



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente

Corso di laurea in Scienze e tecnologie alimentari

Effetti delle condizioni di stoccaggio e del packaging
sulle modifiche organolettiche della birra

Docente di riferimento
Prof.ssa Gabriella Pasini

Laureando
Cristian Secco

Matricola n.1223015

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Indice

Riassunto	6
Abstract	7
1. La birra e le fasi di produzione	8
1.1 La birra	8
1.2 Maltazione dell'orzo	8
1.3 Fase di ammostamento	8
1.4 Cottura del mosto	9
1.5 La fermentazione	10
1.6 Stabilità e confezionamento	11
2. Packaging tradizionali e processi di confezionamento	12
2.1 I packaging nella birra	12
2.1.1 Contenitore in metallo.....	13
2.1.2 Contenitore in vetro	14
2.3 Processo di confezionamento	14
2.3.1 Confezionamento in bottiglia	14
2.3.2 Confezionamento in lattina	15
3. Modifiche organolettiche e ambienti di stoccaggio.....	17
3.1 I principali composti nella birra	17
3.2 Composti che si originano durante lo stoccaggio	18
3.3 Modifiche organolettiche durante lo stoccaggio	18
3.4 Stabilità biologica e non biologica	19
3.5 Effetto della temperatura e del tempo sulla stabilità della birra.....	20
3.5.1 Effetti sui gruppi chetonici.....	20
3.5.2 Effetti sui composti aromatici.....	21
3.5.3 Effetti sul complesso amaricante.....	22

3.6 Effetto dei processi ossidativi sulla stabilità della birra.....	24
3.7 Effetto delle condizioni di trasporto sulla stabilità della birra.....	25
3.8 Quale packaging scegliere	28
3.8.1 Effetto del packaging sulla stabilità della birra	29
3.8.2 Effetti sull'aroma.....	32
3.8.3 Il ruolo della Riboflavina nei contenitori in vetro	34
3.8.4 Effetto scalping	35
4. Conclusioni.....	38
5. Bibliografia.....	40

Riassunto

La birra è una delle bevande più antiche consumate dall'uomo, la cui scoperta viene attribuita alle civiltà che popolavano il territorio mesopotamico molti secoli prima di Cristo. I metodi di produzione sono stati tramandati e migliorati nel tempo, fino ad arrivare al secolo scorso dove, grazie ad un affinamento della tecnologia e alla scelta dell'utilizzo delle materie prime, l'industria brassicola si è evoluta così come la conosciamo oggi. Inoltre, negli ultimi anni, il settore si è espanso grazie alla nascita di molte piccole realtà produttive che, combinando l'esperienza dei metodi produttivi con la ricerca delle materie prime, hanno cercato di creare nuovi prodotti con caratteristiche particolari.

Un aspetto che tuttavia, al momento, viene ancora sottovalutato è l'instabilità della birra dopo il confezionamento, cioè la sua tendenza a deteriorarsi in seguito a condizioni di stoccaggio non idonee.

Il presente elaborato prende in considerazione proprio detta instabilità, individuando i principali fattori che la determinano, quali le elevate temperature per lunghi tempi di immagazzinamento, i processi ossidativi e il trasporto. Detti fattori associati ai materiali utilizzati per la produzione dei contenitori, incidono su alcuni parametri qualitativi della birra, determinando sensibili variazioni dei composti che conferiscono aroma e sapore al prodotto appena confezionato come le aldeidi che si producono nelle fasi di ammostamento e le sostanze aromatiche ricavate dai luppoli durante la produzione della cotta.

Si può quindi dedurre come la birra sia particolarmente suscettibile alle variazioni ambientali, al punto tale da essere spesso consumata con un profilo aromatico diverso da quello che il produttore vorrebbe fosse trasferito al consumatore.

Abstract

Beer is one of most ancient beverages that people consume, so its discovery could be attributed to the civilizations who lived in Mesopotamian areas many centuries before Christ. Methods used to produce it have been preserved and improved through time, until the arrival in the last century when, thanks the development of technologies and raw materials, the beer industry has evolved in the way we know it. Furthermore, in the last years, the sector has expanded because many homebreweries were born in the last decade. They want to combine their experience about production methods and the research of raw materials qualities, trying to create new products with new characteristics.

Nowadays, an undervalued aspect is beer stability after the packaging. that is its capacity of deteriorating caused by not suitable storage conditions.

This paper explains this instability, identifying the main causes that contribute to this fact like temperatures for long periods of storage, oxidation processes and transports. In addition to these causes, the materials of packaging affect the quality parameters of beer determining perceptible variations of the compounds which confer flavours in fresh beer like aldehyde molecules produced during the beer mashing and aromatic hops compounds produced during the boiling.

We can deduce how beer is a very susceptible beverage to environmental variations so much that, when the consumer drinks it, the taste profile is different than fresh beer.

1. La birra e le fasi di produzione

1.1 La birra

La birra è una bevanda ottenuta dalla fermentazione alcolica del mosto d'orzo con l'utilizzo di lieviti selezionati (LSA), appartenenti ai ceppi *Saccharomyces carlsbergensis* o *Saccharomyces cerevisiae*.

Le materie prime usate per la sua produzione sono acqua, orzo, luppolo e lieviti, mentre le fasi di produzione della bevanda prevedono la maltazione dell'orzo, l'ammostamento del malto, la cottura del mosto, la fermentazione ed infine il confezionamento. Oltre all'orzo, possono essere utilizzati succedanei amidacei quali mais, frumento e riso, che permettono di ottenere dei prodotti con caratteristiche organolettiche molto differenti. Nonostante ciò, l'orzo è il cereale maggiormente impiegato in quanto possiede un'ottima frazione dei principali macronutrienti utilizzati dai lieviti in fase di fermentazione; i contenuti amidacei sono del 70-85% mentre quelli proteici del 11%.²

1.2 Maltazione dell'orzo

Il processo di maltazione dell'orzo prevede ripetute immersioni del cereale in serbatoi contenenti acqua ad una temperatura di circa 12-14°C. L'operazione dura circa 5-6 giorni, tempo necessario affinché la cariosside si gonfi di acqua per oltre 1/3 rispetto al suo volume iniziale, raggiungendo una umidità del 42-46%.² Durante questa fase avviene la germinazione della coleorizza (radichetta) che contribuisce alla sintesi del complesso di enzimi idrolitici (definito complesso diastatico), che svolgono un ruolo fondamentale nella degradazione dell'amido durante la fase di ammostamento.

I principali enzimi sono: β -Glucanasi e Arabinosilasi, coinvolti nel degradare la parete dell'endosperma dell'orzo; α e β amilasi coinvolti nell'idrolizzazione dell'amido; Esopeptidasi ed Endopeptidasi coinvolti nella degradazione proteica e liberazione degli APA (Aminoacidi prontamente assimilabili), indispensabili per lo sviluppo dei lieviti.¹ Completato lo sviluppo della radichetta, si ottiene il cosiddetto *malto verde*. A questo punto, si passa al processo di tostatura del malto. Si tratta di un trattamento termico che viene condotto in appositi essicatori, aventi ripiani forati su cui poggia il malto. La temperatura sale gradualmente fino a raggiungere circa 85°C permettendo alla cariosside di fare evaporare il contenuto d'acqua, con riduzione graduale dell'umidità fino al 5%. Al termine del trattamento, il malto va conservato in appositi locali a basse temperature e basso tenore di umidità.²

1.3 Fase di ammostamento

Questa fase di produzione è molto importante perché permette di ricavare l'estratto, cioè la frazione di zuccheri fermentescibili utilizzati, in seguito, dai lieviti per la fermentazione. La resa di estratto sarà sempre inferiore al 100% di zuccheri iniziali e, per una buona resa in qualità, il valore deve

essere compreso tra l'85-95%. L'ammestamento dura circa due ore, periodo in cui l'acqua aumenta gradualmente di temperatura in tre fasi ben distinte: la prima con temperature tra i 30-45°C, in cui si attivano sia le β -glucanasi che gli enzimi fitasi (questi ultimi coinvolti nell'abbassamento del pH del mosto a causa della degradazione della fitina); la seconda con temperature tra i 45-55°C, in cui si attivano le proteasi; l'ultima -con range di temperature tra 58-75°C- in cui si attivano le β -amilasi che idrolizzano l'amido producendo molecole di maltosio e, le α -amilasi che lo degradano in unità di destrine. Le destrine sono polimeri complessi che vengono successivamente degradati dalle β -amilasi in zuccheri riducenti. Alla fine del processo si effettua una filtrazione delle trebbie, in modo da dividere l'estratto di mosto dai corpi solidi, trasferendolo in un altro tino, per dare avvio alla cottura del mosto. ²

1.4 Cottura del mosto

Il mosto viene trasferito in un apposito tank dove si avvia la cottura per almeno due ore, a temperature di circa 100°C. Le elevate temperature hanno un ruolo fondamentale sia per il mantenimento della sterilità sino al momento dell'inoculo dei lieviti, che per la completa denaturazione di tutti gli enzimi non più necessari. In questa fase vengono aggiunti i luppoli, che grazie alle elevate temperature, solubilizzano nel mosto gli α -acidi, β -acidi, i loro isomeri e gli oli essenziali.

Gli α -acidi (la cui concentrazione è dieci volte maggiore rispetto ai β -acidi) conferiscono alla birra sapore amaricante. Quelli con maggiore potere amaricante sono: humulone, cohumulone e adhumulone. Queste molecole, molto solubili ad elevate temperature, esplicano anche attività antisettica nei confronti dei microrganismi.

