

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse
Naturali e Ambiente

Corso di laurea in Scienze e Tecnologie Alimentari

**Recenti progressi nella valorizzazione degli scarti e dei
sottoprodotti della lavorazione dell'ananas: un passo
verso la bioeconomia circolare**

Docente di riferimento

Prof. Gabriella Pasini

Laureando

Matteo Milani

Matricola n.
1201762

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

INDICE

RIASSUNTO	3
ABSTRACT	4
1 INTRODUZIONE	5
2 CARATTERISTICHE E COMPOSIZIONE CHIMICA DEGLI SCARTI D'ANANAS	8
3 COMPOSTI BIOATTIVI	12
3.1 POLIFENOLI.....	12
3.2 ENZIMA BROMELINA	16
4 APPLICAZIONI DEGLI SCARTI D'ANANAS	20
4.1 ACIDI ORGANICI	20
4.2 BIO-IMBALLAGGI	23
4.3 BIO-ASSORBENTI.....	26
4.4 BIO-ENERGIA.....	30
5 PROSPETTIVE FUTURE E CONCLUSIONI FINALI.....	34
BIBLIOGRAFIA	37

RIASSUNTO

L'industria agroalimentare ogni anno genera una grande quantità di scarti e rifiuti, i quali richiedono un notevole investimento di capitale per essere smaltiti in modo corretto.

Questo lavoro di tesi si propone di analizzare le potenzialità di utilizzo degli scarti e dei sottoprodotti dell'ananas al fine di ridurre l'impatto ambientale e sfruttare al massimo le risorse.

Negli ultimi anni diverse ricerche hanno dimostrato che gli scarti dell'ananas possono essere utilizzati per produrre una serie di prodotti a valore aggiunto, questi infatti sono ricchi di una serie di composti bioattivi come la fibra, l'enzima bromelina e diverse sostanze antiossidanti.

La fibra di ananas può essere utilizzata, ad esempio, come ingrediente in prodotti alimentari a basso contenuto di grassi e nella produzione di materiali biodegradabili simili alla plastica. Gli antiossidanti e gli enzimi, invece, possono essere utilizzati nell'industria farmaceutica, cosmetica e anche come ingredienti per integratori alimentari.

Inoltre, dalla biomassa che deriva dagli scarti dell'ananas si possono ottenere i biocarburanti, i quali forniscono un'alternativa sostenibile ai combustibili fossili e contribuiscono alla riduzione delle emissioni di gas serra.

La valorizzazione degli scarti dell'ananas attraverso la loro conversione in biogas, enzimi, materiali biodegradabili e composti bioattivi rappresenta un'opportunità concreta per promuovere lo sviluppo di una bioeconomia circolare.

Tutto questo consentirebbe di ridurre gli sprechi e al tempo stesso di generare fonti rinnovabili andando incontro a un modello di sviluppo più sostenibile.

ABSTRACT

The agri-food industry generates a large amount of waste and refuse every year, which requires a significant capital investment to be properly disposed of.

This thesis aims to analyze the potential of using pineapple waste and by-products in order to reduce environmental impact and maximize resources.

In recent years, several studies have shown that pineapple waste can be utilized to produce a range of value-added products. These waste materials are rich in various bioactive compounds such as fiber, the enzyme bromelain, and several antioxidants.

For example, pineapple fiber can be used as an ingredient in low-fat foods and in the production of biodegradable materials similar to plastic. Antioxidants and enzymes can be utilized in the pharmaceutical and cosmetic industries, as well as in dietary supplements.

Furthermore, biomass derived from pineapple waste can be used to produce biofuels, providing a sustainable alternative to fossil fuels and contributing to the reduction of greenhouse gas emissions.

The valorization of pineapple waste through its conversion into biogas, enzymes, biodegradable materials and bioactive compounds represents a concrete opportunity to promote the development of a circular bioeconomy.

All of this would allow for a reduction in waste and, at the same time, the generation of renewable sources, leading to a more sustainable development model.

1 INTRODUZIONE

L'ananas è una pianta tropicale originaria dell'America centrale e meridionale, precisamente delle regioni del Brasile, Paraguay e Argentina. La sua storia risale a diversi secoli fa, quando le popolazioni indigene del Sud America coltivavano e consumavano l'ananas sfruttando le sue proprietà nutritive e il suo sapore unico.

I primi europei ad entrare in contatto con l'ananas furono i conquistadores spagnoli durante la loro esplorazione delle Americhe nel XVI secolo. Colpiti dalla sua forma e consistenza particolare, decisero di chiamarla "piña" che in spagnolo significa "pigna", per via della somiglianza con una pigna.

In Europa l'ananas divenne subito simbolo di status e ricchezza, e veniva spesso coltivato nei giardini delle corti reali.

Dal 1700 in poi, durante l'epoca coloniale, si diffuse in altre regioni tropicali del mondo come l'Africa, l'India e il sud-est asiatico dove fu particolarmente apprezzato.

Nel corso del XIX secolo, grazie ai progressi nel trasporto marittimo, l'ananas divenne un frutto comune in tutto il mondo. Arrivò così nelle Hawaii dove trovò le condizioni ideali per la sua proliferazione e nel 1903, la Dole Food Company ne iniziò la produzione su larga scala. L'ananas hawaiano noto per la sua dolcezza e alta qualità, divenne uno dei marchi più famosi al mondo.

Oggi l'ananas è il terzo frutto tropicale più prodotto al mondo dopo la banana e il mango e contribuisce ogni anno con 9 miliardi di dollari all'economia mondiale (Nath et al., 2023).

Nel corso dell'ultimo decennio, la produzione mondiale di ananas è aumentata di oltre 5 milioni di tonnellate, passando da 23.957.921 tonnellate nel 2012 a 29.361.138 tonnellate nel 2022 ("FAOSTAT," n.d.).

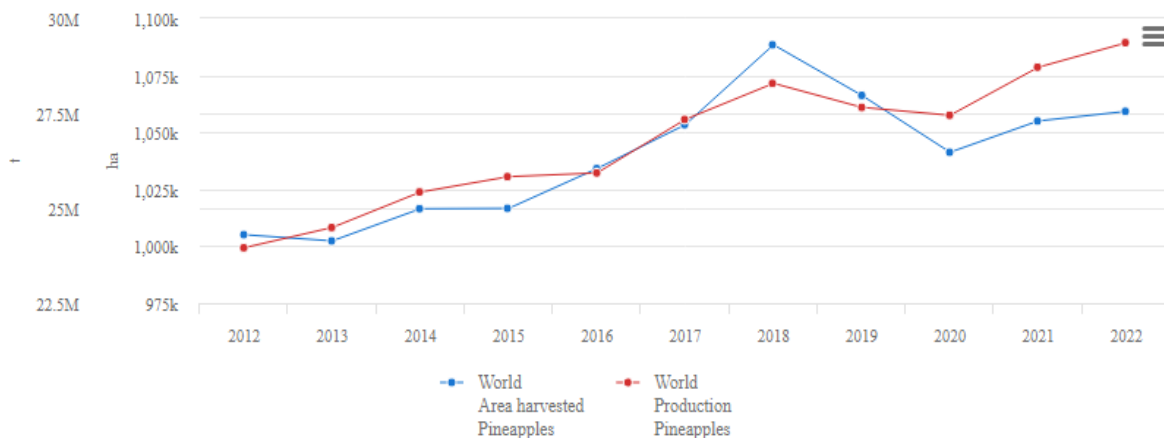


Figura 1. Produzione mondiale nell'ultimo decennio di ananas ("FAOSTAT," n.d.)

Attualmente, il principale produttore di ananas a livello mondiale è l'Indonesia, con una produzione annua che supera i 3 milioni di tonnellate. Seguono le Filippine, mentre la Costa Rica si posiziona al terzo posto, con una produzione principalmente destinata all'esportazione verso i mercati internazionali ("FAOSTAT," n.d.).

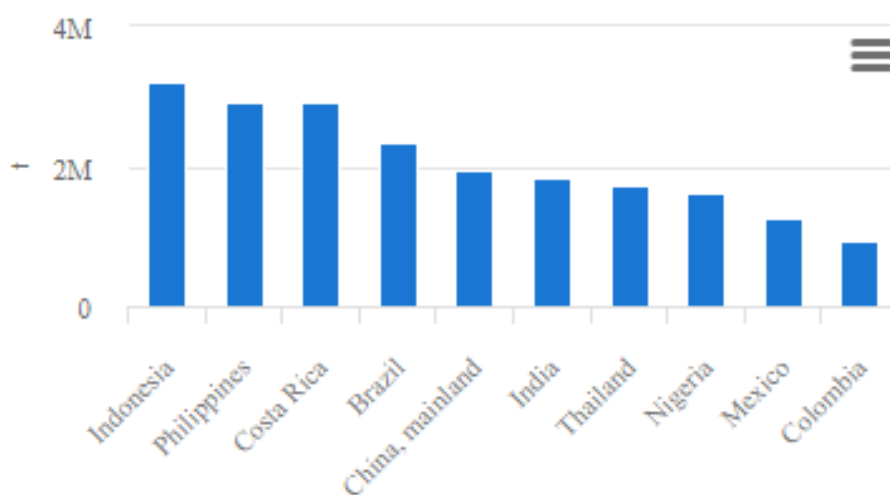


Figura 2. Produzione di ananas 2022: top 10 paesi ("FAOSTAT," n.d.)

Il frutto dell'Ananas non solo viene consumato fresco ma una buona parte viene anche commercializzato sotto forma di prodotti trasformati (in scatola, succhi e marmellate).

Quindi la crescente produzione di questo frutto ha inevitabilmente portato a generare un'enorme quantità di rifiuti.

Circa il 60% dell'ananas è costituito da parti commestibili, con i residui di lavorazione che variano tra il 45% e il 65%. Questi scarti, come torsolo, buccia, gambo, corona e foglie rappresentano circa la metà del peso totale dell'ananas. (Hikal et al., 2021)

Inoltre, data l'elevata sensibilità all'alterazione di questo frutto a causa dell'elevato contenuto di umidità e della sua consistenza delicata, è indispensabile una corretta manipolazione durante la raccolta e una gestione post-raccolta ottimale per evitare sprechi e ridurre gli scarti. Infatti, la manipolazione brusca dei frutti e l'esposizione ad un ambiente avverso possono distruggere fino al 50% dei frutti, contribuendo così in modo rilevante al problema dei rifiuti. (Abraham et al., 2023)

Tradizionalmente, gli scarti di ananas finiscono in discarica, insieme ad altri rifiuti solidi, dove vengono sepolti e lasciati decomporre lentamente nel tempo. Questo metodo di smaltimento porta a una serie di problemi ambientali, tra cui l'accumulo di gas metano, un potente gas serra che contribuisce al riscaldamento globale.

Una possibile alternativa è il riciclo e il compostaggio, i residui organici dell'ananas sono infatti compostabili e possono essere trasformati in composti di alta qualità per l'agricoltura e il giardinaggio.

