome: FAO.

Fe´liz-Jime´nez, A., & Sanchez-Rosario, R. (2024). Bioactive compounds, composition and potential applications of avocado agro-industrial residues: A review. *Applied Sciences*, 14(21), Article 10070.

Figueroa, J. G., Borra´s-Linares, I., Lozano-S´anchez, J., Quirantes-Pin´e, R., & Segura- Carretero, A. (2025). Advanced recovery of bioactive polyphenols: Integrated optimization of drying and green extraction for avocado seed by-products. *Food Chemistry*: X., Article 103216.

Ford, N. A., Spagnuolo, P., Kraft, J., & Bauer, E. (2023). *Nutritional Composition of Hass Avocado Pulp*. *Foods, 12*(13), 2516.

Fufa, D. D., Bekele, T., Bultosa, G., & Tamene, A. (2025a). Avocado seeds valorization for sustainable food ingredient use: Quality attributes evaluation in the traditional fermented teff injera. *Discover Sustainability*, 6(1), 1–23.

Fufa, D. D., Bekele, T., Tamene, A., & Bultosa, G. (2025b). Drying kinetic models, thermodynamics, physicochemical qualities, and bioactive compounds of avocado (*Persea americana* Mill. Hass variety) seeds dried using various drying methods.*Heliyon*, 11(1).

Galindo-Tovar, M. E., Arzate-Fernández, A. M., Ogata-Aguilar, N., & Landero-Torres, I. (2007). The avocado (Persea americana, Lauraceae) crop in Mesoamerica: 10,000 years of history. Harvard papers in botany, 325-334.

Guzman-Geronimo, R.I., Lopez, M.G. & Dorantes-Alvarez, L. (2008). Microwave processing of avocado: volatile flavor profiling and olfactometry. *Innovative Food Science & Emerging Technolo gies,* 9, 501–506.

Han, H., Wang, H., Gao, G. et al. (2022). pH effect on colloidal characteristics of micro-nano particles in lapsang souchong black tea infusion. *Food Control*, 133, 108643.

ISO 8586:2023. (2023). Sensory analysis—selection and training of sensory assessors. Geneva, Switzerland: ISO.

Jaramillo-De la Garza, J. S., Rodríguez-Sa´nchez, D. G., Herna´ndez-Brenes, C., & Heredia- Olea, E. (2025). Development and Consumer Acceptability of Functional Bread Formulations Enriched with Extruded Avocado Seed Flour: Nutritional and Technological Properties. *Foods*, 14(24), 4282.

Jimenez, P., Garcia, P., Quitral, V. et al. (2021). Pulp, leaf, peel and seed of avocado fruit: a review of bioactive compounds and healthy benefits. *Food Reviews International*, 37, 619–655.

Jimenez, P., Garcia, P., Quitral, V., Vasquez, K., Parra-Ruiz, C., Reyes-Farias, M., Garcia- Diaz, D. F., Robert, P., Encina, C., & Soto-Covasich, J. (2021). Pulp, Leaf, Peel and Seed of Avocado Fruit: A Review of Bioactive Compounds and Healthy Benefits. *Food Reviews International*, 37(6), 619–655.

Joardder, M. U., & Karim, A. (2023). Pore evolution in cell walls of food tissue during microwave-assisted drying: An in-depth investigation. *Foods*, 12(13), 2497.

Karaaslan, S., & Ekinci, K. (2023). Determination and mathematical modeling of drying kinetics of avocado slices by tunnel type solar drying and microwave drying method. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(2), 305–312.

King, J.R. & Knight, R.J. (1992). Volatile components of the leaves of various avocado cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40, 1182–1185.

Laurentcya, T. D., Fergilang, J., Sari, N. K., & Nurherdiana, S. D. (2025). Optimization of Flavonoid Compounds from Avocado Seeds Using Ethanol Solvent through Response Surface Methodology (RSM). *AJARCDE (Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment),* 9(2), 394–405.

Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427–432.

Lieu, M. D., Phuong, T. V., Nguyen, T. T. B., Dang, T. K. T., & Nguyen, T. H. (2024). *A review of preservation approaches for extending avocado fruit shelf-life*. *Journal of Agriculture and Food Research, 16*, 101102.

Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1), 75–97.

Marra, A., Manousakis, V., Zervas, G. P., Koutis, N., Finos, M. A., Adamantidi, T., Panoutsopoulou, E., Ofrydopoulou, A., & Tsoupras, A. (2024). Avocado and its by- products as natural sources of valuable anti-inflammatory and antioxidant bioactives for functional foods and cosmetics with health-promoting properties. *Applied Sciences*, 14(14), 5978.

Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2), 71–78.