Gli oli essenziali - che nel luppolo rappresentano una frazione non superiore al 3% - sono composti volatili e di struttura complessa, biosintetizzati a partire dall'isoprene, composto idrocarburico con 5 atomi di carbonio. Essi conferiscono il profilo aromatico alla birra. Quelli principali e di maggior interesse aromatico sono mircene, cariofillene, farnesene e gli alcoli terpenici, tra cui il linalolo e geraniolo. ²

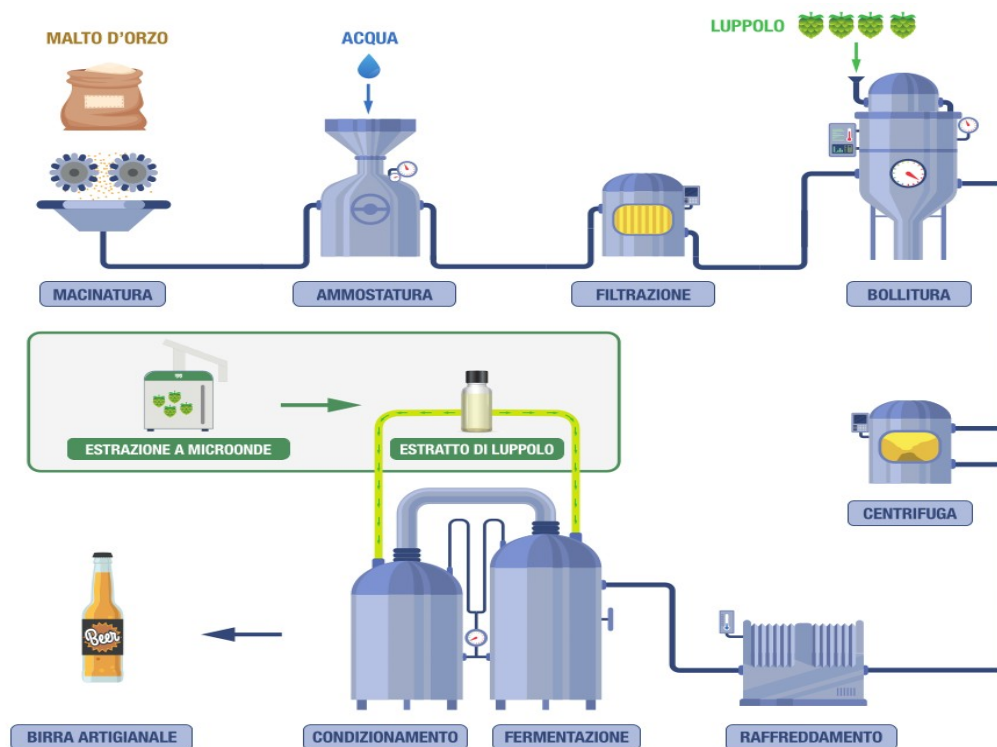


Figura 1.1 – Processo generale di produzione della birra. ⁵²

1.5 La fermentazione

Il processo fermentativo è quello che, attraverso il lavoro dei lieviti, porta al prodotto finale. Dopo che la cotta si è raffreddata viene travasata in appositi serbatoi per avviare la fermentazione. Tecnicamente la fermentazione si sviluppa in due fasi: una primaria ed una secondaria. Nella fermentazione primaria la quasi totalità degli zuccheri viene fermentata dai lieviti con produzione di etanolo, anidride carbonica e prodotti secondari del metabolismo dei lieviti, che contribuiscono marcatamente ai *flavors* della birra. I principali metaboliti prodotti sono: esteri, alcoli superiori, acido solfidrico, mercaptani, acetaldeide e diacetile. Nella fermentazione secondaria, in cui la birra viene considerata ancora “verde”, si avvia il processo di maturazione. Questa seconda fase varia a seconda della tipologia di birra che si vuole ottenere. Si parla di bassa fermentazione per la produzione delle lager (in tedesco *lagering* da cui il termine lager); essa prevede l'inoculo di lieviti del genere *Saccharomyces pastorianus*, è caratterizzata da basse temperature di 5-15°C ed un tempo variabile di 8-15gg. Si parla, invece, di alta fermentazione quando si avvia la produzione delle birre ale, che prevede l'utilizzo di lieviti *Saccharomyces cerevisiae* e il processo è ottenuto a temperature più alte tra i 18-25°C per un tempo di 2-4gg. ²

1.6 Stabilità e confezionamento

Al termine della fermentazione la birra ha raggiunto la sua maturità organolettica e la saturazione di anidride carbonica. A questo punto è pronta per essere confezionata, ma prima deve subire un illimpidimento mediante filtrazione, processo indispensabile per eliminare residui solidi come lieviti esausti, polifenoli e proteine, che renderebbero il prodotto opalescente. La filtrazione può avvenire in più modi: per mezzo di farina fossile (attraverso la tecnica del prepanello ed alluvionaggio), filtri di cartone a membrane oppure tramite filtrazione PVPP (polivinilpolipirrolidone). Quest'ultima è maggiormente indicata per la rimozione di sostanze polifenoliche, responsabili di instabilità a causa della loro capacità di legarsi alle proteine formando composti insolubili ed indesiderati. Successivamente il prodotto viene confezionato in bottiglie di vetro o PET, lattine o fusti, a seconda delle scelte tecniche, produttive e commerciali di ogni singolo produttore. Dopodiché subisce un trattamento termico di pastorizzazione per aumentare la sua *shelf-life*, inattivare eventuali microrganismi presenti, denaturare enzimi che potrebbero originare composti indesiderati e rendere più stabile biologicamente il prodotto. I principali metodi di pastorizzazione impiegati sono due ²:

1. Pastorizzazione a tunnel, con acqua per aspersione sulla confezione, a temperatura crescente fino ai 60° per 12-20 minuti.
2. Pastorizzazione flash, mediante scambiatore di calore a temperature di circa 70°C e tempi di 1-2 minuti.

2. Packaging tradizionali e processi di confezionamento

Il problema che da sempre ha cercato di risolvere l'uomo è come conservare gli alimenti, in particolare le bevande. La scelta del contenitore risulta quindi importante non soltanto per contenere la materia prima o il prodotto finito, ma anche per la sua *shelf-life*, per poterlo stoccare e trasportare al fine di mantenerlo inalterato fino al momento del consumo.

2.1 I packaging nella birra

Sono quattro le tipologie di packaging oggi riscontrabili nel settore brassicolo. La bottiglia di vetro, definito il contenitore per eccellenza per la sua robustezza, si può trovare in commercio in vari formati, dimensioni e colori (verde e marrone). La lattina, che viene utilizzata sia per la sua leggerezza che per la capacità di proteggere la bevanda dalla luce solare. I fusti, tipicamente prodotti in acciaio, che non sono destinati al consumo diretto, bensì rivolti al settore ristorativo.⁵ Infine, nell'ultimo ventennio, si è inserito nel settore anche l'impiego di bottiglie e fusti in PET.

Da un punto di vista tecnologico, il packaging assolve tre funzioni protettive³:

- Protezione fisica, mantenendo la bevanda separata dall'ambiente esterno.
- Protezione biologica, evitando contaminazioni da parte di batteri, funghi, insetti o altri animali.
- Protezione chimica, cercando di ridurre modifiche organolettiche influenzate da cause ambientali esterne, quali l'esposizione alla luce o a fonti termiche.

Scegliere quindi il giusto contenitore è fondamentale al fine di proteggere la bevanda e mantenere la qualità del prodotto durante il suo periodo di conservazione e di trasporto. La **Tabella 2.1** mette a confronto vantaggi e svantaggi dei principali materiali impiegati per la produzione dei packaging in vetro e lattina.³

Tabella 2.1 - *Tabella tradotta dalla review "New trends and beverage packaging systems"* ⁵⁴

Materiale	Vantaggi	Svantaggi
Vetro	Riciclabile Maggior resistenza a rotture Inerte agli odori Impermeabile a gas e vapori Rigidità Utilizzabile per sterilizzazioni Buona isolamento Mantenimento della freschezza del prodotto per un lungo periodo conservando gusto e sapore Diverse colorazioni permettono la protezione dai raggi solari	Pesante all'uso Maggiori costi di trasporto Fragilità Suscettibilità a rotture causate da urti, pressioni o shock termici
Metallo	Versatilità Protezione fisica Barriera protettiva Potenziale decorativo Riciclabile Gradito dai consumatori	Elevati costi dell'alluminio, se comparato ad altri materiali (ad esempio Acciaio) Non può essere saldato, altrimenti non utilizzabile a scopi alimentari.

2.1.1 Contenitori in metallo

I contenitori di latta ad uso alimentare possono essere in banda stagnata, TFS (*Teen Free Steel*), oppure in alluminio. La banda stagnata risulta essere maggiormente resistente alla corrosione e adatta alle saldature. Il TFS non è adatto alle saldature, ma è eccellente per applicazioni di lacche o inchiostri organici usati per rivestire. L'alluminio è però il materiale maggiormente impiegato nella produzione di lattine per la birra. È altamente resistente alla corrosione e viene spesso addizionato di magnesio e manganese per aumentarne le proprietà di resistenza. È un eccellente barriera alla luce, all'ossigeno, all'umidità e ai microrganismi.³

La produzione della lattina si avvale del metodo Hall-Héroult (dal nome dei due chimici che lo hanno messo a punto). La materia prima, in formato di ossido di alluminio, viene fusa assieme alla criolite, un composto che permette di abbassare il punto di fusione a 1000°C. Una volta raffreddato, viene sottoposto a processi tecnologici, attraverso i quali si ottengono dei fogli sottili da cui prende

avvio la formazione della lattina. Le tre parti che la costituiscono sono: corpo, fondo e top. Il corpo possiede uno spessore finale di 0.9 mm. Il fondo ha una curvatura concava che gli permette di resistere alle pressioni esercitate dal prodotto. Il top è più spesso in quanto piatto e viene pressato lungo l'orlo per permettere di resistere alle pressioni di CO₂ esercitate dall'interno.⁴ Per mantenere separati gli alimenti dal metallo, la parte interna viene rivestita di film laminati o lacche organiche applicate mediante uso spray. I composti più comunemente utilizzati sono quelli a base di resine fenoliche, gli epossidici e le resine di vinile.³

2.1.2 Contenitori in vetro

I contenitori in vetro sono costituiti da diossido silicico, definito quarzo fuso. Per abbassare il punto di fusione e poterlo rendere più malleabile durante la lavorazione, viene mescolato con una miscela di sali definita *flux*. I più comuni sali impiegati sono carbonato di sodio (Na₂CO₃), ossido di calcio (CaO) e carbonato di calcio (CaCO₃).⁴ Il materiale fuso viene inserito all'interno di stampi aventi la forma a bottiglia. Per raffreddarli vengono spostati in forni di raffreddamento fino al raggiungimento di 100°C. Infine le bottiglie vengono nebulizzate con acidi organici al fine di lubrificarle e renderle antigraffio. Per il settore brassicolo, l'aggiunta di altri composti in fase di fusione permette di ottenere vetri colorati. Tipicamente si tratta di colorazioni ambrate e verdi che permettono alla birra di ridurre i processi ossidativi in seguito all'esposizione luminosa.⁹ La bottiglia è costituita da un corpo (che svolge la funzione di recipiente che contiene la bevanda), un collo e un tappo. Quest'ultimo ha la forma di una corona con 21 denti disposti lungo l'orlo che vengono ripiegati in fase di imbottigliamento. Il lato interno del tappo è rivestito da materiale plastico che aderisce all'orlo del collo e permette di sigillare il contenitore evitando fuoriuscita di liquidi e gas.⁴

2.2 Processo di confezionamento

Aspetti fondamentali in tutte le fasi del processo di confezionamento sono l'esposizione all'ossigeno, che deve essere ridotta il più possibile (non deve superare 0,02-0,04 mg/L) e la pulizia dei locali di lavorazione, in particolare gli impianti di confezionamento.²

2.2.1 Confezionamento in bottiglia

Questo processo avviene attraverso l'impiego di macchine imbottigliatrici. Prima di iniziare il riempimento si procede con la pulizia delle bottiglie. Queste vengono immerse in contenitori di acqua addizionata con idrossido di sodio in concentrazione da 1 a 5%, per poi passare ad un secondo lavaggio con appositi detergenti. A seguire si provvede ad asciugare le bottiglie mediante l'uso di spruzzi d'aria calda. Tale processo è fondamentale per pulire l'interno da eventuali corpi residuati e ridurre al minimo l'eventuale presenza di microrganismi.