Tuttavia, gli scarti di ananas possono essere utilizzati per ottenere prodotti ad alto valore aggiunto, riducendo così l'impatto ambientale e creando nuove opportunità economiche sostenibili.

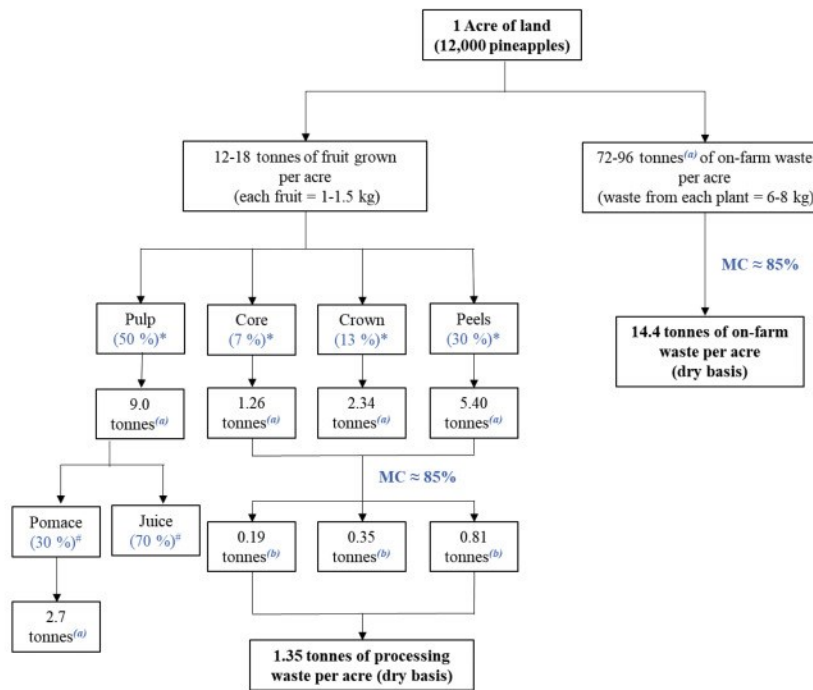
Tra i composti che è possibile estrarre dagli scarti dell'ananas vi sono varie sostanze preziose come l'enzima bromelina, la fibra alimentare, gli antiossidanti, gli acidi organici e i minerali. Inoltre, recentemente è stata studiata la possibilità di utilizzare questi scarti come precursori per la produzione di biocarburanti, biogas, nanocristalli di cellulosa, imballaggi biodegradabili e bioassorbenti, generando così prodotti di alta qualità e nuove fonti di reddito sostenibile.

2 CARATTERISTICHE E COMPOSIZIONE CHIMICA DEGLI SCARTI D'ANANAS

Gli scarti dell'ananas possono essere distinti in scarti derivanti dalla materia prima (foglie, radici, gambi e altri rifiuti generati sul campo durante la raccolta e lo stoccaggio dell'ananas) e scarti di lavorazione a seguito della trasformazione. Secondo un'indagine condotta nel Bengala Occidentale, è stato stimato che per ogni singola pianta di ananas vengono prodotti 6-8 kg di scarti freschi. Considerando che in quella regione vengono prodotti circa 12.000 ananas per acro di terreno, sono 76-92 tonnellate di scarto fresco che corrispondono a 14,4-19,2 tonnellate di massa secca.

Gli scarti di lavorazione generati invece a seguito della trasformazione industriale dell'ananas, per acro di terreno, sono circa 9 tonnellate di massa fresca, equivalenti a 1,35 tonnellate su base secca.

Mediamente il peso di un ananas varia tra 1,2-1,8 kg. Pertanto, ogni 12-18 tonnellate di ananas prodotte per acro vengono generate circa 15,7-20,5 tonnellate di rifiuti totali su base secca (Banerjee et al., 2018).



MC: Moisture Content; * percent of the fruit; # percent of the pulp; ^(a) Fresh weight; ^(b) Dry weight

Figura 3. Bilancio di massa per la percentuale di rifiuti di lavorazione dell'ananas (PPW) e di rifiuti di ananas in azienda (POFW). (Banerjee et al., 2018)

L'abbondante biomassa di rifiuti prodotta nel settore agricolo e durante la lavorazione dell'ananas rappresenta un problema ambientale a livello globale. Per questo motivo conoscere la composizione e le caratteristiche di questi scarti per poterli sfruttare al meglio e convertirli in prodotti di valore è di fondamentale importanza (Banerjee et al., 2018).

Le foglie di ananas, principali scarti freschi, hanno un contenuto alto di cellulosa (70–80%), lignina (5–12%) ed emicellulosa contenenti gruppi carbonile, carbossile e idrossile. Questi componenti possono essere utilizzati come precursori nella preparazione del carbone attivo, che può essere utilizzato come un efficace adsorbente per la rimozione di coloranti dalle acque reflue (Astuti et al., 2019).

La lavorazione industriale dell'ananas, che produce principalmente ananas in scatola e succo, prevede la rimozione della corona, delle bucce e del torsolo. È stato osservato che questi scarti risultano ricchi di fibre insolubili, zuccheri semplici e proteine come principali componenti, oltre a contenere una buona quantità di micronutrienti come vitamine, minerali e composti fenolici (Abdullah and Mat, 2008).

L'insieme di questi sottoprodotti è composto principalmente da zuccheri semplici come glucosio, fruttosio e saccarosio. Grazie all'alto contenuto di zuccheri questo scarto risulta essere un ottimo substrato per la produzione di acidi organici, per i quali c'è una grande richiesta da parte del settore alimentare e sanitario. Tuttavia, la concentrazione di questi zuccheri può variare in base alla stagione, alla varietà, al grado di maturazione e al luogo di coltivazione dell'ananas.

Oltre agli zuccheri semplici gli scarti dell'ananas sono ricchi di cellulosa ed emicellulosa, polisaccaridi di grande importanza per il loro potenziale impiego nell'industria dei biopolimeri per la produzione di imballaggi ecologici (Banerjee et al., 2018).

Tra gli elementi, invece, il costituente più abbondante è K ma sono presenti in piccole tracce anche Fe, Ca, Mn, Zn, Cu e Na (Abdullah and Mat, 2008).

Nel dettaglio, le bucce rappresentano la quota maggiore di scarti con circa il 60% del totale. Convenzionalmente le bucce vengono utilizzate come foraggio grezzo per animali da pascolo come vacche e pecore, oppure vengono compostate per fertilizzare il terreno. Per 100 g di buccia essiccata, l'analisi approssimativa fornisce proteine grezze (5,3 g), lipidi (5,5 g), ceneri (4,3 g) fibre grezze (14,8 g) e carboidrati (55,7 g) (D.R., 2018).

L'alto livello di carboidrati presenti rendono le bucce una materia prima interessante per la produzione di energia nell'industria dei biogas.

La corona dell'ananas rappresenta il 25-30% dello scarto totale. Solitamente viene ripiantata per il raccolto successivo, tuttavia gli agricoltori hanno osservato che una corona ripiantata impiega più tempo a dare i suoi frutti. La corona dell'ananas contiene il 39,50% di carbonio, il 5,51% di idrogeno, il 13,82% di azoto e lo 0,46% di zolfo. La ricca presenza di carbonio e l'elevato rapporto C: N (2,86) fanno di questo scarto un substrato ideale per la crescita microbica e per la fermentazione solida, un processo che permette ai microrganismi di crescere e produrre in modo efficace enzimi idrolitici, come la cellulasi e la bromelina (Abu Yazid and Roslan, 2020).

Infine, il nucleo dell'ananas rappresenta il restante 15% dello scarto totale. Oltre a contenere elevate quantità di cellulosa ed emicellulosa presenta anche una concentrazione maggiore di zuccheri semplici, in particolare di glucosio e fruttosio,

rispetto alla buccia e alla corona. Questo può essere vantaggioso per il processo di fermentazione per ottenere molteplici prodotti di valore (Nath et al., 2023) .

Inoltre, dalla lavorazione dell'ananas, la polpa ottenuta viene spesso utilizzata per la produzione di succhi. In media, si riesce a recuperare circa il 70% della polpa attraverso la spremitura, mentre il restante 30% è costituito dai residui solidi noti come sansa (Banerjee et al., 2018). La sansa di ananas presenta un basso contenuto di grassi (0,61%) e un alto contenuto di fibre alimentari (45,22 %), con la frazione insolubile che rappresenta la quasi totalità della fibra. Attraverso gli studi svolti da (Selani et al., 2014) si è scoperto che queste caratteristiche la rendono un ottimo ingrediente per arricchire di fibre alimentari prodotti poveri dal punto di vista nutrizionale, come gli snack estrusi.

La loro sperimentazione si è basata su diverse variabili, tra cui l'applicazione della sansa di ananas agli alimenti in tre differenti percentuali 0%, 10,5% e 21%.

I risultati hanno mostrato che l'aggiunta del 21% ha influito negativamente sulle caratteristiche del prodotto estruso (diminuzione dell'espansione e della luminosità e aumento del rossore). Diversamente, una concentrazione del 10,5% ha portato a un aumento significativo del contenuto di fibre.

In conclusione, gli studi hanno confermato che la sansa di ananas può essere un'alternativa promettente per migliorare la qualità nutrizionale degli alimenti, offrendo un'elevata quantità di fibre e un basso contenuto di grassi. La sua incorporazione negli snack estrusi può contribuire a soddisfare le esigenze nutrizionali dei consumatori e promuovere uno stile di vita sano.

Chemical composition of Pineapple Waste.

	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)	Moisture content (%)	Ash (%)	Fat and Wax (%)	Protein (%)	Sugar (%)
Peel	12.0-50.0	6.5-35.0	5.0-30.0	-	1.5-4.7	0.46-5.3	0.3-5.1	11.7-32.7
Core	24.5	28.5	5.78	-	1.3	3.17	0.85	-
Crown	41.1-43.5	21.0-21.8	13.8	-	5.8-7.3	3.7	0.7	-
Pineapple leaf fiber	67.1-85	12.3-18.8	3.4-15.4	11.8	0.9-4.7	3.2-4.2	-	-
Pomace				3.7	2.2	0.61	3.77	

Tabella 1. Composizione chimica degli scarti di ananas (Banerjee et al., 2018)

3 COMPOSTI BIOATTIVI

I composti bioattivi, anche noti come fitocomposti, sono sostanze di origine vegetale che svolgono importanti funzioni per le piante come la regolazione dei processi di crescita e differenziazione cellulare ma anche la protezione da agenti patogeni e dallo stress ambientale. Sono, inoltre, responsabili dei loro colori vivaci, del loro aroma e sapore distintivo.

Diversi studi hanno dimostrato come questi composti non sono cruciali solo per la salute delle piante ma anche per la salute umana poiché possiedono proprietà antiossidanti, antinfiammatorie, antitumorali e antidiabetiche. Di conseguenza con la loro attività/azione biologica sono ritenuti in grado di influenzare positivamente la salute umana, contribuendo alla prevenzione di diverse malattie.