Melgar, B., Dias, M. I., Ćirić, A., Soković, M., Garcia-Castello, E. M., Rodriguez-Lopez, A. D., Barros, L., & Ferreira, I. C. R. F. (2018). *Bioactive characterization of Persea americana Mill. by-products: A rich source of inherent antioxidants*. *Industrial Crops and Products, 111*, 212–218.

Merlino, M., Tripodi, G., Cincotta, F., Prestia, O., Miller, A., Gattuso, A., Verzera, A., & Condurso, C. (2022). Technological, nutritional, and sensory characteristics of gnocchi enriched with hemp seed flour. *Foods*, 11(18), 2783.

Mokrzycki, W. S., & Tatol, M. (2011). Colour differenceΔ EA survey. *Mach. Graph. Vis*, 20(4), 383–411. Naknean, P., & Meenune, M. (2010). Factors affecting retention and release of flavour compounds in food carbohydrates. *International* Food Research Journal, 17(1), 23–34.

Mora-Sandí, A., Ramírez-González, A., Castillo-Henríquez, L., Lopretti-Correa, M., & Vega-Baudrit, J. R. (2021). *Persea Americana Agro-Industrial Waste Biorefinery for Sustainable High-Value-Added Products*. *Polymers, 13*(11), 1727.

Muhammad, D. R. A., Ayouaz, S., Rachmawati, A. N., Madani, K., Fibri, D. L. N., Rafi, M., ... & Fahmy, K. (2024). Advanced and potential methods for extraction of bioactive compounds from avocado peel—A review. *Applied Sciences*, *14*(14), 6018.

Nasri, C., Halabi, Y., Aghzaf, S., Nounah, I., Brunel, M., Oubihi, A., El-Guorrami, O., Harhar, H., Costa, J., & Tabyaoui, M. (2022). Seven Persea americana varieties essential oils comparison: Chemical composition, toxicity, antibacterial, and antioxidant activities. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 44*, 102468.

Natania, K., & Wijaya, E. (2022). Optimization of roasting temperature and time of the durian seed (*Durio zibethinus* L.) as coffee substitution and its flavour profile. *Food Research*, 6(3), 279–287.

Nyakang'i, C. O., Marete, E., Ebere, R., & Arimi, J. M. (2023). Physicochemical properties of avocado seed extract model beverages and baked products incorporated with avocado seed powder. *International Journal of Food Science*, 2023 (1), Article 6860806.

Oelrichs, P. B., Ng, J. C., Seawright, A. A., Ward, A., Schäffeler, L., & Macleod, J. K. (1995). Isolation and identification of a compound from avocado (*Persea americana*) leaves which causes necrosis of the acinar epithelium of the lactating mammary gland and the myocardium. *Natural Toxins*, *3*(5), 344-349.

Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 15(3), 599–618.

Orphanides, A., Goulas, V. & Gekas, V. (2016). Drying technologies: vehicle to high-quality herbs. *Food Engineering Reviews*, 8, 164–180.

Otero-Guzman, N., & Andrade-Pizarro, R. (2025). Bioactive compounds from tropical fruit by-products: Extraction, characterization and therapeutic potential. *Journal of Agriculture and Food Research*. , Article 101983.

Ozcan, M.M., Al Juhaimi, F., Ahmed, I.A.M., Uslu, N., Babiker, E.E. & Ghafoor, K. (2020). Effect of microwave and oven drying processes on antioxidant activity, total phenol and phenolic com pounds of kiwi and pepino fruits. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 233–242.

Paternina-Ricardo, S., Del Castillo, M. D., S´anchez-Martín, V., García-Espin˜eira, M., Cervantes-Ceballos, L., Arroyo–Salgado, B., & Tejeda-Benitez, L. (2025). Exploring the Efficacy of the Biological Properties of *Persea americana* Mill Seed: Useful Studies and Perspectives in Functional Foods. *Journal of Agriculture and Food Research.*, 02428.

Permal, R., Chia, T., Arena, G., Fleming, C., Chen, J., Chen, T., Chang, W. L., Seale, B., Hamid, N., & Kam, R. (2023). Converting avocado seeds into a ready to eat snack and analysing for persin and amygdalin. *Food Chemistry*, 399, Article 134011.

Ravindran, A., Raman, M., Babu, N., Dinakaran, A., Sankar, T. V., & Gopal, T. S. (2020). Diet chocolates and replacement of cocoa powder with jackfruit seed powder. *Food and Nutrition Sciences*, 11(03), 220–233.

Regione Siciliana. (2025). *Avocado siciliano: presentazione dei risultati di un progetto innovativo*. Assessorato dell'Agricoltura, dello Sviluppo rurale e della Pesca mediterranea.

Rodriguez-Saona, C., & Trumble, J. T. (2000). Biologically active aliphatic acetogenins from specialized idioblast oil cells. *Current Organic Chemistry*, 4(12), 1249–1260.