Segue poi un controllo ispettivo delle bottiglie, che viene effettuato mediante laser ottici o infrarossi. Successivamente prende il via il processo di riempimento, che a livello industriale, avviene quasi sempre in condizioni isobariche a temperatura ambiente. Il motivo è quello di evitare perdite di CO₂ contenuta nella birra.⁶ Oggi giorno si lavora con la tecnica della contropressione. Il trattamento è definito pre-evacuazione e comporta l'aspirazione dell'aria contenuta all'interno della bottiglia attraverso una pompa d'aspirazione. In questo modo si porta quasi a zero la concentrazione di ossigeno residua.⁸ Successivamente un iniettore viene inserito nella bottiglia ed inizia un lento riempimento. Quando il prodotto raggiunge l'estremità del collo un sensore ottico ferma l'operazione. Quindi si procede con apposite pompe in sottovuoto per estrarre l'aria contenuta nel collo per circa il 90%. L'operazione è seguita dal riempimento dello spazio di testa con anidride carbonica per ridurre al minimo la presenza di ossigeno. In alternativa si induce la birra a produrre schiuma attraverso l'utilizzo di vibrazioni ad ultrasuoni. Lo scopo, in entrambe i casi, è riempire il collo della bottiglia di schiuma qualche istante prima che venga tappata. L'ultima operazione prevede la chiusura con i tappi a corona. Il processo avviene tramite pistoncini meccanici, che procedono con la chiusura a pressione, dopo aver posizionato la corona sull'orlo del collo.⁷ Alla fine del processo il volume dello spazio di testa non deve superare i 2 ml.²

2.2.2 Confezionamento della lattina

La procedura per il confezionamento in lattina ha molte somiglianze con quella in bottiglia, ma differisce per alcuni aspetti tecnici. Il riempimento, tramite ugelli, deve avvenire con pressioni ridotte a causa della minor robustezza della lattina. La sottrazione di aria prima del riempimento non è possibile, a causa della CO₂ contenuta nella bevanda, pertanto essa avviene naturalmente durante il riempimento. Si passa poi alla chiusura della lattina. Un braccio meccanico preleva i coperchi e li deposita con precisione sopra l'orlo della stessa. A seguire, una torretta assesta il coperchio e ne assicura l'ancoraggio all'orlo.



Figura 2.1 – Lattinatrice in fase di imbottigliamento della birra.⁵³

Infine, in pochi istanti, viene prima arrotolato il bordo del coperchio (**Figura 2.2-A**) sull'orlo e poi arricciato definitivamente (**Figura 2.2-B**).⁷ Questo processo è molto importante perché serve ad assicurare che non vi sia alcuna dispersione della bevanda verso l'esterno e che non vi sia nessuna possibilità di scambio gassoso tra l'interno e l'esterno del packaging.

Al termine dell'operazione si effettua il controllo di corretto riempimento. Un dispositivo a raggi gamma misura le differenti intensità di assorbimento di lattina, aria e birra. Successivamente un detector permette di valutare, basandosi sui differenti coefficienti di assorbanza, eventuali contenitori non idonei al commercio.⁷

Figura 2.2-A

Fase di arrotolamento della lattina .⁷

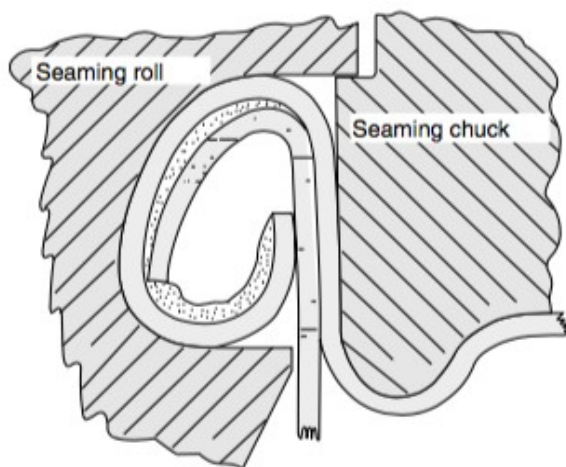
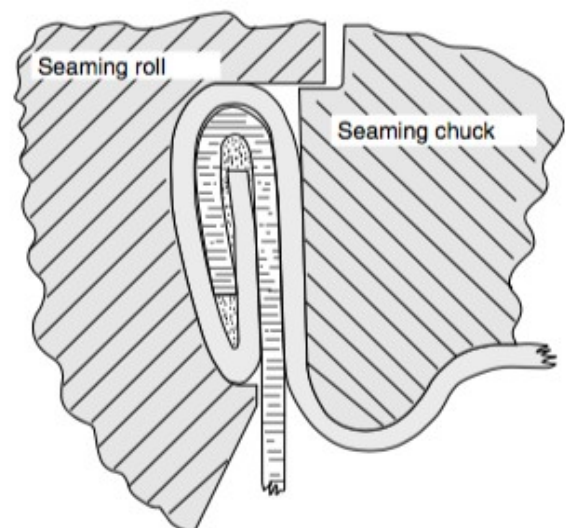


Figura 2.2-B

Fase di arricciamento finale della lattina.⁷



3. Modifiche organolettiche e ambienti di stoccaggio

3.1 I principali composti della birra.

Le birre contengono numerose sostanze aromatiche derivanti dalle materie prime utilizzate per la produzione: malto d'orzo, luppolo e lieviti.

Le sostanze ricavate dal malto d'orzo sono in prevalenza composti che si formano nelle varie tappe della reazione di Maillard. Questi ultimi possono a loro volta originare sia composti ad alto peso molecolare (melanoidine) che a basso peso molecolare, molti dei quali contribuiscono al *flavor* del malto, come i composti eterociclici azotati (pirroli, oxazoli, imidazoli, tiazoli e piridine) e quelli non azotati (furani, pirani, tiofeni). Inoltre, mediante la reazione di degradazione degli amminoacidi, essi portano alla formazione delle aldeidi, importanti da un punto di vista aromatico e gustativo.

Particolare attenzione merita il dimetilsolfuro (DMS), composto aromatico presente in molte birre. Si origina durante la maltazione del cereale a partire dall'amminoacido metionina, da cui si forma il precursore S-metilmetionina che porta alla sintesi del DMS, responsabile dell'aroma di vegetali cotti. A basse concentrazioni caratterizza il gusto di moltissime lager, mentre ad elevate concentrazioni (sopra i 60 µg/L) diventa un *off-flavour*.²

I composti aromatici che si originano dal luppolo sono²:

α -acidi : umulone, coumulone, adumulone. Responsabili del potere amaricante, in particolare gli iso-alfa-acidi, isomeri che si formano dal riarrangiamento degli α -acidi durante le fasi di bollitura ad elevate temperature.

β -acidi : lupulone, colupulone, adlupulone, rappresentano i composti chetonici meno presenti (livello inferiore al 4%) a causa della loro minore solubilità.¹²

Oli essenziali: sono responsabili dei complessi sensoriali della birra e rappresentano una vasta quantità di composti volatili. Sono sintetizzati a partire dall'isoprene e si dividono in monoterpeni (10 atomi di C) e sesquiterpeni (15 atomi di C). Tra i principali troviamo: limonene (sapore di agrumi), mircene, carofillene, umulene e farnesene² e terpeni alcolici come linalolo, geraniolo, nerolo e β -citronelolo.¹⁰

Sostanze ricavate dalla fermentazione dei lieviti²:

- Gli esteri che sono i responsabili delle note floreali e fruttate. Si formano dall'esterificazione di acidi grassi ed alcol etilico o alcoli superiori. Tra i più importanti si riscontrano isoamilacetato,

etilacetato, isobutilacetato, β -fenilacetato, etilcaproato ed etilcapilato.

- Gli alcoli superiori, cioè sostanze aromatiche che conferiscono toni fruttati come ananas o pera. Si possono originare dalla deaminazione degli AA, oppure dall'ossidazione di zuccheri che diventano cheto-acidi, seguita da una decarbossilazione e successiva riduzione dell'aldeide ad alcol superiore.

- L'acetaldeide, un intermedio della glicolisi. Principale responsabile del gusto immaturo, definibile come sapore da mela verde.

- Il diacetile e il 2,3-pentandione, spesso definiti chetoni vicinali, indicati con l'acronimo VDK. Il diacetile è sinonimo di sapore dolciastro nei prodotti fermentati. Si origina dalla degradazione ossidativa dell'acetolattato, a sua volta derivante dall'acido piruvico e acetaldeide durante la glicolisi. Il 2,3-pentandione deriva dall'acido acetoidrossibutirrico, intermedio della sintesi dell'amminoacido isoleucina.

- L'acido solfidrico e i mercaptani che sono composti volatili derivati dalla degradazione di amminoacidi solforati, quali cisteina e metionina. Ad elevate concentrazioni, sono responsabili di odori sulfurei a volte sgradevoli. ²

3.2 Composti che si originano durante lo stoccaggio

Un composto che influenza molto la birra durante l'invecchiamento in ambiente di stoccaggio è il (E)-2-nonenale. Si tratta di un'aldeide insatura che si genera durante lo stoccaggio della birra, soprattutto se sottoposta a temperature sopra i 35°C, anche per pochi giorni. Elevate concentrazioni conferiscono un sapore indesiderato, percepito come gusto cartonato e fibroso che ricorda le cucurbitaceae.⁹ Altre aldeidi ricavate dal luppolo che conferiscono sapore alla birra sono il 2-methyl-butanale, benzaldeide, metionale, 2-methyl-propanale e furfurale; questi ultimi due sono i principali contributori del livello globale delle aldeidi nelle birre ale. ¹¹

Tra i composti eterociclici si trovano il HMF, il furfurale, il furano e l'alcol furfurilico. Questi composti, in particolare l'HMF, possono aumentare in fase di maturazione ed elevate concentrazioni sono utili indicatori di errati trattamenti termici durante la lavorazione.

Infine, altri composti originati dalla maturazione che conferiscono sapore di drupacee alla birra sono esteri, quali acetato isoamilico, γ -hexalactone e γ -nonalactone. ⁹

3.3 Modifiche organolettiche durante lo stoccaggio

Il gusto ed il sapore della birra iniziano a deteriorarsi quasi subito dopo i processi produttivi. Negli ultimi anni, visto il volume di affari, il settore si sta adoperando per attuare strategie volte ad aumentare e migliorare la *shelf-life* del prodotto. La stabilità della birra vede coinvolti vari fattori quali: materie prime, impatti tecnologici, condizioni di stoccaggio, il packaging e, più recentemente, le condizioni di trasporto. ¹³

3.4 Stabilità biologica e non biologica.

Rispetto a molte altre bevande alcoliche, la birra viene definita unica in quanto non rimane stabile, da un punto di vista organolettico, dopo il confezionamento. La stabilità si può dividere in biologica e non biologica (**Tabella 3.1**). La stabilità biologica è data da vari fattori quali igiene dell'ambiente di lavoro, processi tecnologici e pastorizzazione¹⁵ a cui si associano il pH, il contenuto alcolico, l'azione antisettica dei luppoli e la carbonazione.¹⁶ Un ruolo chiave viene svolto dagli iso- α -acidi, isomeri degli α -acidi, le cui proprietà antimicrobiche inibiscono notevolmente lo sviluppo dei batteri Gram positivi.¹⁷

La stabilità non-biologica, invece, vede coinvolti aromi e aspetti chimico-fisici come la formazione della schiuma, l'effetto *gushing*, la torbidità e processi ossidativi.