Le vitamine, i polifenoli, gli acidi grassi essenziali e gli enzimi sono solo alcuni degli esempi di composti bioattivi che possono svolgere un ruolo fondamentale nella prevenzione di malattie come il cancro, malattie cardiache e il diabete.

I fitocomposti trovano applicazione in medicina per la produzione di farmaci naturali e nel trattamento di malattie, ma anche per la produzione di cosmetici e di integratori alimentari volti a promuovere il benessere generale.

3.1 POLIFENOLI

I composti polifenolici sono una vasta classe di sostanze naturali conosciute per i loro effetti benefici sulla salute umana. Si tratta di metaboliti secondari ampiamente presenti nel regno vegetale, dove in relazione alla diversità chimica che li caratterizza ricoprono ruoli differenti.

I Polifenoli vengono prodotti dalle piante attraverso la via del fenilpropanoide, una delle principali vie metaboliche coinvolte nella biosintesi di questi composti, che utilizza come precursori gli amminoacidi fenilalanina e tirosina.

La ragione dietro la crescente importanza dei composti fenolici è la loro capacità di contrastare i radicali liberi, molecole instabili che possono danneggiare le cellule e contribuire all'invecchiamento e alla comparsa di processi infiammatori e malattie croniche come il cancro.

I composti fenolici sono noti per la loro potente attività antiossidante, che deriva dalla loro capacità di neutralizzare i radicali liberi tramite la donazione di atomi di idrogeno o tramite la chelazione dei cationi metallici. Questi composti sono ampiamente utilizzati in ambito sanitario per il loro potere antiossidante, che li rende efficaci nel contrastare i danni provocati dai cationi metallici e nell'impedire la perossidazione lipidica catalizzata dai radicali liberi. La loro azione consiste nel donare un atomo di idrogeno ai radicali, formando così intermedi come i radicali fenossilici che sono più stabili e rallentano il propagarsi della reazione a catena.

Poiché recentemente alcuni antiossidanti sintetici sono stati correlati a potenziali effetti cancerogeni, la ricerca si sta concentrando maggiormente sugli antiossidanti naturali. Diete ricche di frutta e verdura sono state associate a una minor incidenza di malattie degenerative come il cancro e le malattie cardiovascolari.

I fenoli sono composti organici caratterizzati dalla presenza di anello aromatico (anello benzenico) legato a uno o più gruppi ossidrilici (-OH). Questa classe di composti, divisa in fenoli semplici e in polifenoli in base al numero di unità fenoliche, è estremamente diversificata contando oltre 8000 sostanze. In base alla loro struttura chimica vengono classificati in tre principali categorie: gli acidi fenolici, i flavonoidi e i tannini.

Gli acidi fenolici sono composti che presentano un gruppo carbossilico (-COOH) in aggiunta al gruppo ossidrilico (-OH), conferendo loro proprietà acide. Gli acidi fenolici sono costituiti da due sottogruppi in base alla loro derivazione: gli acidi idrossibenzoici che derivano dall'acido benzoico (es. acido gallico) e idrossicinnamici che derivano dall'acido cinnamico (es. acido ferulico).

I flavonoidi invece sono il gruppo più ampio e rappresentano più della metà dei circa 8000 composti fenolici presenti in natura. Sono composti a basso peso molecolare, con uno scheletro centrale composto da 15 atomi di carbonio disposti in una configurazione C 6 – C 3 – C 6. La struttura di base è costituita da due anelli

aromatici (A e B) collegati da un ponte a 3 atomi di carbonio, spesso sotto forma di un anello eterociclico (C). I flavonoidi si suddividono in 6 sottogruppi principali: flavonoli (es. quercetina) e flavoni (es. luteolina) sono i più diffusi, flavanoni (es. naringenina), flavan-3-oli (es. epicatechina), isoflavoni (es. genisteina) e antociani (es. cianidina).

Il terzo e ultimo grande gruppo di fenoli è costituito dai tannini, composti a peso molecolare relativamente alto, che possono essere distinti a loro volta in: tannini idrolizzabili derivati dall'acido gallico e tannini condensati. I tannini idrolizzabili, o gallotannini, sono dei polimeri ad alto peso molecolare dell'acido gallico e vengono definiti in questo modo perché possono essere aggrediti e depolimerizzati dall'enzima tannasi. I tannini condensati sono invece polimeri più complessi la cui unità monomerica è la catechina ("Tannini," 2019) .

I livelli di fenoli presenti in frutta e verdura possono variare notevolmente, sia tra di loro che all'interno della stessa specie. Queste variazioni dipendono da una serie di fattori, che possono essere di natura intrinseca, come il genere, la specie e la cultivar, oppure estrinseca, come le pratiche agronomiche, le condizioni ambientali, la manipolazione e la conservazione del prodotto.

È stato riscontrato che i sottoprodotti dell'ananas sono ricche fonti di composti bioattivi, in particolare le bucce contengono quantità maggiori di composti fenolici rispetto alle altre parti commestibili del frutto (Balasundram et al., 2006) .

Durante la lavorazione dell'ananas gli scarti che si generano possono rappresentare fino al 50% del peso totale del frutto. Di conseguenza è importante non considerarli semplici rifiuti, ma piuttosto utilizzarli in modo ottimale sfruttando il loro potenziale come valide fonti di composti fenolici.

Sono stati identificati e quantificati i principali composti polifenolici presenti nelle bucce di ananas. L'acido gallico (31,76 mg/100 g di estratti secchi), la catechina (58,51 mg/100 g), l'epicatechina (50,00 mg/100 g) e l'acido ferulico (19,50 mg/100 g) sono risultati essere i principali polifenoli presenti nelle bucce di ananas.

Il contenuto di ciascun composto fenolico può essere trovato in Tabella 1 che dimostra che la catechina e l'epicatechina erano i due principali polifenoli

monomerici nelle bucce di ananas, seguiti dall'acido gallico e dall'acido ferulico (Li et al., 2014).

È stata poi valutata la capacità antiossidante di questi quattro composti polifenolici, presenti nelle bucce di ananas, attraverso il test di inibizione dei radicali liberi basato sul radicale 1,1-difenil-2-picrilidrazil (DPPH•).

La catechina e l'epicatechina sono due stereoisomeri flavonoidi, di conseguenza condividono lo stesso livello di capacità antiossidante. L'acido gallico è uno degli acidi idrossibenzoici con struttura C₆-C₁, mentre l'acido ferulico appartiene agli acidi idrossicinnamici con catena laterale a tre atomi di carbonio (C₆-C₃). L'attività antiossidante degli acidi polifenolici aumenta con l'aumentare del grado di idrossilazione, come nel caso dell'acido gallico triidrossilato che ha mostrato una capacità antiossidante maggiore rispetto all'acido ferulico che presenta un solo gruppo ossidrilico.

L'ordine delle capacità di inibizione del DPPH• dei quattro composti polifenolici presenti nelle bucce di ananas era acido gallico > epicatechina = catechina > acido ferulico (Li et al., 2014).

Per l'estrazione di questi composti da materiali vegetali esistono svariate tecniche, ma i sistemi di estrazione solido-liquido che utilizzano diversi solventi organici o miscele di solventi organici e acqua sono i più utilizzati. Solventi come il metanolo, l'acetone e l'etanolo sono i più comuni per questa tipologia di estrazione. In particolare, l'acetone al 50% in acqua distillata e l'etanolo al 70% in acqua distillata hanno dimostrato di garantire la resa più elevata in termini di fenoli totali dai residui di ananas (Allothman et al., 2009).

Tuttavia, la maggior parte dei composti fenolici sono presenti in natura principalmente in forma coniugata, cioè con uno o più residui zuccherini legati a gruppi idrossilici, e solo una parte relativamente piccola è in forma libera (solubile). Studi degli ultimi anni hanno dimostrato come alcuni bioprocessi possono migliorare il recupero dei composti fenolici dai rifiuti agroindustriali.

Tra questi è stato descritto l'utilizzo di *Rhizopus oligosporus*, un fungo in grado di recuperare livelli aumentati di polifenoli dagli scarti d'ananas arricchiti con farina di soia (che fornisce i nutrienti necessari per favorire la crescita del fungo).

È stato osservato come il fungo *R. oligosporus* sia in grado di produrre l'enzima β -glucosidasi il quale può catalizzare l'idrolisi dei legami glicosidici. L'idrolisi enzimatica dei glicosidi fenolici sembra essere un modo promettente per aumentare la concentrazione di fenoli liberi migliorandone il processo di estrazione e aumentandone la resa. Questo approccio offre una nuova strategia in grado di aumentare ulteriormente il valore degli scarti di ananas (Correia et al., 2004).

3.2 ENZIMA BROMELINA

Un importante composto bioattivo di origine vegetale utilizzato in diverse branche della medicina è la bromelina, un enzima proteolitico presente nelle piante di ananas (*Ananas comosus*).

Questo enzima è caratterizzato da un ampio spettro di attività biologica e le ricerche hanno dimostrato che possiede potenziali proprietà antinfiammatorie, cardioprotettive, immunomodulanti, antimicrobiche, antiedematose, fibrinolitiche, antiossidanti e antitumorali. Oltre all'uso terapeutico, la bromelina trova applicazione in diversi settori dell'industria alimentare, come i birrifici e la lavorazione della carne, nell'industria tessile e in quella cosmetica.

Per la loro grande possibilità di impiego le proteasi sono gli enzimi industriali più importanti, con un valore di mercato annuo di circa tre miliardi di dollari (Banerjee et al., 2018).

La bromelina in realtà è una complessa miscela di enzimi proteolitici che sono in grado di digerire le proteine. Questi appartengono alla classe delle idrolasi, enzimi che idrolizzano il legame peptidico al centro della catena amminoacidica (endopeptidasi) o alle sue estremità (esopeptidasi). Nello specifico la bromelina è una proteasi della cisteina, ovvero scompone le proteine ovunque contengano un amminoacido della cisteina.

L'estratto grezzo di bromelina, oltre a varie endopeptidasi tioliche, include anche altri componenti come fosfatasi, glucosidasi, cellulasi, perossidasi, glicoproteine,

carboidrati, diversi inibitori della proteasi e Ca^{2+} legato organicamente: l'insieme di queste sostanze che lavorano in sinergia conferiscono alla bromelina uno spettro di attività biologica piuttosto ampio e complesso.

Si presume che la composizione percentuale dell'estratto di bromelina sia composta da 80% di bromelina di stelo, 10% di bromelina di frutta, 5% di ananaina e altri ingredienti.

A seconda della parte del frutto da cui vengono isolati gli enzimi, si distinguono due tipi di bromelina: la bromelina del gambo (SBM), classificata con il numero EC 3.4.22.32, e la bromelina del frutto (FBM) classificata con il numero EC 3.4.22.33 (Hikisz and Bernasinska-Slomczewska, 2021).