Roshanak, S., Rahimmalek, M. & Goli, S.A.H. (2016). Evaluation of seven different drying treatments in respect to total flavonoid, phenolic, vitamin C content, chlorophyll, antioxidant activity and color of green tea (*Camellia sinensis* or C. Assamica) leaves. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 721–729.

Sagrero-Nieves, L. & Bartley, J.P. (1995). Volatile components of avocado leaves (*Persea americana* Mill) from the Mexican race. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 67,49–51.

Saifullah, M., McCullum, R., McCluskey, A. & Van Vuong, Q. (2021). Effect of drying techniques and operating conditions on the retention of color, phenolics, and antioxidant properties in dried lemon scented tea tree (Leptospermum petersonii) leaves. *Journal of Food Processing and Preservation,* 45, e15257.

Salazar-López, N. J., Domínguez-Avila, J. A., Yahia, E. M., Belmonte-Herrera, B. H., Wall-Medrano, A., Montalvo-González, E., & González-Aguilar, G. A. (2020). *Avocado fruit and by-products as potential sources of bioactive compounds*. *Food Research International, 138*(Pt A), 109774.

Segovia, F. J., Corral-Pérez, J. J., Luque de Castro, M. D., & Contreras, M. M. (2018). *Avocado Seed: A Comparative Study of Antioxidant Content and Capacity in Protecting Oil Models from Oxidation*. *Molecules, 23*(10), 2421.

Siol, M., & Sadowska, A. (2023). Chemical composition, physicochemical and bioactive properties of avocado (*Persea americana*) seed and its potential use in functional food design. *Agriculture,* 13(2), 316.

Spada, F. P., Mandro, G. F., da Matta Junior, M. D., & Canniatti-Brazaca, S. G. (2020). Functional properties and sensory aroma of roasted jackfruit seed flours compared to cocoa and commercial chocolate powder. *Food Bioscience*, 37, Article 100683.

Süfer, O¨., Çalıs¸kan Koç, G., O¨ ztekin, S., O¨ zkan Karabacak, A., Su, D., Wang, D., Erog˘lu, S., Durgut Malçok, S., lkü Hilal Uslu, Ü., Adal, S., Jeevarathinam, G., Ramniwas, S., Rustagi, S., & Pandiselvam, R. (2025). Evaluation of the effect of sustainable drying techniques and intensification technologies on color profile of dehydrated fruits and vegetables. *Food and Bioprocess Technology*, 18(4), 3148–3194.

Tauhiduzzaman, M., Hafez, I., Bousfield, D., & Tajvidi, M. (2021). Modeling microwave heating and drying of lignocellulosic foams through coupled electromagnetic and heat transfer analysis. *Processes*, 9(11), 2001.

Tesfaye, T., Ayele, M., Gibril, M., Ferede, E., Limeneh, D. Y., & Kong, F. (2022). Beneficiation of avocado processing industry by-product: A review on future prospect. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, Article 100253.

Verified Market research. (2022). Global herbal tea market size by product type (instant premixes, liquid, powdered RTD), by raw material type (black, green, and yellow), by geographic scope and forecast. https://www.verifiedmarketresearch.com/product/herbal tea-market/. Accessed 20th December 2023

Vinci, G., D'Ascenzo, F., Maddaloni, L., Prencipe, S.A. & Tiradritti, M. (2022). The influence of green and black tea infusion parame ters on total polyphenol content and antioxidant activity by ABTS and DPPH assays. *Beverages*, 8, 18.

Wang, Y., Tuccillo, F., Lampi, A. M., Knaapila, A., Pulkkinen, M., Kariluoto, S., Coda, R., Edelmann, M., Jouppila, K., Sandell, M., Piironen, V., & Katina, K. (2022). Flavor challenges in extruded plant-based meat alternatives: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,* 21(3), 2898–2929.

Wu, H.L., Lin, S.Y., Chen, I.Z., Shyr, J.J. & Roan, S.F. (2014).Estimation of genetic relationships among 39 cultivars of avocado (*Persea americana* Mill.) by analysing the volatile constituents of leaves. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 89, 453–457.

Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., & Cagatay, F. (1999). Drying characteristics of laurel leaves under different drying conditions. *In Proceedings of the seventh international congress on agricultural mechanisation and energy (pp. 565–569). May 26–27.*

Younis, I. Y., Khattab, A. R., Selim, N. M., Sobeh, M., Elhawary, S. S., & Bishbishy, M. H. E. (2022). Metabolomics-based profiling of 4 avocado varieties using HPLC–MS/MS and GC/MS and evaluation of their antidiabetic activity. *Scientific reports*, 12(1), 4966.

Zhang, X., Liang, J., Lin, X., Chen, J., & Luo, X. (2025). A comprehensive review on the Composition, processing methods, and sustainable utilization of tropical fruit seeds in food industry. *Food Frontiers*, 6(2), 644–669.