Tabella 3.1 – Fattori che influiscono sulla stabilità biologica e non biologica della birra¹³

Stabilità Biologica	Stabilità non Biologica
Ambiente di lavoro	Schiuma
Pastorizzazione	Effetto <i>gushing</i>
pH	Torbidità
Contenuto alcolico	Processi ossidativi
Carbonazione	Aromi
Azione antisettica α -acidi	

La formazione della schiuma è caratterizzata da vari elementi tra cui la frazione proteica, gli iso- α -acidi, ioni metallici, polisaccaridi e packaging^{18;19}. Essa svolge un ruolo chiave nella stabilità del prodotto, oltre a promuovere cambi di sapore al consumatore.¹⁴ Il *gushing* è un effetto indesiderato descrivibile come l'esplosione della bevanda all'apertura della confezione. Il fenomeno è associato ad errati processi di carbonazione ed elevate temperature di stoccaggio.¹⁴ La torbidità è causata da più fattori concatenanti: interazione tra flavonoidi e proteine, alte temperature, presenza di ossigeno e vibrazioni di trasporto. Il fenomeno non è piacevole alla vista e può essere anche duraturo nel tempo.^{18;19}

Alterazioni dei fattori di stabilità di cui trattasi, possono incidere sul sapore amaricante fino ad un decadimento nelle note di aroma fresco (fruttato e floreale) associati ad un rapido invecchiamento, favorendo *off-flavours* indesiderati, quali sapori cartonato, caramellato e dolce.²⁰ Nello specifico, la perdita del sapore amaro e delle note di aroma fresco è associata alla degradazione degli iso- α -acidi e perdita di esteri, mentre il gusto stantio è relazionato ad un aumento di concentrazione di composti chetonici.^{22;23}

Tra i composti responsabili degli *off-flavours* c'è il (E)-2-nonenale (spesso citato anche col nome *trans*-2-nonenale), a cui si deve il sapore cartonato. Esso contribuisce allo stantio della birra e la sua sintesi è associata all'ossidazione dell'acido linoleico durante la bollitura.⁹ Altri composti aldeidici, che favoriscono sapori indesiderati, derivano dalla degradazione di Strecker²⁴, o da altri intermedi della reazione di Maillard, e sono di per sé presenti a basse concentrazioni. Un eccesso, però, di queste sostanze, come il 2-metilpropanale o il furfurale, conferiscono *off-flavours* come malto abbrustolito, cacao o caramello. Tra questi, il 3-deossiglucosone (3-DG), durante il periodo di stoccaggio, può reagire con altri composti formando il 5-idrossimetil furfurale (5-HMF).²⁵ Infine, esteri come il 3-metilbutil-acetato e l'etil-esanoato, subiscono delle idrolizzazioni con conseguente diminuzione del sapore fruttato a favore di sentori floreali.²⁶

3.5 Effetto della temperatura e del tempo sulla stabilità della birra

Ci sono molti fattori che incidono sulla stabilità della birra tra cui la temperatura, le tecniche di birrificazione, le materie prime, l'ossigeno e le condizioni di stoccaggio e di trasporto.^{21; 38}

Appena prodotta la birra contiene concentrazioni variabili dei principali composti che ne caratterizzano il sapore e la qualità, ma durante lo stoccaggio si possono innescare parecchie reazioni temperatura-dipendenti, che portano all'alterazione della stabilità della birra.²⁷

3.5.1 Effetti sui gruppi chetonici

Le aldeidi sono le sostanze principalmente coinvolte tra i gruppi carbonilici.

Studi effettuati su birre lager stoccate a 22°C per nove mesi hanno messo in evidenza livelli di 2-metilpropanale fino ad undici volte superiori rispetto all'inizio. Un trend simile è stato osservato anche in furfurale ed esanale, con valori di quindici volte superiori. La somma totale delle aldeidi è stata stimata essere almeno dieci volte superiore se comparata con quella iniziale.²⁸

Altri test, sottoponendo delle lager a 30°C per quattro mesi hanno evidenziato aumenti delle principali aldeidi con valori variabili dalle dieci alle trenta volte. Contemporaneamente si è notato un raddoppiamento delle ossidazioni lipidiche (esanale e *trans*-2-nonenale) ed un aumento visibile del colore e della torbidità.²⁹

Altri studi condotti sul 5-HMF ed il furfurale, considerati composti chiave nell'invecchiamento della birra, svolti in un periodo di tempo pari a quaranta giorni, hanno rilevato che la concentrazione di 5-HMF a 30°C era aumentata del 30% rispetto all'origine, mentre a 50°C di ben cinque volte. Si deduce che la sua formazione è temperatura dipendente.³⁰ Invece, test condotti a 37°C per cinque mesi sul furfurale, hanno evidenziato un aumento di quindici volte superiore rispetto alla concentrazione iniziale.³¹ Oltre alle elevate temperature, anche l'ossigeno contribuisce ad incrementare lo sviluppo del furfurale. Livelli superiori a 3mg/L di ossigeno favoriscono infatti il

fenomeno. Invece, l'eventuale presenza di diossido di zolfo (composto prodotto dai lieviti in fermentazione) ne può ritardare lo sviluppo sia a temperatura ambiente che di refrigerazione.³¹

Altri studi, sottoponendo birre lager a 25°C per quattro mesi, hanno evidenziato un aumento di aldeidi del 50%. I composti rilevati in questo trend sono quelli derivati dalla degradazione di Strecker, quali 2-metilbutanale, 3-metilbutanale, benzaldeide e fenilacetaldeide.²⁷

Altri hanno evidenziato un aumento di acetaldeide di circa il 30% in birre lasciate a temperatura ambiente (22°C) per 6 mesi.³²

Particolare attenzione è stata rivolta verso il (E)-2-nonenale, composto che si presenta in tutte le qualità di birra, con un forte impatto durante l'invecchiamento. La formazione della molecola avviene già durante le fasi di maltazione e ammostamento, guidata dalla presenza sia di gruppi amminici liberi che della frazione lipidica. Gli acidi grassi maggiormente presenti sono l'acido linoleico (C18:2) e linolenico (C18:3), derivati dal malto d'orzo. Durante l'ammostamento e la bollitura, l'acido linoleico subisce ossidazioni per autossidazione oppure ossidazione mediata da enzimi lipossigenasi (LOX). Valori bassi di pH favoriscono l'idrolisi acida portando alla formazione del composto finale, mentre le elevate temperature di stoccaggio ne incrementano il rilascio nella birra. Infatti si è notato che il (E)-2-nonenale aumenta in modo direttamente proporzionale all'aumentare della temperatura.³³ Anche in analisi effettuate in birre ale a temperatura ambiente (20°C) per sei mesi, si è riscontrato un aumento dei composti aldeidici a sfavore della concentrazione di esteri. La correlazione è legata a processi ossidativi in fase di maturazione in ambiente non idoneo. Le principali aldeidi coinvolte, che hanno contribuito a fornire sapori indesiderati sono: 2-metilpropanale e 2-metilbutanale (associati a sapore di erba verde, medicinale); e-metilbutanale e pentanale (associati a sapore erbaceo o banana); 2-furfurale, ottanale e metionale (sapore vinoso); benzaldeide (gusto di mandorla); nonanale e decanale (sapore amaro indesiderato).^{23;37}

3.5.2 Effetti sui composti aromatici

La seconda famiglia di composti che subisce maggiori danni da stoccaggio sono gli esteri. La loro concentrazione nelle birre è sempre nell'ordine di µg/L. Nonostante i bassi livelli, la loro presenza caratterizza gli aromi della bevanda.

Lager stoccate a temperatura ambiente (20°C) per circa sei mesi hanno riscontrato perdite di isoamilacetato e fenilacetato in quantità tra il 50 e 85%.³⁴

Mentre birre ale stoccate sempre a 20°C per un periodo di dieci mesi hanno subito un notevole abbassamento delle concentrazioni dei principali esteri presenti, quali 3-metilbutirato, metil geranato e 2-metilbutilpropionato (**Figura 3.1**). Le stesse birre, conservate per lo stesso periodo a 4°C, hanno mantenuto pressoché invariata la concentrazione iniziale dei composti aromatici¹⁰, ad eccezione del 2-metilbutilpropionato, il cui livello si è abbassato quasi alle stesse concentrazioni

della temperatura ambiente.

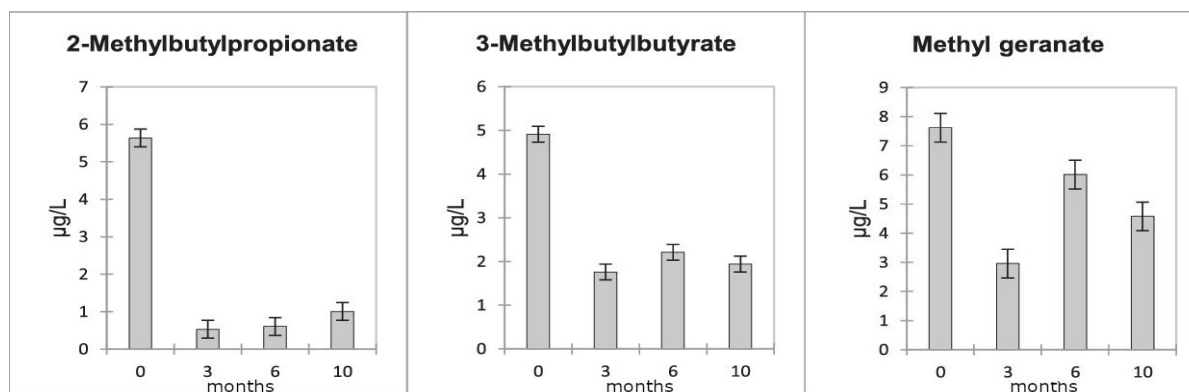


Figura 3.1 – Effetto dello stoccaggio di birre ale a 20°C per 10 mesi. ¹⁰

Altri composti volatili (derivanti dal luppolo) che subiscono danni da stoccaggio sono il 2-MBIB (2-metilbutilisobutiraro) e i terpeni. Confrontando birre a temperatura di 4°C con birre a 20°C per circa un mese, si è riscontrata una perdita del 2-MBIB del 60% tra le due situazioni di stoccaggio ³⁴.