Tutta via il gambo contiene questi enzimi in concentrazioni nettamente maggiori, motivo per cui mangiare l'ananas non produce gli stessi benefici dell'integrazione di bromelina. Inoltre, il processo di estrazione e purificazione della SBM è più economico.

Studi successivi hanno dimostrato che la bromelina può essere estratta in piccole quantità anche da altri segmenti della pianta, come le bucce, le foglie e l'apparato radicale.

Data la possibilità che tutti questi sottoprodotti dell'ananas possono rappresentare una potenziale fonte di enzimi e l'utilizzo sempre più diffuso della bromelina del gambo a fini commerciali, ha portato i ricercatori a concentrare i loro sforzi per sviluppare metodi altamente avanzati ed efficaci per la sua estrazione, garantendo la massima purezza dei preparati ottenuti.

L'estrazione e la purificazione della bromelina dall'ananas sono le fasi più complesse e costose nella produzione commerciale di questo enzima. Metodi come la cromatografia, la precipitazione con solfato di ammonio, sistemi acquosi a due fasi (ATPS) e i processi di filtrazione su membrana sono stati studiati e considerati promettenti per l'estrazione della bromelina. Tuttavia, ciascuno di essi ha i propri vantaggi e svantaggi, motivo per cui spesso si utilizza una combinazione di processi per crearne uno ibrido che possa rappresentare una soluzione efficiente ed economica (Abreu and Figueiredo, 2019).

L'enzima bromelina è ampiamente utilizzato nell'industria alimentare e negli Stati Uniti è stato riconosciuto e classificato come additivo alimentare sicuro dalla Food and Drug Administration (FDA) (Collesei, 2024). La bromelina favorisce l'intenerimento della carne tramite l'idrolisi delle proteine delle miofibrille. È impiegata anche nella preparazione e nella chiarificazione della birra, nel settore della panificazione per migliorare la consistenza e il rilassamento dell'impasto, e come agente anti-imbrunimento per la frutta. Grazie alla sua capacità proteolitica, questo enzima viene utilizzato anche nell'industria tessile come ammorbidente naturale per i tessuti e per eliminare incrostazioni e impurità dalle fibre di lana e di seta (Abreu and Figueiredo, 2019).

Come composto fitomedico, la bromelina ha dimostrato di avere numerosi utilizzi benefici nel campo della medicina. Tra le sue molteplici funzioni terapeutiche l'effetto più significativo è la sua azione antinfiammatoria. La bromelina spesso viene prescritta come trattamento aggiuntivo per i disturbi infiammatori cronici, maligni e autoimmuni. È stato dimostrato che la soppressione dell'infiammazione cronica può ridurre l'incidenza del cancro e anche inibirne la progressione (Chakraborty et al., 2021).

In ambito medico viene utilizzata anche come anticoagulante perché è in grado di limitare la sintesi di proteine coagulanti come la fibrina. È efficace nel trattamento delle malattie cardiovascolari, riducendo l'aggregazione dei globuli rossi e la viscosità del sangue.

Inoltre, la bromelina agisce come agente antibatterico inibendo la crescita di batteri intestinali come *Vibrio cholera* ed *Escherichia coli*, bloccando la produzione di enterotossine dei batteri *E. coli* (ETEC) e prevenendo la diarrea causata da *E. coli*.

La bromelina presenta anche proprietà analgesiche che possono contribuire a ridurre il dolore e il gonfiore post-operatorio, favorendo una rapida guarigione. È in grado di migliorare il recupero dopo danni ai tessuti e di aumentare l'assorbimento dei farmaci, in particolare degli antibiotici.

Perché la bromelina possa essere utilizzata in modo sicuro e vantaggioso nei vari settori della medicina è fondamentale che sia caratterizzata da una bassa tossicità e da un buon assorbimento nel corpo mantenendo allo stesso tempo un'attività

biologica efficace. A tal scopo sono stati condotti innumerevoli esperimenti sui topi che hanno dimostrato la bassa tossicità di questo composto, con una dose letale (LD_{50}) superiore a 10 g/kg di peso corporeo. Inoltre, non sono stati riscontrati effetti citotossici o cancerogeni nei cani e nei ratti trattati con l'estratto di bromelina. Anche i test clinici condotti su pazienti hanno confermato l'assenza di effetti collaterali indesiderati (Hikisz and Bernasinska-Slomczewska, 2021).

4 APPLICAZIONI DEGLI SCARTI D'ANANAS

4.1 ACIDI ORGANICI

Gli acidi organici grazie alle loro proprietà chimiche trovano applicazione in diversi settori industriali, nel corso degli ultimi anni la domanda di acidi organici è in costante aumento specialmente nel settore alimentare e in quello chimico. L'acido lattico, l'acido citrico, l'acido succinico, l'acido acetico, l'acido propionico e l'acido formico sono solo alcuni degli acidi organici più comuni in commercio (Aili Hamzah et al., 2021).

Generalmente, questi acidi vengono prodotti mediante sintesi chimica o fermentazione microbica. Tuttavia, poiché l'utilizzo di sostanze ottenute attraverso sintesi chimica può avere effetti negativi per gli esseri umani, i ricercatori stanno esplorando l'utilizzo di sistemi biologici come alternative per la produzione di acidi organici e di altre sostanze in generale. Una valida alternativa alla sintesi chimica è la fermentazione microbica. Tra i processi di fermentazione, la fermentazione sommersa (SmF) è il metodo più utilizzato, tuttavia la fermentazione allo stato solido (SSF) sta emergendo come tecnica altamente promettente per ottenere elevate concentrazioni di prodotto utilizzando substrati alternativi (Vandenberghe et al., 2018). Questo approccio, utilizzando come substrato i residui agroindustriali, oltre ad essere molto conveniente dal punto di vista economico offre un vantaggio anche dal punto di vista ambientale.

La fermentazione allo stato solido è un processo biologico nel quale microrganismi selezionati come batteri, lieviti e funghi vengono coltivati su un materiale organico umido e solido che funge da supporto e da fonte di nutrimento per la loro crescita, in assenza o quasi assenza di acqua libera (Pandey et al., 2000). Durante questo processo, il substrato solido viene colonizzato dai microrganismi che metabolizzano i nutrienti in esso presenti, producendo sostanze di interesse industriale.

Gli scarti d'ananas rappresentano un eccellente substrato per la produzione di acidi organici, grazie al fatto che sono materiali lignocellulosici composti da cellulosa, emicellulosa e lignina. Questa biomassa presenta una elevata disponibilità di zuccheri fermentescibili, che può essere convertito in acidi organici tramite i microrganismi in condizioni di fermentazione allo stato solido (Tabella 2).

Dopo gli enzimi e gli antibiotici, gli acidi organici rappresentano la terza categoria più grande di prodotti organici sintetizzati (Ali and Zulkali, 2011).

L'acido lattico è tra gli acidi organici più importanti e ha attirato grande attenzione grazie alle sue diffuse applicazioni nell'industria alimentare, farmaceutica, cosmetica e chimica. Nell'industria alimentare viene utilizzato sia come conservante che come agente acidificante. Inoltre, recentemente, l'acido lattico è stato considerato un'importante materia prima per la produzione di polimeri lattidici biodegradabili.

Dai rifiuti solidi dell'ananas (Zain et al., 2021), utilizzando il ceppo fungino *Rhizopus oryzae* NRRL 395, sono riusciti a ottenere una concentrazione massima di acido lattico di 103,69 mg/g (su base secca) rispetto a (Aziman et al., 2015) che con 0,0236 g/g hanno ottenuto una resa nettamente inferiore. Questo risultato è stato possibile grazie all'ottimizzazione delle condizioni del processo di fermentazione allo stato solido, che sono: 67,53% p/p di contenuto di umidità, 3 giorni di incubazione, temperatura di 32,2°C, pH=5.6 e dimensione dell'inoculo di $1 \cdot 10^7$ spore/g.

Un gruppo di ricercatori ha utilizzato anche i residui liquidi dell'ananas, provenienti dall'industria conserviera, come substrato per la produzione di acido lattico. Trattandosi di un substrato ricco di saccarosio è stato trattato con l'enzima invertasi per idrolizzarlo in glucosio e fruttosio. Attraverso la fermentazione di questi scarti, utilizzando il batterio *Lactobacillus delbrueckii*, è stata ottenuta una produzione massima di acido lattico pari a 54,97 g/L (Abdullah and Winaningsih, 2020).

Dai residui liquidi dell'ananas, oltre all'acido lattico, è possibile ottenere anche acido succinico. In uno studio recente sono stati prodotti 6,26 g/L di acido succinico utilizzando come inoculo il ceppo di *Escherichia coli* AFP 184 (Jusoh et al., 2014).

Questo acido trova diverse applicazioni nell'industria alimentare e delle bevande, ad esempio come regolatore di acidità e agente aromatizzante che conferisce

astrienza ai cibi. È inoltre utilizzato nel settore farmaceutico per la produzione di farmaci come il metoprololo succinato, che viene impiegato principalmente nel trattamento dell'ipertensione.

Anche l'acido citrico, ottenuto attraverso la fermentazione delle bucce di ananas, è un acido organico ampiamente utilizzato nel settore alimentare e farmaceutico. Tra gli organismi utilizzati per questo processo, *Aspergillus niger* è particolarmente apprezzato per la sua capacità di sfruttare materie prime economiche, la sua stabilità genetica, l'assenza di reazioni indesiderate e l'alta resa produttiva.

In condizioni ottimali, è stato possibile ottenere fino a 60,6 g/kg di acido citrico utilizzando le bucce d'ananas come substrato (Kareem et al., 2010).

Tuttavia, un'eccezionale produzione di 202,35 g/kg è stata ottenuta utilizzando *Yarrowia lipolytica* come microrganismo di fermentazione (Imandi et al., 2008).

Questi risultati evidenziano le potenzialità di tali processi nel campo industriale e alimentare, offrendo nuove prospettive per l'utilizzo sostenibile delle risorse naturali.

Tipo di acidi organici	Microorganismi	Tipo di scarti dell'ananas	Produzione massima di acido
Acido lattico	<i>Rhizopus oryzae</i>	Solido	103.69 mg/g
Acido lattico	<i>Rhizopus oryzae</i>	Solido	0.0236 g/g
Acido lattico	<i>Lactobacillus delbrueckii</i>	Liquido	54.97 g/L
Acido succinico	<i>Escherichia coli</i>	Liquido	6.26 g/L
Acido citrico	<i>Aspergillus niger</i>	Solido (bucce)	60.61 g/kg
Acido citrico	<i>Yarrowia lipolytica</i>	Solido	202.35 g/kg

Tabella 2. Produzione di acidi organici da diversi sottoprodotti dell'ananas (Aili Hamzah et al., 2021).

4.2 BIO-IMBALLAGGI

L'aumento dei problemi ambientali legati allo smaltimento dei materiali non biodegradabili ha spinto la ricerca verso lo sviluppo di soluzioni più sostenibili. In questo contesto, le pellicole plastiche per il confezionamento degli alimenti derivanti da combustibili fossili rappresentano un importante problema a causa della loro difficoltà di degradazione e del loro impatto ambientale negativo. Per contrastare questi problemi si sta guardando sempre più verso la produzione di materiali ecosostenibili, ottenuti da risorse rinnovabili come i rifiuti agroindustriali. Tra questi, gli scarti di ananas sono emersi come promettenti fonti di carbonio rinnovabile per la produzione di pellicole biodegradabili e commestibili per il confezionamento degli alimenti (Aili Hamzah et al., 2021).

Le pellicole commestibili sono realizzate in strati sottili che vengono applicati come rivestimento direttamente sulla superficie di prodotti alimentari altamente deperibili, come frutta e verdura appena tagliata. (Valdés et al., 2015). Questo permette di creare una barriera protettiva che aiuta a mantenere intatte le qualità naturali degli alimenti e prolungarne la loro durata di conservazione, proteggendoli dall'ambiente circostante.

Queste pellicole, inoltre, possono essere consumate dagli animali inferiori, riducendo così l'accumulo di rifiuti plastici e mitigando l'inquinamento.

La maggior parte dei materiali filmogeni commestibili sono costituiti principalmente da polisaccaridi come alginato, cellulosa, pectina e amido, o da proteine come collagene, cheratina e proteine del siero di latte.

I rifiuti agricoli e industriali dell'ananas, in particolare la buccia e le foglie, sono una buona fonte di cellulosa, emicellulosa, lignina e pectina pertanto rappresentano un'ottima materia prima per la produzione di biopolimeri.

In particolare, la pectina è stata segnalata come una delle principali materie prime per ottenere pellicole commestibili.

La pectina è un eteropolisaccaride ad alto peso molecolare, costituito da unità di acido galatturonico legate tra loro da legami α (1-4) glicosidici. Lungo questa catena principale sono intercalate anche alcune molecole di ramnosio in corrispondenza

delle quali si innestano piccole catene laterali di ramnosio, galattosio, arabinosio, e xilosio (Valdés et al., 2015) .

Generalmente per l'estrazione della pectina dalle bucce di ananas vengono impiegate tecniche convenzionali come il metodo ad agitazione continua. Le bucce di ananas fresche vengono essiccate e macinate. La polvere ottenuta viene mescolata con acqua distillata e acido citrico per creare una soluzione acida. Questa soluzione viene poi riscaldata e agitata continuamente per favorire l'estrazione. Dopo tale periodo, la soluzione viene miscelata con etanolo che aiuta a separare la pectina facendola precipitare purificando la soluzione. (Karim, n.d.) ha riportato di aver ottenuto una resa in pectina della buccia di ananas del 13,78% nelle condizioni ottimali del metodo convenzionale a 82,63 °C, pH 1,83 e 65 minuti di tempo di riscaldamento.

Più recentemente (Rodsamran and Sothornvit, 2019) hanno studiato l'estrazione della pectina dalle bucce di ananas utilizzando un metodo più innovativo, come il riscaldamento a microonde. Tuttavia, tale processo deve ancora essere perfezionato e ottimizzato in quanto la resa in pectina è risultata essere molto bassa, compresa tra 1,02 e 2,12%.

Solitamente la pectina viene utilizzata nell'industria alimentare come agente addensante e gelificante, soprattutto nella preparazione di marmellate e confetture. Tuttavia, la pectina estratta dalla buccia d'ananas è stata recentemente valutata da (Singh et al., 2020) per la creazione di film polimerici reticolati, impiegando acido citrico e tartarico come agenti reticolanti per migliorarne le proprietà.

Metodo di estrazione della pectina	Resa della pectina
Convenzionale ad agitazione continua	13.78%
Riscaldamento a microonde	1.02% – 2.12%

Tabella 3. Resa di estrazione della pectina dagli scarti dell'ananas (Karim, n.d.) (Rodsamran and Sothornvit, 2019)

Come si vede in Figura 4 la reticolazione della pectina avviene grazie ai gruppi carbossilici presenti negli acidi citrico e tartarico, che reagiscono con i gruppi idrossilici della pectina. Questa reazione chimica porta alla formazione di legami covalenti tra le catene di pectina, creando una rete tridimensionale che conferisce alla pectina proprietà gelificanti.

Questo processo attribuisce al materiale biopolimerico risultante una migliore resistenza meccanica e stabilità termica maggiore rispetto alla pectina non reticolata.

Inoltre, durante la preparazione del film, è stato aggiunto glicerolo come plastificante per favorire la formazione della pellicola e ridurre l'appiccicosità.

La funzione principale delle pellicole è l'avvolgimento degli alimenti conservandoli e proteggendoli da eventuali contaminazioni. A tal fine per migliorarne l'attività antimicrobica è stato aggiunto lo 0,1% di polvere di curcuma al film di pectina, che dopo essere stato testato ha dimostrato avere un'attività inibente nei confronti dei batteri infettivi più comuni come *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* (Singh et al., 2020).

Da questi studi è emerso come gli scarti di ananas possono essere convertiti con successo in materiali biodegradabili rappresentando un'alternativa sostenibile per l'industria alimentare, che sta rispondendo alla crescente domanda dei consumatori per alimenti più sicuri, naturali e salutari.

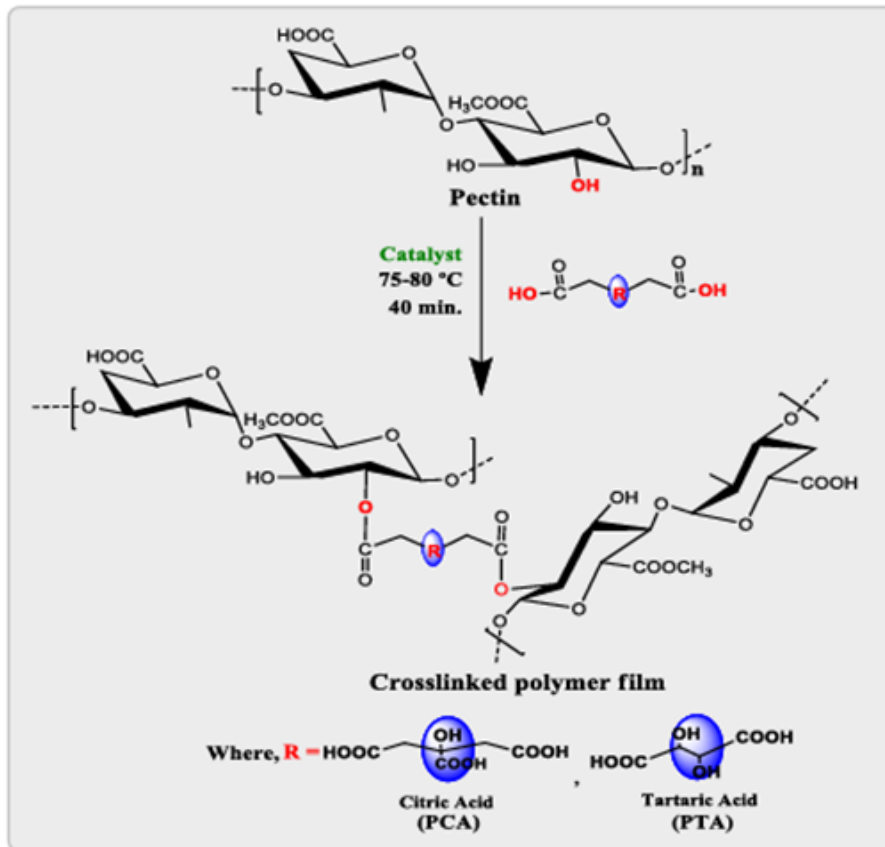


Figura 4. Schema di sintesi della reazione di reticolazione tra pectina con acido citrico e acido tartarico (Singh et al., 2020)

4.3 BIO-ASSORBENTI

La crescente problematica legata alla scarsa disponibilità di acqua sicura e pulita è spesso associata alle attività industriali che rilasciano effluenti inquinanti contenenti metalli pesanti, coloranti organici e prodotti farmaceutici nell'ambiente acquatico. La preoccupazione per la scarsità di acqua potabile ha spinto la comunità scientifica alla ricerca di soluzioni più efficienti ed economicamente sostenibili per la depurazione delle acque reflue industriali e domestiche.

I coloranti sono ampiamente usati in diversi settori industriali, come ad esempio quello tessile, ma rappresentano un serio problema ambientale se non

adeguatamente trattati. Essendo oggi per lo più di origine sintetica, la loro presenza nelle risorse idriche può provocare effetti nocivi a causa della loro tossicità e delle loro proprietà cancerogene, rendendo urgente trovare soluzioni efficaci per eliminarli.

Negli ultimi tempi, i rifiuti agricoli, grazie al loro contenuto lignocellulosico, sono stati identificati come una risorsa promettente di adsorbenti per la rimozione di coloranti e metalli pesanti dalle acque reflue (Aili Hamzah et al., 2021). Tra questi, i residui dell'ananas sono emersi come un substrato particolarmente interessante per la produzione di carbone attivo, un bioassorbente ampiamente impiegato per tale scopo.

L'impiego di bioassorbenti, come il carbone attivo derivato dagli scarti dell'ananas, si presenta come un'alternativa vantaggiosa ai metodi tradizionali di depurazione dell'acqua, grazie al suo costo contenuto, alla facile reperibilità, all'efficienza elevata e alla sostenibilità ambientale (Mallampati et al., 2015). Questo approccio oltre ad offrire una soluzione efficace per la rimozione di pericolosi inquinanti dall'ambiente, rappresenta anche un'importante soluzione per il riciclo di scarti agricoli.

Il processo di preparazione del carbone attivo, derivato dagli scarti dell'ananas, prevede la loro decomposizione termica tramite carbonizzazione e successiva attivazione chimica per migliorarne le proprietà adsorbenti (Mahamad et al., 2015). Inizialmente, la biomassa solida viene lavata accuratamente per rimuovere eventuali impurità e poi essiccata in un forno a 110°C fino al raggiungimento di un'umidità del 5-10%. Successivamente, la carbonizzazione avviene riscaldando i residui agricoli a temperature elevate, 500 °C per 1 ora, in assenza di ossigeno, trasformando la materia organica in carbone grezzo. Una volta ottenuto il carbone grezzo, si procede con l'attivazione chimica, che consiste nell'impregnare il carbone con sostanze chimiche come l'acido fosforico (H_3PO_4) o il cloruro di zinco ($ZnCl_2$), seguita da un riscaldamento a temperature elevate. Durante questo processo, le sostanze chimiche reagiscono con la struttura del carbone, creando una rete di pori che aumenta la superficie specifica del materiale, migliorandone così le capacità di adsorbimento. Dopo la fase di attivazione chimica, il campione carbonizzato viene

risciacquato con acqua distillata calda per rimuovere eventuali residui chimici. In questo modo, si ottiene un carbone attivo di alta qualità pronto per essere impiegato nella rimozione di inquinanti da soluzioni liquide e gas.