In birre ale sono stati analizzati, invece, terpeni quali il limonene e mircene e si è osservato che la loro concentrazione a 20°C è diminuita di valore tra l'80 e 87%, nello specifico, il limonene ha subito un decremento di circa l'80%, mentre a basse temperature (4°C) non si sono verificate perdite al di sopra del 15%. ¹⁰

3.5.3 Effetti sul complesso amaricante

Vari test hanno valutato l'effetto della temperatura sugli α -acidi durante lo stoccaggio. Birre lager in bottiglia sono state stoccate per periodi lunghi (circa 2 anni) a temperatura di circa 30°C. Da una prima rilevazione effettuata dopo otto mesi, si è constatato un dimezzamento delle sostanze amaricanti, mentre dopo due anni ne sono state rilevate solamente alcune tracce. In particolare il cohumulone (**Figura 3.2 - 1a**) si era completamente degradato, mentre i suoi isomeri, quali il cohumulinone - derivato da processi ossidativi (**Figura 3.2 - 2^a**) - ed il trans-isocohumulone - derivato da isomerizzazioni (**Figura 3.2 - 4^a**) - erano diminuiti con valori prossimi allo zero. ¹²

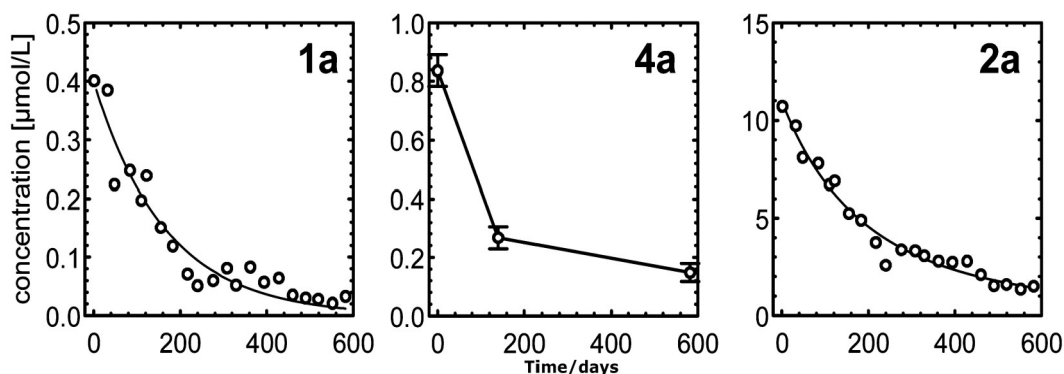


Figura 3.2 - 1a: decremento della concentrazione di cohumulone in 600 giorni; 2a: decremento concentrazione di cohumulinone in 600 giorni; 4a: decremento della concentrazione del trans-isocohumulone in 600 giorni.¹²

In alcune ale, testate per dieci mesi a temperature di 20°C, si sono riscontrate forti riduzioni dell'humulinone e di conseguenza degli α -acidi complessivi. Si è calcolato che il potere amaricante complessivo ha perso intensità per circa un 25% rispetto all'inizio.¹⁰

Il valore è stato calcolato mediante la formula dell'IBU (International Bitterness Unit) :

$$\text{IBU} = \text{iso} - \alpha - \text{acidi (mg/L)} + 0.66 * \text{Humulinoni (mg/L)}$$

Oltre alle temperature, anche il pH influisce sulla concentrazione degli α -acidi in fase di stoccaggio. Come dimostrato in **Figura 3.4**, esiste una correlazione tra il trans-isocohumulone e variazioni minime di pH. L'immagine mostra la concentrazione dell' α -acido contenuto in dieci birre lager aventi valori differenti di pH iniziali. E' chiaro come la sua concentrazione diminuisca all'aumentare del pH. Analogamente nella **Figura 3.5** è riportato l'incremento del composto durante lo stoccaggio a valori diversi di pH e si nota come un ambiente più acido ne favorisca la formazione.¹²

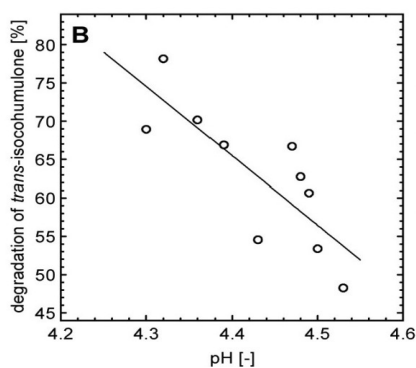


Figura 3.4 - Correlazione tra valori di pH e concentrazione di trans-isocohumulone.¹⁶

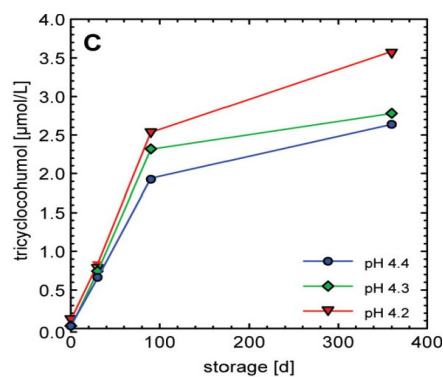


Figura 3.5 – Incremento del tricyclohumulone a differenti valori di pH a temperatura di 20°C.¹⁶

Un altro composto rilevato in molte analisi di stoccaggio a temperatura ambiente (20°C) è il sotolon (4,5-dimetil-3-idrossi-2-furanone). Il suo odore è riconducibile alle noci ed è responsabile dell'aroma nei vini da meditazione come Porto e Madeira. La soglia percettiva è di 2µg/L.

In lager, conservate a temperatura di 20°C per oltre i sei mesi, è stata riscontrata una concentrazione tra i 4 e i 40 µg/L, a dimostrazione della sua correlazione con il sentore di invecchiato e barricato nella birra.³⁵

3.6 Effetto dei processi ossidativi sulla stabilità della birra

I processi ossidativi vengono innescati da forme radicaliche dell'ossigeno che in inglese vengono comunemente chiamate ROS (Reactive Oxygen Species). Tra le forme radicaliche più reattive c'è l'anione superossido O_2^- , il quale si può formare sia per via fotochimica che biochimica. Nella birra la sua formazione avviene specialmente attraverso processi ossido-riduttivi con ioni metallici, come il Fe^{2+} oppure il Cu^+ .⁹

L'anione superossido, unendosi ad un altro elettrone e due protoni idrogeno, porta alla sintesi di un'altra forma reattiva, ossia il perossido di idrogeno H_2O_2 . Altra specie reattiva è il radicale idrossile (OH^\cdot) che si può originare sia a partire dal perossido di idrogeno che dall'anione superossido (**Figura 3.6**).

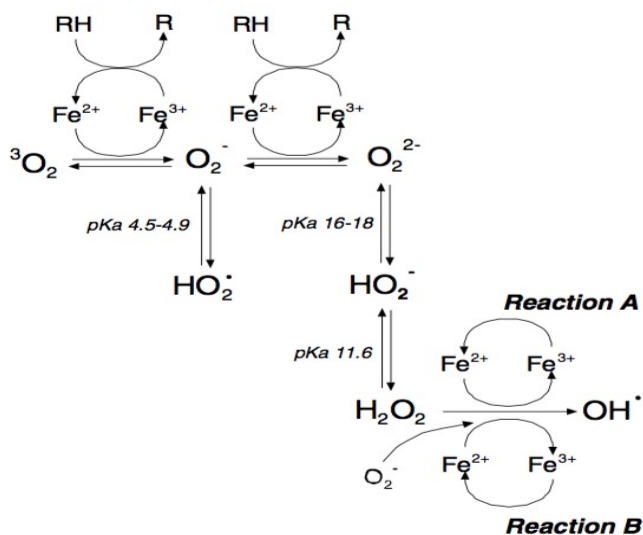


Figura 3.6 – Processi che innescano la produzione dei ROS.⁹

La concentrazione di queste tre specie, associata a componenti endogene (come il pH) ed esogene (quali elevate temperature e fonti luminose)⁹ aumenta con l'invecchiamento della birra e contemporaneamente innescano reazioni ossidative verso molti componenti della birra.

Tra i primi ad essere coinvolti ci sono l'etanolo e gli alcoli superiori. La loro ossidazione sembra essere innescata dalle melanoidine, le quali, catalizzate dalle ROS, acquistano elettroni ossidando i composti alcolici.⁴⁹

Una forma radicalica molto importante, in quanto coinvolta in molte reazioni ossidative, è l'1-idrossietile, che si genera dalla reazione tra etanolo e ione idrossile. Uno dei principali composti derivato dai suoi processi ossidativi è l'acetaldeide.⁵⁰

Altre molecole coinvolte nei processi ossidativi sono gli acidi grassi, in particolare quelli insaturi. Questi possono andare incontro a processi auto-ossidativi in cui si può generare un aumento dei doppi legami, con formazione di intermedi altamente reattivi definiti acidi perossidici. Da questi, attraverso la rottura dei doppi legami, si innescano successivamente altre reazioni che generano aldeidi, quali il furfurale, il (E)-2-nonenale ed il 2-4-decadienale. Inoltre, il (E)-2-nonenale può formarsi anche attraverso processi ossidativi indotti da lipossigenasi (LOX). Si tratta di enzimi derivati dal germe del malto, che durante la maturazione della birra innescano reazioni enzimatiche a carico degli acidi grassi insaturi e degli acidi perossidici.

A ridurre i processi ossidativi è la presenza dei polifenoli, composti a basso peso molecolare derivanti per un 70-80% dal malto e un 20-30% dai luppoli. Attraverso reazioni riducenti verso ioni metallici e forme radicaliche dell'ossigeno, questi riducono le reazioni che portano ad un aumento di sostanze degradanti nella birra.⁹

3.7 Effetto delle condizioni di trasporto sulla stabilità della birra

Tra i fattori che influenzano la stabilità vi sono anche le condizioni di trasporto. Le vibrazioni, trasmesse ai contenitori durante il trasporto, influenzano la qualità organolettica della birra. Sono state stimate differenti frequenze associate a diversi mezzi di trasporto. Un camion su strada espone le birre a vibrazioni tra i 0.1-100Hz; una nave trasferisce basse frequenze in un range di circa 5-30Hz, diversamente dagli aerei che trasferiscono al prodotto valori attorno ai 500Hz.²⁹

Un confronto tra analisi effettuate su birre lager ed ale, stivate in navi cargo per periodi simili, ha evidenziato importanti modifiche qualitative dovute alle elevate temperature e alle vibrazioni generate durante il trasporto. In entrambe i casi, le analisi sono state condotte confrontando i principali parametri all'inizio ed alla fine del trasporto, quali il colore, la torbidità, gli alfa-acidi e le aldeidi. I contenitori usati in tutte e due le casistiche sono stati bottiglie di vetro contenute in scatole di cartone.

Le lager trasportate per trentacinque giorni avevano registrato temperature di circa 7°C per più della metà del viaggio e di circa 35°C a conclusione dello stesso. Il motivo del rialzo termico non fu chiarito. Tra i parametri fu notato un aumento del colore di 0.7 EBC. Le cause furono attribuite all'ossigeno che, a seguito delle vibrazioni, si era disciolto nella bevanda innescando processi ossidativi. Il secondo parametro osservato fu la torbidità, di cui si stimò un raddoppio.²⁹ Anche in questo caso, la causa fu attribuita soprattutto alle vibrazioni, che provocando interazioni tra alcune famiglie di polifenoli - quali i flavonoidi e flavonoli (che polimerizzano in proantocianidine e frazioni proteiche ricche di prolina)⁴⁵ - favorirono l'intorbidimento della birra. Il terzo parametro misurato furono gli α -acidi, dove si stimò una loro perdita di circa il 10%. In particolare, si notò che la combinazione dei fattori temperatura e vibrazioni da trasporto, incideva maggiormente sui *trans*- α -acidi rispetto alle forme *cis*. Le cause furono attribuite ad una maggiore sensibilità ossidativa da parte degli isomeri *trans*.⁴⁶ Infine, anche le aldeidi contenute nella birra subirono delle variazioni. Le più significative coinvolsero il 2-metilpropanale, il furfurale e la fenilacetaldeide. La concentrazione totale delle aldeidi passò da circa 30 $\mu\text{g/L}$ a 160 $\mu\text{g/L}$. Infine furono effettuate analisi sensoriali con Panel Test e si valutarono vari *flavors* quali sapore, gusto e aroma e si osservò un'alterazione sensoriale. Su una scala da 0 a 10 OAS (Overaging aeging score) le lager furono valutate 4.9 OAS. Le valutazioni rilevarono sapori e aromi quali cartonato, ammuffito, stantio e persistente sapore amaro.

Le birre ale, invece, trasportate in nave dal Belgio agli USA per 26 giorni, registrarono una temperatura in stiva di circa 26°C per tutto il viaggio. I parametri analizzati furono gli stessi delle lager. Il colore vide un incremento di 1.7 EBC. La torbidità variò come nel precedente caso. Gli α -acidi, in particolare gli iso-humuloni, aumentarono del 20% rispetto alla concentrazione iniziale e le cause furono imputate alle elevate concentrazioni di ossigeno totale misurato all'inizio. Il valore di ossigeno fu di circa 220 ppb, il doppio rispetto alle lager comparate. Per quanto riguarda le aldeidi furono riscontrate le stesse variazioni osservate nelle lager. Infine furono evidenziati cambi di sapore e aromi, nello specifico aroma cartonato e perdita di sapori fruttati.

Il valore espresso nella scala OAS fu di 4.7.²⁹

Contestualmente a queste analisi, furono effettuati test in laboratorio su lager Pilsener che dimostrarono come le modificazioni organolettiche erano causate dalla sinergia tra temperatura e vibrazione da trasporto. I parametri ambientali a cui furono sottoposte le birre furono: trenta giorni a 0°C confrontati con situazioni di stoccaggio di trenta giorni a 30°C con e senza vibrazioni. In entrambe i casi le birre furono sottoposte a frequenze unidimensionali orizzontali di 1.7 Hz.²⁹ Si ritiene che il range di frequenze che maggiormente influisce sulla stabilità della birra sia compreso

tra 0.1 e 10 Hz.³⁶

I parametri qualitativi maggiormente colpiti riguardarono l'ossigeno, il colore e la torbidità, come si evince dalla **Tabella 3.1**. La situazione peggiore fu riscontrata nella sinergia tra elevate temperature e vibrazioni. L'ossigeno totale presente diminuì da circa 488 ppb a valori di 227 ppb. Ciò fece supporre che le vibrazioni potessero avere un ruolo nella captazione dell'ossigeno, soprattutto quello situato nello spazio di testa. Questo provocherebbe reazioni ossidative che innescherebbero la formazione di molecole che partecipano agli *off-flavours*. Il colore, già aumentato di 0.53 EBC a causa delle elevate temperature, arrivò a 0.73 EBC in seguito alle vibrazioni. Anche la torbidità aumentò notevolmente ed il suo valore - in presenza e assenza di vibrazioni- raddoppiò, passando da 2.7 a 5.2 EBC.

Ossigeno TPO (Ossigeno totale) HSO (spazio di testa) DO (ossigeno disciolto), colore, torbidità (haze) e aldeidi totali presenti nelle birre esposte per 30 giorni a 0°C (A) o 30° senza (B) e con (C) vibrazioni.			
	A	B	C
TPO ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	488.5 \pm 14.8 ^a	447.5 \pm 12.0 ^a	227.0 \pm 5.7 ^b
HSO ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	432.5 \pm 20.5 ^a	392.5 \pm 14.6 ^a	213.5 \pm 9.2 ^b
DO ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	51.0 \pm 0.0 ^a	55.0 \pm 2.8 ^a	13.5 \pm 3.5 ^b
Colour	7.85 \pm 0.1 ^a	8.38 \pm 0.0 ^b	8.56 \pm 0.0 ^c
Chill haze (FU)	1.2 \pm 0.1 ^a	2.7 \pm 0.1 ^b	5.2 \pm 0.0 ^c
Permanent haze (FU)	0.3 \pm 0.0 ^a	0.7 \pm 0.0 ^b	1.7 \pm 0.1 ^c
2-Methylpropanal ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	9.3 \pm 2.3 ^a	17.0 \pm 2.4 ^b	19.0 \pm 2.3 ^b
2-Methylbutanal ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	1.4 \pm 0.1 ^a	2.4 \pm 0.0 ^b	2.6 \pm 0.0 ^c
3-Methylbutanal ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	5.2 \pm 2.1 ^a	9.1 \pm 3.3 ^a	10.3 \pm 4.5 ^a
Hexanal ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	0.4 \pm 0.2 ^a	0.5 \pm 0.1 ^a	0.5 \pm 0.1 ^a
Furfural ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	35.9 \pm 8.5 ^a	101.8 \pm 11.2 ^b	123.4 \pm 13.9 ^b
Methional ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	6.3 \pm 2.9 ^a	8.1 \pm 2.5 ^a	9.0 \pm 1.7 ^a
Benzaldehyde ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	0.6 \pm 0.1 ^a	0.8 \pm 0.1 ^a	0.7 \pm 0.1 ^a
Phenylacetaldehyde ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	17.7 \pm 5.0 ^a	24.9 \pm 5.2 ^a	26.3 \pm 8.1 ^a
(E)-2-Nonenal ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	0.03 \pm 0.01 ^a	0.05 \pm 0.00 ^b	0.06 \pm 0.00 ^c
Total aldehydes ($\mu\text{g/L} \pm \text{SD}$)	76.8 \pm 6.3 ^a	164.7 \pm 9.1 ^b	191.9 \pm 10.6 ^c

Tabella 3.1 - Variazioni di ossigeno, colore, torbidità e composti aldeidici.³⁵

I composti aldeidici aumentarono di concentrazione a causa delle elevate temperature, ma risultarono poco sensibili alle vibrazioni, la cui variazione fu di circa 30 $\mu\text{g/L}$, in assenza e presenza di vibrazioni. Fu constatata una lieve diminuzione negli α -acidi e loro isomeri, imputabile alle temperature e, un decadimento più significativo dei composti in seguito alle vibrazioni.²⁹

Analisi sperimentali furono condotte simulando le vibrazioni trasmesse dagli autoveicoli da gomma durante il trasporto. Una frequenza di 50 Hz e una accelerazione 15 m/s^2 , stabiliti come valori medi trasmessi dai veicoli di trasporto, furono applicati per la simulazione. Furono simulate condizioni di trasporto riconducibili a situazioni reali, applicando temperature di 5, 30 e 45°C per 90 ore. Alle birre stoccate in ambiente statico vennero applicate prima solo le temperature e successivamente anche le vibrazioni (**Figura 3.7**). La scelta del periodo temporale fu stabilita sulla media dei tempi di percorrenza tra una città del centro Europa verso una qualsiasi altra destinazione europea.

Anche in questo caso i risultati dimostrarono che i parametri a subire maggiori modifiche furono l'ossigeno e alcuni composti aldeidici. In particolare, differenze marcate furono evidenziate in contenitori sottoposti contemporaneamente ad elevate temperature e vibrazioni. Il TPO (Ossigeno totale del packaging) subì un decremento di circa il 30%, mentre le aldeidi che mostrarono variazioni significative furono il furfurale, 2-metilpropanale ed il 2-metilbutanale.

Gli altri parametri osservati quali gli α -acidi ed il colore, a parità di condizioni, non dimostrarono variazioni significative.⁵¹

Altre analisi sperimentali, effettuate dagli stessi autori, evidenziarono la trasmissibilità delle vibrazioni assorbite dalle casse alle bottiglie. I risultati dimostrarono che i contenitori di cartone attenuano maggiormente le vibrazioni provocate dal mezzo di trasporto nel range 25-50Hz, rispetto ai contenitori in plastica che, al contrario, le amplificano.

In particolare, l'ossigeno contenuto nello spazio di testa è stato il parametro più suscettibile alle variazioni, subendo un decremento di valori da 246 ppb a 188 ppb.³⁶

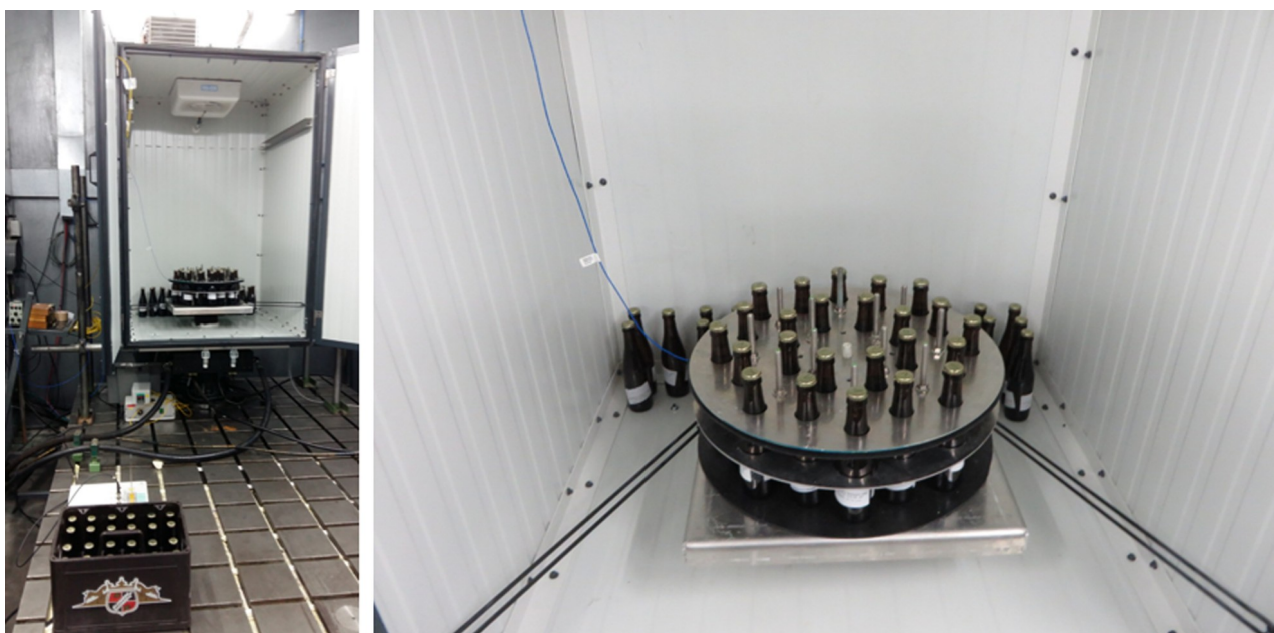


Figura 3.7 – Ambiente di simulazione impiegato per i test vibrazionali sulla birra.⁵⁸

3.8 Quale packaging scegliere

Il dilemma di molti produttori, soprattutto degli *homebrewer*, è la scelta del packaging.