Negli ultimi anni, diversi studi hanno dimostrato la capacità del carbone attivo derivato dagli scarti di ananas di adsorbire vari coloranti presenti nelle acque reflue. (Selvanathan et al., 2021) hanno condotto una ricerca sull'adsorbimento dei coloranti blu di metile e verde malachite utilizzando tre diversi tipi di carbone attivo derivati dalla corona, dalla buccia e dal torsolo dell'ananas. Il carbone attivo è stato prodotto attraverso un processo di attivazione chimica con acido fosforico (H_3PO_4) e sono state effettuate tre repliche per ciascun tipo di carbone.

I risultati hanno mostrato che il carbone attivo ottenuto dalla corona dell'ananas è stato il più efficace nell'adsorbire sia il blu di metile (38,6%) che il verde malachite (18,7%) rispetto a quello derivato dalla buccia e dal torsolo (Figura 5 e 6).

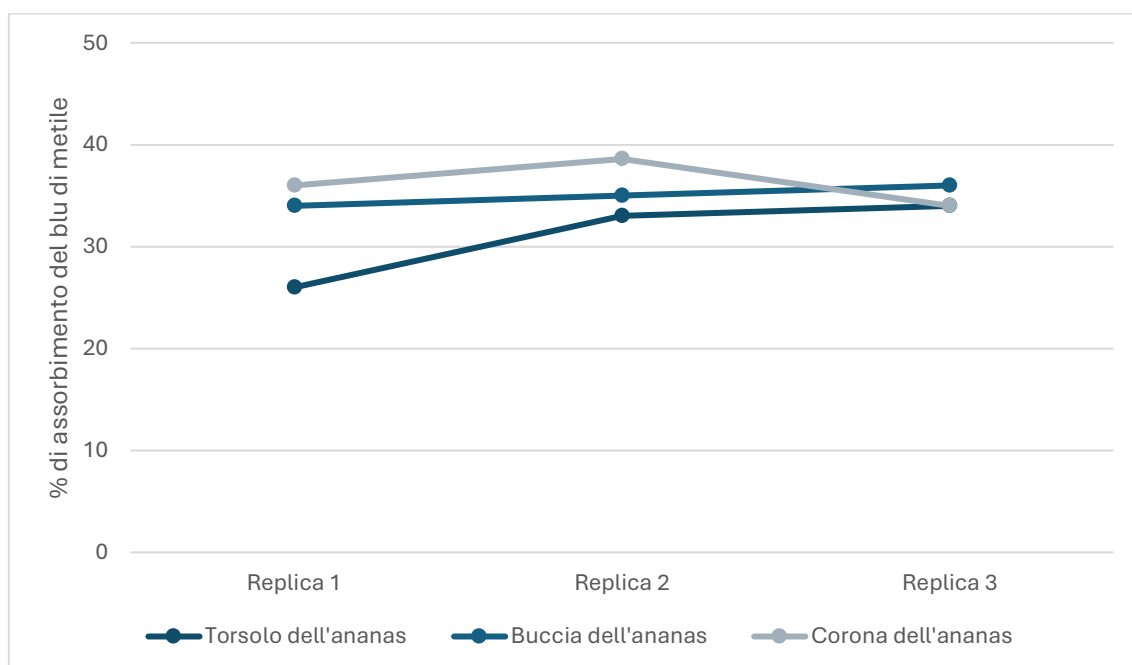


Figura 5. Confronto tra diversi carboni attivi derivati da scarti d'ananas nell'adsorbimento (%) del blu di metile. (Selvanathan et al., 2021)

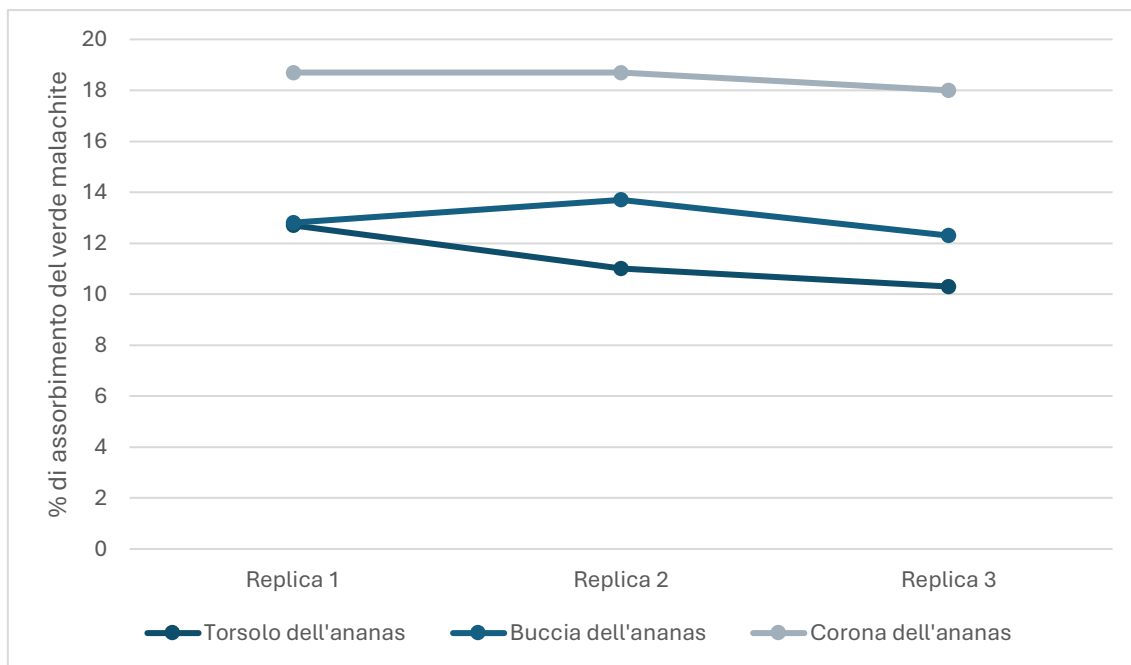


Figura 6. Confronto tra diversi carboni attivi derivati da scarti d'ananas nell'adsorbimento (%) del verde malachite. (Selvanathan et al., 2021)

La corona, la buccia e il torsolo dell'ananas sono composti principalmente da cellulosa, emicellulosa e lignina, che contengono numerosi gruppi idrossilici (-OH) e carbonilici (C=O) responsabili delle proprietà adsorbenti dei residui dell'ananas. In natura, questi gruppi presentano una carica negativa, mentre i coloranti blu di metile e verde malachite sono carichi positivamente. Di conseguenza, le molecole dei coloranti vengono attratte e catturate dalla superficie porosa del carbone attivo. La rapida industrializzazione, oltre ai coloranti, ha portato all'emissione di una grande quantità di metalli pesanti nell'ambiente, tra cui arsenico, cadmio, piombo, mercurio e cromo, che rappresentano un grave rischio per la salute umana. Il cromo, in particolare, è classificato come elemento cancerogeno e mutageno. Per affrontare questo problema, (Gogoi et al., 2018) hanno studiato l'utilizzo delle foglie di corona dell'ananas come adsorbente naturale, modificato chimicamente con aggiunta di gruppi idrossilici (-OH), per rimuovere gli ioni Cr(VI) e Cr(III) dalle soluzioni acquose. Dallo studio è emerso che il pH della soluzione acquosa ha un impatto significativo sull'efficacia dell'adsorbimento di questi metalli. Le foglie

d'ananas modificate si sono dimostrate efficaci nell'assorbire non solo il Cr(VI) a pH=2,5, ma anche quantità significative di Cr(III) a pH leggermente acido. Inoltre, ha dimostrato di agire come agente riducente per il Cr(VI) a pH=1,5.

4.4 BIO-ENERGIA

La bioenergia è una forma di energia rinnovabile ottenuta dalla trasformazione di biomasse vegetali, animali o di scarti agricoli. Quest'energia è considerata una fonte pulita e sostenibile, in grado di ridurre le emissioni di gas serra e contribuire alla riduzione della dipendenza dai combustibili fossili. La bioenergia può essere suddivisa in biocarburanti, utilizzati principalmente come alternative ai combustibili convenzionali nel settore dei trasporti, e in biogas, utilizzati per la produzione di energia elettrica e termica.

I biocarburanti rappresentano un'alternativa concreta ai combustibili fossili, esauribili e dannosi per l'ambiente. L'energia del presente si trova di fronte a un aumento della domanda energetica globale. Oltre alla loro natura esauribile, l'uso delle risorse energetiche tradizionali provoca rischi ambientali come le significative emissioni di CO₂ che sono la causa del cambiamento climatico e il rilascio nell'atmosfera di composti nocivi e cancerogeni durante l'utilizzo dei combustibili fossili. Pertanto, l'interesse per le fonti energetiche alternative sta aumentando e la produzione di biocarburanti rappresenta una tendenza promettente, soprattutto nel settore dei trasporti. I biocarburanti offrono numerosi vantaggi rispetto ai combustibili fossili, essendo una risorsa rinnovabile, producendo meno composti tossici durante la combustione e non emettendo quantità significative di gas serra nell'atmosfera.

A seconda delle materie prime utilizzate e dei metodi di lavorazione, i biocarburanti possono essere suddivisi in: prima, seconda e terza generazione (Voloshin et al., 2016).

I biocarburanti di prima generazione vengono ricavati da prodotti a potenziale utilizzo alimentare come la canna da zucchero, la barbabietola e il mais, utilizzati nella produzione di bioetanolo, oppure olio di palma, olio di cocco e olio di soia utilizzati principalmente per la produzione di biodiesel (Grisolia and Lucia, n.d.).

Nel caso del bioetanolo si utilizzano principalmente biomasse di colture alimentari ricche di amido e di zuccheri trattate con processi di idrolisi e fermentazione alcolica. La produzione di biodiesel, invece, coinvolge il processo di transesterificazione degli oli vegetali con metanolo. Tuttavia, l'uso di colture alimentari per la produzione di biocarburanti di prima generazione ha sollevato preoccupazioni riguardo alla competizione con l'industria alimentare per l'utilizzo di terreni fertili e per il consumo di acqua.

I combustibili di seconda generazione invece derivano da piantagioni non edibili cresciute su terreni non arabili oppure da biomasse di scarti agricoli. Il problema relativo all'utilizzo di queste materie prime è legato alla loro natura prevalentemente lignocellulosica. La lignina fornisce rigidità e stabilità alla cellulosa contro molti enzimi idrolitici rendendone il processo di estrazione piuttosto difficile.