L'obiettivo principale nella scelta del packaging è il mantenimento della salubrità del prodotto e, successivamente, la conservazione delle sue caratteristiche sensoriali fino al momento del consumo.

L'industria della birra usa da sempre contenitori quali bottiglia, lattina, fusti ed, in tempi recenti, anche il PET. I due grafici a torta riportano com'è cambiato il trend sulla scelta del packaging da livello europeo rispetto allo scorso decennio.

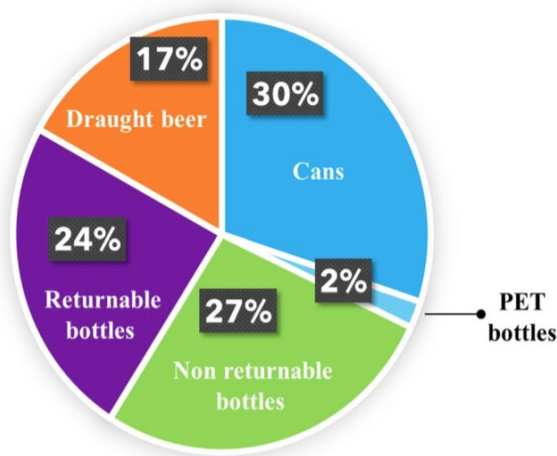
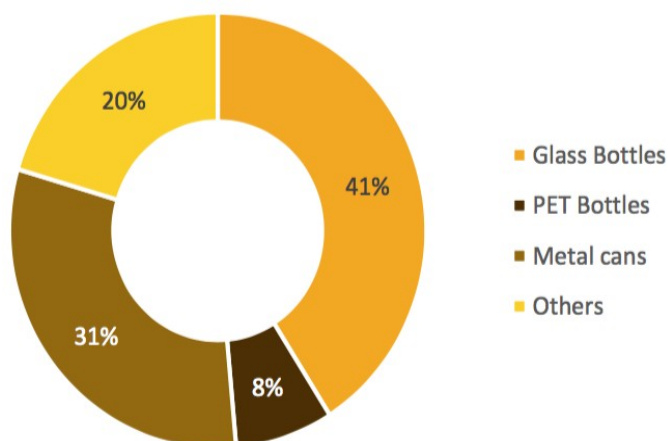


Figura 3.8 – Trend del packaging per il settore birra in Europa nel 2011 ⁴⁷

Figura 3.9 – Trend del packaging per il settore birra in Europa nel 2018 ⁴⁸



Si evidenzia un calo di circa il 10% nell'uso della bottiglia in vetro ⁵⁵ e un lieve e costante incremento nell'utilizzo della confezione in lattina (22% nel 2003), come evidenziato da precedenti dati statistici rilasciati dalla European Brewers Association. ⁴⁷ Negli ultimi anni, i contenitori in PET hanno fatto registrare un aumento passando dal 2% del periodo 2010/2011 fino all'8% verso fine decennio. ⁴⁸

3.8.1 Effetto del packaging sulla stabilità della birra

Alcuni parametri qualitativi, quali CO₂, colore, torbidità e schiuma, sono stati valutati in birre lager stoccate per un anno a 25°C nei quattro differenti packaging. ³⁹

Generalmente, il contenuto di anidride carbonica per un buon prodotto deve attenersi su valori che oscillano tra 0.4-0.5 %. ⁴⁰ La **Figura 3.10** mostra come l'andamento di CO₂ (espressa in % V/V), in fase di stoccaggio, abbia subito una graduale diminuzione nel contenitore in PET. La spiegazione del fenomeno potrebbe essere attribuita ad una permeabilità del materiale, oppure a una perdita di CO₂, a favore dell'ossigeno durante la chiusura della confezione, che invece è rimasta pressoché invariata negli altri packaging. Il dato conferma l'ottima capacità di preservare l'anidride carbonica da parte di lattina e fusti. ³⁹

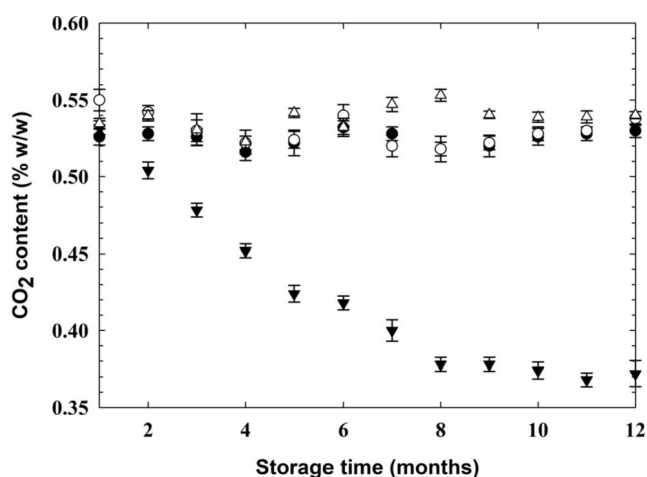


Figura 3.10 : cerchio vuoto bottiglia di vetro; cerchio nero lattina in alluminio; triangolo vuoto fusto; triangolo nero PET. ³⁹

Nelle medesime condizioni di stoccaggio, anche il colore ha dimostrato la sua suscettibilità ai differenti packaging. La **Figura 3.11** dimostra come l'utilizzo del PET abbia sfavorito le qualità del prodotto. Si evidenzia una variazione di colore che da 11.8 EBC (European Brewery Convention: si tratta di un metodo a spettrofotometria dove il campione viene fatto attraversare da una lunghezza d'onda di 430 nm) si è gradualmente incrementato nel tempo, fino a stabilizzarsi al valore di 15.5 EBC dopo dodici mesi. Anche la bottiglia (nello specifico di colore marrone) ha segnalato un aumento di circa 1.6 EBC ³⁹ nello stesso periodo di tempo.

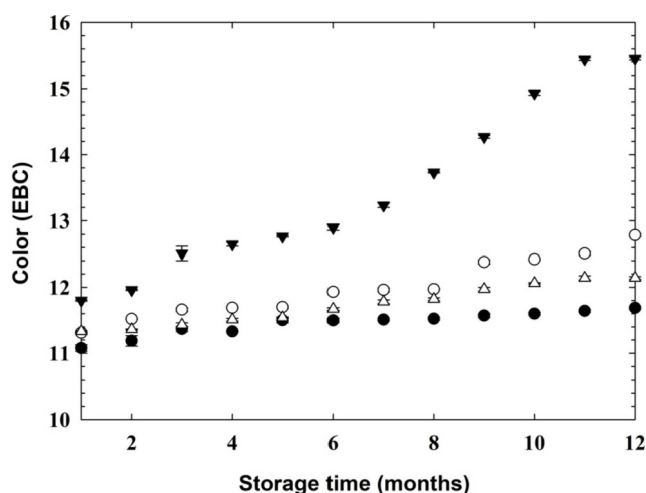


Figura 3.11: cerchio vuoto bottiglia di vetro; cerchio nero lattina in alluminio; triangolo vuoto fusto; triangolo nero PET.³⁹

I cambi di colore osservati potrebbero essere stati causati dalle melanoïdine, macromolecole prodotte durante la reazione di Maillard (che avviene nelle prime fasi di produzione della birra maltazione, ammostamento) a causa delle elevate temperature; o da reazioni ossidative scatenate dalla luce, che vedono coinvolti metaboliti, quali alcoli superiori, alfa acidi e acidi grassi; oppure da stoccaggi non idonei. Nei contenitori, quali lattina e fusti, si è notato un incremento di circa 0.5-0.7 EBC, valori che non vanno sottovalutati in termini di *off-flavours*, ma comunque accettabili.³⁹

Altro parametro analizzato è stato la torbidità. Ritenuto un importante fattore di qualità, perché genera il primo impatto visivo nel consumatore. Solitamente è prodotta da frazioni proteiche, polipeptidi e polifenoli e la sua presenza può essere permanente oppure temporanea. Fattori esogeni (quali ossigeno, esposizione alla luce, temperatura, ioni metallici e agitazione del contenitore) possono favorire l'insorgenza del fenomeno. I risultati ottenuti, espressi in unità EBC, hanno messo in luce anche in questo caso come il PET sia il contenitore dalle prestazioni peggiori. Alla fine delle analisi, si può concludere che la torbidità della birra contenuta nel PET ha riscontrato valori di circa 5/6 volte maggiori rispetto agli altri packaging.³⁹

Altro parametro oggettivo per valutare la stabilità è la schiuma, che si forma mediante legami tra la frazione proteica e le melanoïdine, che giocano un ruolo importante attraverso interazioni ioniche tra le due molecole. La sua misurazione è espressa in tempo di collasso della schiuma (in inglese FCT, foam-collapse-time). Una buona schiuma, per qualsiasi tipologia di birra, dovrebbe avere valori di circa 200 FCT. La **Figura 3.12** mostra come il contenitore di PET è quello che favorisce il decadimento della schiuma. Mentre negli altri packaging il valore aumenta di poco nel tempo, nel

contenitore in PET il livello sale fino a quasi 280 FCT.

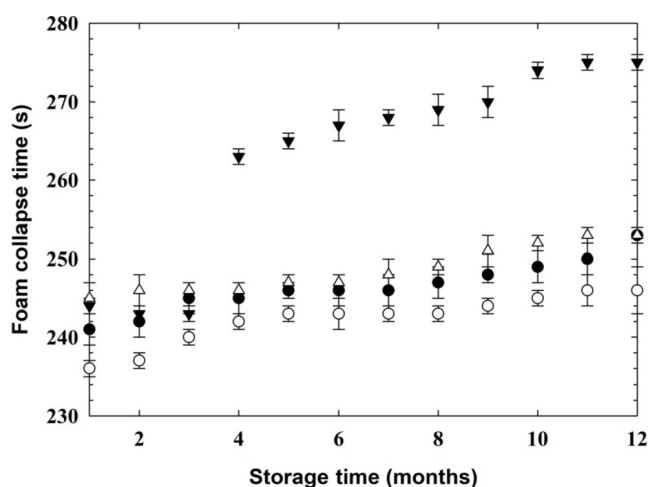


Figura 3.12: cerchio vuoto bottiglia di vetro; cerchio nero lattina in alluminio; triangolo vuoto fusto; triangolo nero PET. ³⁹

Tra le motivazioni si ipotizza un collegamento con l'incremento di melanoidine riscontrate durante il periodo di stoccaggio. Un eccesso di questi composti avrebbe influenzato la stabilità della schiuma, portandola ad un lento declino nel tempo.³⁹

3.8.2 Effetti sull'aroma

Un'altra comparazione è stata fatta con alcuni composti ricavati dal luppolo.