Infine, i combustibili di terza generazione, ancora in fase di sviluppo, vengono ottenuti per mezzo di biomasse di microalghe e di altri microorganismi fotosintetici, con il conseguente vantaggio che possono essere utilizzate acque non necessariamente potabili per la crescita di questi microrganismi. L'uso della biomassa algale per la sintesi del combustibile è una direzione relativamente nuova della bioenergetica. Secondo i dati di diverse indagini, la biomassa algale può accumulare quantità considerevolmente elevate di lipidi rispetto alla biomassa delle piante oleaginose, potendo essere considerata una buona fonte per la produzione di biodiesel (Voloshin et al., 2016).

Negli ultimi anni, la ricerca ha dimostrato una particolare attenzione verso gli scarti dell'ananas come nuova fonte rinnovabile per la produzione di bioenergia. Nonostante la scarsa letteratura scientifica dedicata al tema, un crescente interesse si sta concentrando sul potenziale di questo materiale di scarto per la produzione di biocarburanti, in particolare di bioetanolo.

Il bioetanolo prodotto da biomassa lignocellulosica si propone come un'alternativa promettente ai combustibili fossili, offrendo un biocarburante più pulito e a basso impatto ambientale. Tuttavia, il suo alto costo di produzione, dovuto principalmente alle onerose tecnologie di pretrattamento, ne ostacola la diffusione su larga scala. Nonostante ciò, la domanda di biocarburanti, in particolare di bioetanolo, biobutanolo e biodiesel, è in aumento nel settore dei trasporti, dove sono visti come una soluzione "verde" per ridurre le emissioni di carbonio. Tra questi, il bioetanolo vanta la maggiore capacità produttiva globale e gode di politiche governative che favoriscono la sua miscelazione con la benzina, rendendolo il biocarburante più richiesto al momento (Ayodele et al., 2020). Uno dei principali ostacoli alla produzione di bioetanolo di seconda generazione è la fase di pretrattamento, che rappresenta circa il 20% del costo (Rajendran et al., 2018). La biomassa lignocellulosica, costituita da cellulosa, emicellulosa e lignina, presenta una struttura complessa che impedisce l'accesso diretto agli zuccheri fermentabili necessari per la produzione del bioetanolo. Per ovviare a questo problema, la ricerca si sta concentrando sullo sviluppo di tecnologie di pretrattamento efficienti, in grado di rompere i legami tra questi componenti e rendere la biomassa suscettibile all'idrolisi enzimatica liberando così gli zuccheri come glucosio e xilosio, che possono successivamente essere convertiti in bioetanolo tramite fermentazione.

La fase di pretrattamento è seguita da quelle di idrolisi e fermentazione. La tecnica più comunemente utilizzata per la produzione di bioetanolo è la saccarificazione e fermentazione simultanee (SSF). In questo processo, l'idrolisi enzimatica della biomassa e la fermentazione dello zucchero avvengono contemporaneamente nello stesso recipiente.

Nel corso dello studio condotto da (Casabar et al., 2019) è stato valutato l'effetto del pretrattamento alcalino e dell'uso di *Trichoderma harzianum* nell'idrolisi della buccia dell'ananas per la produzione di bioetanolo. La buccia dell'ananas è considerata un materiale lignocellulosico ricco di emicellulosa e cellulosa, che possono essere sfruttate per la produzione di questo biocarburante.

Nel pretrattamento alcalino sono state testate diverse concentrazioni di Idrossido di sodio (NaOH), ma i risultati hanno mostrato che questo metodo non ha influenzato la produzione di zuccheri, rendendolo poco adatto per questa materia prima. Tuttavia, l'aggiunta del 2% di *Trichoderma harzianum* come fonte di enzimi ha migliorato significativamente la produzione di zuccheri riducenti.

Successivamente, il prodotto dell'idrolisi è stato fermentato con l'inoculo del 2% di *Saccharomyces cerevisiae* e mantenuto a 36°C per 72 ore. Durante il processo di fermentazione, la concentrazione di etanolo è stata monitorata ogni 24 ore. I risultati hanno mostrato che la produzione più elevata di bioetanolo è stata ottenuta dopo 48 ore di incubazione, con una concentrazione di $5,98 \pm 1,01$ g/L.

Un altro studio con buoni risultati è stato quello condotto da (Seguí Gil and Fito Maupoey, 2018) che, grazie alla tecnica di saccarificazione e fermentazione simultanee degli scarti di ananas, sono riusciti ad ottenere una resa di etanolo del $5,4 \pm 0,1\%$, corrispondente a $42,61 \pm 0,79$ g/L, dopo 48 ore di fermentazione. Per l'idrolisi dei materiali cellulosici, hanno utilizzato cellulasi ed emicellulasi di *Aspergillus niger*. Inoltre, hanno testato tre diversi lieviti industriali: *Saccharomyces bayanus* 1926, *Saccharomyces cerevisiae* 11020 e *Saccharomyces cerevisiae* 1319 durante gli esperimenti di fermentazione, senza riscontrare però differenze significative tra di essi.

5 PROSPETTIVE FUTURE E CONCLUSIONI FINALI

L'ananas è uno tra i frutti più consumati al mondo, ma spesso i suoi sottoprodotti vengono considerati semplicemente come rifiuti da smaltire. Tuttavia, le foglie, le bucce, i gambi e i residui della lavorazione dell'ananas, contengono una vasta gamma di sostanze utili che possono essere sfruttate in modo sostenibile per creare nuove opportunità commerciali.

In una prospettiva di bioeconomia circolare, la valorizzazione dei sottoprodotti dell'ananas potrebbe contribuire non solo a ridurre gli sprechi alimentari e a promuovere la sostenibilità ambientale, ma anche a generare nuove fonti di reddito per i coltivatori e i produttori di ananas. L'estrazione di composti bioattivi, la produzione di biocarburanti e la creazione di materiali biodegradabili sono solo alcune delle possibili applicazioni dei sottoprodotti dell'ananas.

Ad esempio, la bromelina, un enzima multi-azione estratto dall'ananas, ha dimostrato di essere molto promettente nell'ambito medico e industriale.

Nonostante i numerosi benefici già riconosciuti, ci sono ancora diverse sfide da affrontare per sfruttarne appieno il potenziale.

La bromelina è sensibile a diverse condizioni ambientali (elevata acidità, proteasi gastriche e alte temperature) che possono comprometterne l'attività, limitando così le sue potenzialità terapeutiche. A tal fine, una delle principali sfide è rappresentata dalla necessità di comprenderne meglio il meccanismo d'azione e di stabilizzarla in modo efficace. La bromelina potrebbe così diventare un ingrediente chiave in terapie enzimatiche orali per pazienti oncologici e in numerose altre applicazioni mediche e farmaceutiche.

Un'altra sfida riguarda la produzione di questa proteasi su larga scala, poiché l'elevata purezza richiesta può renderla costosa. Attraverso l'innovazione e la ricerca continua, è possibile sviluppare nuove strategie per rendere la produzione della bromelina più efficiente, economica e sostenibile.

Negli ultimi anni, i ricercatori hanno dimostrato il grande potenziale degli adsorbenti derivati dai rifiuti dell'ananas per il risanamento ambientale. Tuttavia, ci sono ancora molte aree che necessitano di ulteriori approfondimenti. Innanzitutto, è

importante estendere il campo di studio degli inquinanti trattati, includendo sostanze emergenti come inquinanti organici persistenti, policlorobifenili e prodotti farmaceutici. Questi contaminanti sono altamente dannosi per l'ambiente e la salute umana e potrebbero beneficiare dell'uso di bioassorbenti. In secondo luogo, l'attivazione chimica dei residui dell'ananas per la produzione di carbone attivo solleva interrogativi sulla gestione dei reagenti chimici residui, questione che richiede ulteriori approfondimenti.

Inoltre, questi adsorbenti potrebbero essere rigenerati attraverso il desorbimento, aumentando così il numero di riutilizzi, ma la selezione degli eluenti e l'efficienza del processo di rigenerazione rimangono ancora poco studiati.

La conversione degli scarti di ananas in biocarburanti e biogas è considerata una fonte di energia sostenibile che potrebbe ridurre la dipendenza dall'energia non rinnovabile. Tuttavia, attualmente la produzione di bioenergia da questi scarti è ancora bassa e non sufficiente a soddisfare la domanda del mercato. La principale sfida è la bassa produttività e la purezza dei prodotti ottenuti.

Per aumentare la produzione e rendere il processo più efficiente ed economico, è necessario sviluppare metodi di pretrattamento e purificazione dei sottoprodotti dell'ananas che siano pratici e poco costosi. Questo consentirebbe di favorire le reazioni biochimiche necessarie per la produzione di biocarburanti, accelerando i tempi e riducendo i costi di produzione.

Un metodo efficace di pretrattamento e purificazione potrebbe portare a una produzione elevata di biocarburanti e biogas, rendendo la valorizzazione dei sottoprodotti dell'ananas una fonte di energia più competitiva sul mercato. Questo potrebbe favorire una maggiore adozione di tecnologie sostenibili e contribuire alla riduzione dell'impatto ambientale legato all'uso di combustibili fossili.

Le prospettive future sulla valorizzazione dei sottoprodotti dell'ananas sono quindi promettenti, ma è necessario continuare a investire in ricerca e sviluppo per superare le sfide attuali e massimizzare il potenziale di questa fonte di energia rinnovabile.

L'economia circolare sta diventando sempre più importante nel settore alimentare, con i consumatori che mostrano una preferenza per prodotti naturali e ricchi di

proprietà benefiche per la salute. In questo contesto, i sottoprodotti dell'ananas sono una risorsa preziosa per ottenere composti bioattivi utili per lo sviluppo di nuovi prodotti alimentari funzionali. Tuttavia, una delle sfide principali è il costo delle attrezzature necessarie per l'estrazione di questi composti. Per superare tale sfida, è essenziale investire in ricerca e sviluppo e presentare progetti innovativi a enti pubblici e privati per ottenere sostegno finanziario.

Inoltre, la creazione di impianti di bioraffineria integrata potrebbe essere la soluzione ideale per gestire in modo sostenibile i sottoprodotti dell'ananas, creando al contempo opportunità economiche nel settore alimentare e farmaceutico. L'adozione di sistemi di lavorazione a ciclo chiuso e la diversificazione delle materie prime lavorate potrebbero contribuire a rendere le bioraffinerie integrate redditizie ed efficienti 365 giorni l'anno.

Nonostante tutte queste sfide, le prospettive future per la valorizzazione degli scarti di ananas sono molto promettenti. L'aumento della domanda di prodotti sostenibili, gli sviluppi tecnologici e il crescente interesse per la bioeconomia circolare creano un contesto favorevole per la crescita di questo settore. La valorizzazione degli scarti di ananas ha il potenziale per generare benefici ambientali, economici e sociali significativi, contribuendo a costruire un futuro più sostenibile.

BIBLIOGRAFIA

- Abdullah, A., Mat, H., 2008. CHARACTERISATION OF SOLID AND LIQUID PINEAPPLE WASTE. *Reaktor* 12, 48.
<https://doi.org/10.14710/reaktor.12.1.48-52>
- Abdullah, A., Winaningsih, I., 2020. Effect of some parameter on lactic acid fermentation from pineapple waste by *Lactobacillus delbrueckii*. Presented at the PROCEEDINGS OF 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON CHEMICAL PROCESS AND PRODUCT ENGINEERING (ICCPPE) 2019, Semarang, Indonesia, p. 060002. <https://doi.org/10.1063/1.5140929>
- Abraham, R.A., Joshi T, J., Abdullah, S., 2023. A comprehensive review of pineapple processing and its by-product valorization in India. *Food Chemistry Advances* 3, 100416. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100416>
- Abreu, D.C.A., Figueiredo, K.C. de S., 2019. BROMELAIN SEPARATION AND PURIFICATION PROCESSES FROM PINEAPPLE EXTRACT. *Braz. J. Chem. Eng.* 36, 1029–1039. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190362s20180417>
- Abu Yazid, N., Roslan, A., 2020. Production of enzymes from pineapple crown and coffee husk by solid state fermentation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 778, 012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/778/1/012035>
- Aili Hamzah, A.F., Hamzah, M.H., Che Man, H., Jamali, N.S., Siajam, S.I., Ismail, M.H., 2021. Recent Updates on the Conversion of Pineapple Waste (*Ananas comosus*) to Value-Added Products, Future Perspectives and Challenges. *Agronomy* 11, 2221. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112221>
- Ali, H.K.Q., Zulkali, M.M.D., 2011. Utilization of Agro-Residual Ligno-Cellulosic Substances by Using Solid State Fermentation: A Review. *BIOTECHNOLOGY AND NUTRITION*.
- Alothman, M., Bhat, R., Karim, A.A., 2009. Antioxidant capacity and phenolic content of selected tropical fruits from Malaysia, extracted with different

- solvents. *Food Chemistry* 115, 785–788.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.005>
- Astuti, W., Sulistyaningsih, T., Kusumastuti, E., Thomas, G.Y.R.S., Kusnadi, R.Y., 2019. Thermal conversion of pineapple crown leaf waste to magnetized activated carbon for dye removal. *Bioresource Technology* 287, 121426.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121426>
- Ayodele, B.V., Alsaffar, M.A., Mustapa, S.I., 2020. An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks. *Journal of Cleaner Production* 245, 118857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118857>
- Aziman, S.N., Tumari, H.H., Mohd Zain, N.A., 2015. DETERMINATION OF LACTIC ACID PRODUCTION BY RHIZOPUS ORYZAE IN SOLID STATE FERMENTATION OF PINEAPPLE WASTE. *Jurnal Teknologi* 77.
<https://doi.org/10.11113/jt.v77.6917>
- Balasundram, N., Sundram, K., Samman, S., 2006. Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry* 99, 191–203.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.042>
- Banerjee, S., Ranganathan, V., Patti, A., Arora, A., 2018. Valorisation of pineapple wastes for food and therapeutic applications. *Trends in Food Science & Technology* 82, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.024>
- Casabar, J.T., Unpaprom, Y., Ramaraj, R., 2019. Fermentation of pineapple fruit peel wastes for bioethanol production. *Biomass Conv. Bioref.* 9, 761–765.
<https://doi.org/10.1007/s13399-019-00436-y>
- Chakraborty, A.J., Mitra, S., Tallei, T.E., Tareq, A.M., Nainu, F., Cicia, D., Dhama, K., Emran, T.B., Simal-Gandara, J., Capasso, R., 2021. Bromelain a Potential Bioactive Compound: A Comprehensive Overview from a Pharmacological Perspective. *Life* 11, 317. <https://doi.org/10.3390/life11040317>
- Collesei, C., 2024. La bromelina [WWW Document]. URL
<https://www.dlgyt.it/bromelina> (accessed 6.12.24).

- Correia, R.T.P., McCue, P., Magalhães, M.M.A., Macêdo, G.R., Shetty, K., 2004. Production of phenolic antioxidants by the solid-state bioconversion of pineapple waste mixed with soy flour using *Rhizopus oligosporus*. *Process Biochemistry* 39, 2167–2172. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.11.034>
- D.R., F., 2018. Chemical composition of some selected fruit peels. FAOSTAT [WWW Document], n.d. URL <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize> (accessed 6.12.24).
- Gogoi, S., Chakraborty, S., Dutta Saikia, M., 2018. Surface modified pineapple crown leaf for adsorption of Cr(VI) and Cr(III) ions from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6, 2492–2501. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.040>
- Grisolia, G., Lucia, U., n.d. Biocarburanti e sostenibilit`a: Analisi exergo-economica.
- Hikal, W.M., Mahmoud, A.A., Ahl, H.A.H.S.-A., Bratovcic, A., Tkachenko, K.G., Kačániová, M., Rodriguez, R.M., 2021. Pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.), Waste Streams, Characterisation and Valorisation: An Overview. *Open Journal of Ecology* 11, 610–634. <https://doi.org/10.4236/oje.2021.119039>
- Hikisz, P., Bernasinska-Slomczewska, J., 2021. Beneficial Properties of Bromelain. *Nutrients* 13, 4313. <https://doi.org/10.3390/nu13124313>
- Imandi, S.B., Bandaru, V.V.R., Somalanka, S.R., Bandaru, S.R., Garapati, H.R., 2008. Application of statistical experimental designs for the optimization of medium constituents for the production of citric acid from pineapple waste. *Bioresource Technology* 99, 4445–4450. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.071>
- Jusoh, N., Othman, N., Idris, A., Nasruddin, A., 2014. Characterization of Liquid Pineapple Waste as Carbon Source for Production of Succinic Acid. *Jurnal Teknologi* 69. <https://doi.org/10.11113/jt.v69.3165>
- Kareem, S.O., Akpan, I., Alebiowu, O.O., 2010. Production of citric acid by *Aspergillus niger* using pineapple waste. *Malaysian Journal of Microbiology* 6, 161–165.

- Karim, n.d. EBSCOospite | 100337234| OTTIMIZZAZIONE DEL METODO DI ISOLAMENTO DELLA PECTINA DAGLI SCARTI DI ANANAS (ANANAS COMOSUS L.). [WWW Document]. URL <https://web.p.ebscohost.com/abstract?site=ehost&scope=site&jrnl=20666845&AN=100337234&h=y%2f94qzJynWc%2bbZaUeZU%2fZqJl0N2KTjWsig2%2fM9j0zCIEq1UHrCWeFMrNjvQMWmnZ8QVaGMdPCW5tbf6a8%2bWOaQ%3d%3d&crl=c&resultLocal=ErrCrlNoResults&resultNs=Ehost&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d20666845%26AN%3d100337234> (accessed 6.12.24).
- Li, T., Shen, P., Liu, W., Liu, C., Liang, R., Yan, N., Chen, J., 2014. Major Polyphenolics in Pineapple Peels and their Antioxidant Interactions. *International Journal of Food Properties* 17, 1805–1817. <https://doi.org/10.1080/10942912.2012.732168>
- Mahamad, M.N., Zaini, M.A.A., Zakaria, Z.A., 2015. Preparation and characterization of activated carbon from pineapple waste biomass for dye removal. *International Biodeterioration & Biodegradation* 102, 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.03.009>
- Mallampati, R., Xuanjun, L., Adin, A., Valiyaveetil, S., 2015. Fruit Peels as Efficient Renewable Adsorbents for Removal of Dissolved Heavy Metals and Dyes from Water. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 3, 1117–1124. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00207>
- Nath, P.C., Ojha, A., Debnath, S., Neetu, K., Bardhan, S., Mitra, P., Sharma, M., Sridhar, K., Nayak, P.K., 2023. Recent advances in valorization of pineapple (*Ananas comosus*) processing waste and by-products: A step towards circular bioeconomy. *Trends in Food Science & Technology* 136, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.04.008>
- Pandey, A., Soccol, C.R., Mitchell, D., 2000. New developments in solid state fermentation: I-bioprocesses and products. *Process Biochemistry* 35, 1153–1169. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(00\)00152-7](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(00)00152-7)

- Rajendran, K., Drielak, E., Sudarshan Varma, V., Muthusamy, S., Kumar, G., 2018. Updates on the pretreatment of lignocellulosic feedstocks for bioenergy production—a review. *Biomass Conv. Bioref.* 8, 471–483. <https://doi.org/10.1007/s13399-017-0269-3>
- Rodsamran, P., Sothornvit, R., 2019. Preparation and characterization of pectin fraction from pineapple peel as a natural plasticizer and material for biopolymer film. *Food and Bioproducts Processing* 118, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.09.010>
- Seguí Gil, L., Fito Maupoey, P., 2018. An integrated approach for pineapple waste valorisation. Bioethanol production and bromelain extraction from pineapple residues. *Journal of Cleaner Production* 172, 1224–1231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.284>
- Selani, M.M., Brazaca, S.G.C., Dos Santos Dias, C.T., Ratnayake, W.S., Flores, R.A., Bianchini, A., 2014. Characterisation and potential application of pineapple pomace in an extruded product for fibre enhancement. *Food Chemistry* 163, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.076>
- Selvanathan, N., Subki, N.S., Sulaiman, M.A., 2021. Dye Adsorbent by Activated Carbon. *JTRSS* 3, 169–173. <https://doi.org/10.47253/jtrss.v3i1.552>
- Singh, P., Baisthakur, P., Yemul, O.S., 2020. Synthesis, characterization and application of crosslinked alginate as green packaging material. *Heliyon* 6, e03026. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03026>
- Tannini [WWW Document], 2019. . my-personaltrainer. URL <https://www.my-personaltrainer.it/farmacognosia/111tannini.html> (accessed 6.12.24).
- Valdés, A., Burgos, N., Jiménez, A., Garrigós, M., 2015. Natural Pectin Polysaccharides as Edible Coatings. *Coatings* 5, 865–886. <https://doi.org/10.3390/coatings5040865>
- Vandenbergh, L.P.S., Karp, S.G., De Oliveira, P.Z., De Carvalho, J.C., Rodrigues, C., Soccol, C.R., 2018. Solid-State Fermentation for the Production of Organic Acids, in: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier, pp. 415–434. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63990-5.00018-9>

- Voloshin, R.A., Rodionova, M.V., Zharmukhamedov, S.K., Nejat Veziroglu, T., Allakhverdiev, S.I., 2016. Review: Biofuel production from plant and algal biomass. *International Journal of Hydrogen Energy* 41, 17257–17273.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.084>
- Zain, N.A.M., Aziman, S.N., Suhaimi, M.S., Idris, A., 2021. Optimization of L(+) Lactic Acid Production from Solid Pineapple Waste (SPW) by *Rhizopus oryzae* NRRL 395. *J Polym Environ* 29, 230–249.
<https://doi.org/10.1007/s10924-020-01862-0>