Il confronto è stato fatto su birre ale, di cui due stoccate in bottiglia di vetro e una in lattina. Entrambe sono state sottoposte a temperatura ambiente di 20°C per un periodo di dieci mesi e sono stati effettuati anche rilevamenti parziali dopo tre e sei mesi. I composti aromatici presi in esame sono stati cariofillene, humulene, perillene e mircene. In **Figura 3.13** si evidenzia come i vari composti siano decrementati progressivamente nel tempo. Nonostante le concentrazioni iniziali fossero differenti, i risultati dimostrarono come, con il trascorrere dei mesi, le concentrazioni dei metaboliti in lattina si mantenessero a livelli maggiori.

Il confronto effettuato al termine del periodo, evidenziò che le concentrazioni di humulene e perillene erano maggiori in lattina rispetto alla bottiglia in vetro. In quest'ultima, si osservò una quantità prossima allo zero per tutti e tre gli aromi.¹⁰

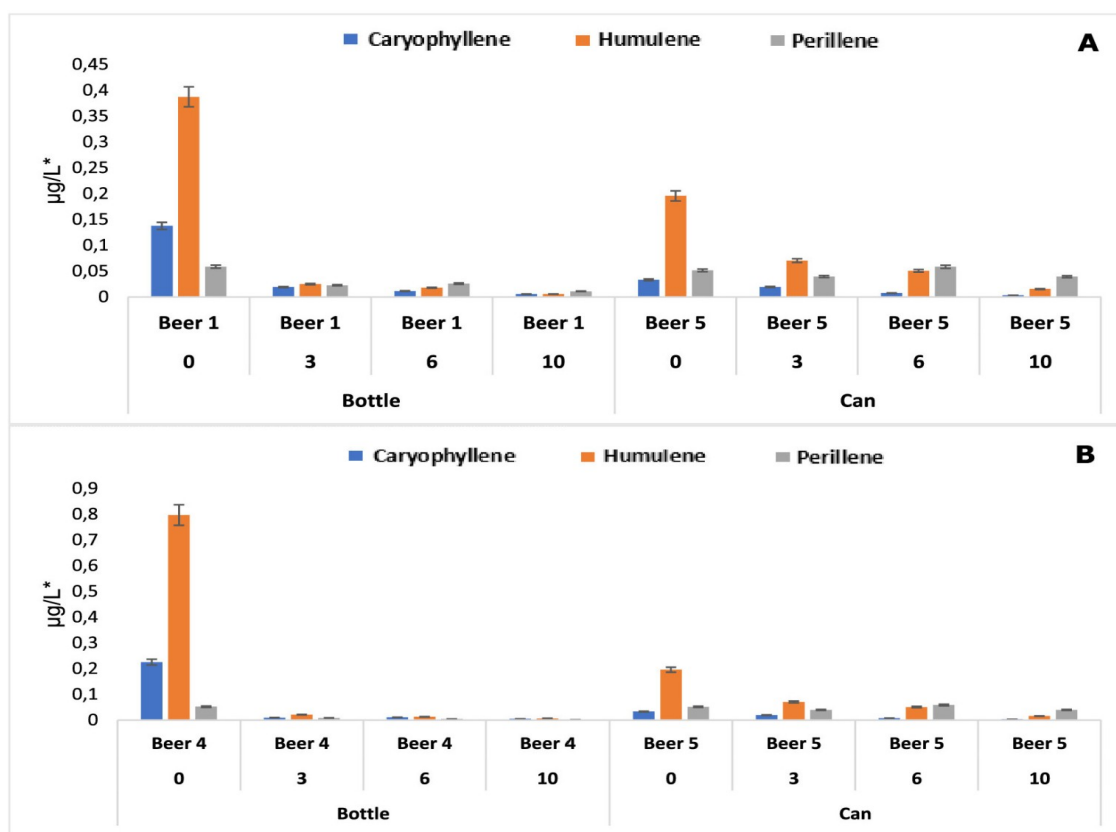


Figura 3.13 – Confronti tra bottiglia di vetro (sinistra) e lattina (destra).¹⁰

Le analisi condotte invece sul mircene (terpenoide molto rappresentativo per l'aroma delle birre) furono ancora più evidenti. In **Figura 3.14** si vede chiaramente il comportamento della molecola. Nel contenitore di latta si nota una diminuzione del composto nei primi mesi, mentre a partire dal terzo mese la sua concentrazione si stabilizza. Dopo dieci mesi, nella birra stoccata in lattina, la presenza di mircene è di circa la metà rispetto al prodotto appena confezionato. Nelle birre in bottiglie, invece, non vi è quasi più traccia.

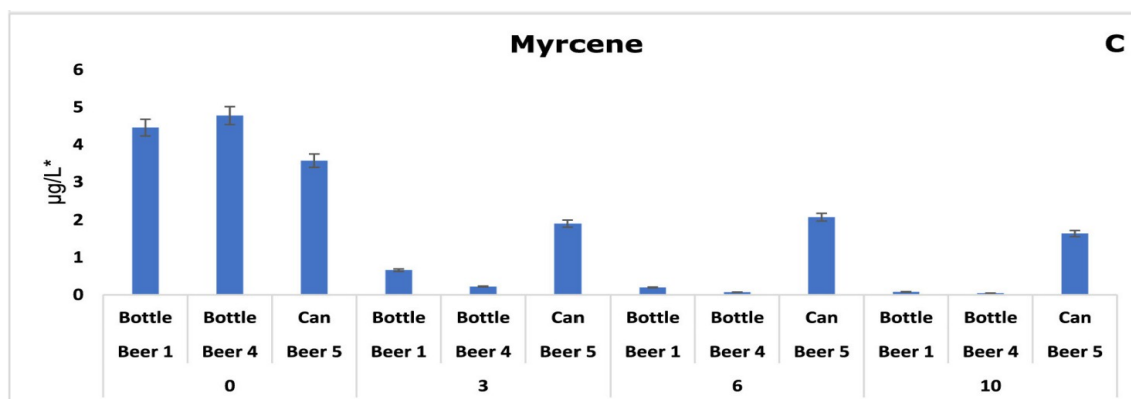


Figura 3.14 – Comportamento del mircene tra contenitore in bottiglia (Beer 1 e 4) e contenitore in lattina (Beer 5).¹⁰

3.8.3 Il ruolo della Riboflavina nei contenitori di vetro

La Riboflavina (Vitamina B2), attivata da fonti luminose, ha un ruolo chiave nella degradazione qualitativa della birra. Difatti, stimolata dalla luce attiva processi fotosintetizzanti che scatenano reazioni ossidative.⁴² Tra gli *off-flavours* prodotti, il 3-metil-butene-1-tiol (MBT) è altamente sgradevole, tanto da essere spesso definito “skunk” o “monkey” *off-flavour*. L'odore, pungente, ricorda gli escrementi di animali o il tipico odore emanato dalle puzze, percepibile dall'essere umano a livelli di 0.2-0.4 ng/L.⁴³ La sintesi del MBT è catalizzata dalla Riboflavina, coinvolgendo l'isohumulone, forme radicaliche e composti tiolici.⁴⁴

La **Figura 3.15** permette di comparare le lunghezze d'onda assorbite dalla vitamina B2 con i colori delle principali bottiglie presenti in commercio. La linea nera tratteggiata evidenzia che lo spettro di assorbimento della Riboflavina copre un range tra i 330-500 nm. Queste lunghezze d'onda danneggiano la birra e, se messe a confronto con quelle assorbite dai contenitori di diversi colori, si può notare che: l'assorbanza delle bottiglie verdi si riscontra in due picchi, uno intorno ai 370 nm ed uno a 550 nm. Le bottiglie blu hanno un ampio range di lunghezze d'onda e, quindi di assorbanza, e generano una curva a campana che va da 350 ad oltre i 500 nm. Le bottiglie marroni, invece, hanno un'assorbanza che parte dai 450 nm e copre tutta la tratta del visibile fino ai 780 nm. In quest'ultimo caso, lo spettro coincidente con le lunghezze d'onda della vitamina B2 è di circa il 5%⁴², ossia attorno ai 450 nm. Infine, la linea grigia, simboleggia una bottiglia trasparente. E' evidente come questa, assorba radiazioni luminose che coprono quasi tutto lo spettro del visibile.

Dal grafico si deduce che le bottiglie marroni siano quelle maggiormente indicate per la birra rispetto agli altri colori.

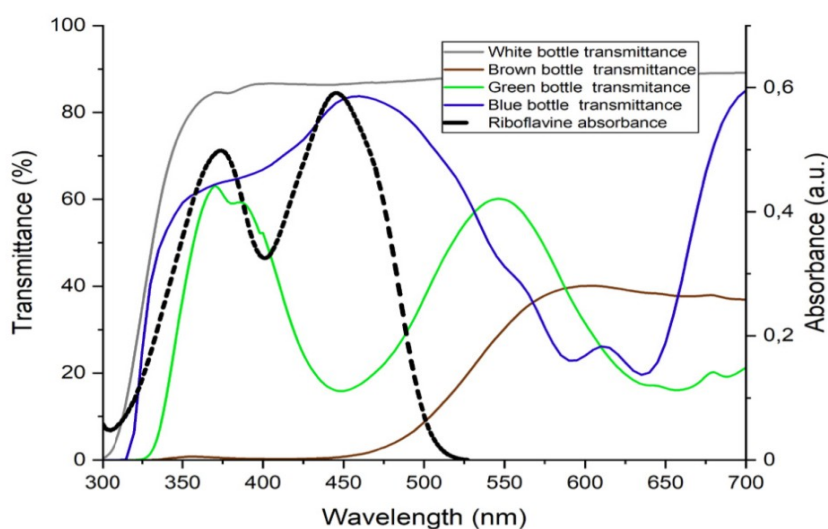


Figura 3.15 – Spettro di assorbanza della riboflavina (tratteggio nero) e delle bottiglie con diversi colori; linea blu (vetro blu), linea verde (vetro verde), linea marrone (vetro marrone).⁴⁹

3.8.4 Effetto scalping

Si tratta di un fenomeno descrivibile come la capacità di assorbimento e desorbimento dei composti aromatici causato dalla copertura in plastica contenuta nella sezione interna dei tappi a corona delle bottiglie.⁴¹ Molti composti aromatici sono per natura idrofobici e poco solubili. Questo li rende suscettibili ai processi di assorbimento e desorbimento, causati dai polimeri idrofobici che costituiscono le plastiche dei tappi. Questo aspetto, associato a differenti temperature di stoccaggio applicate a delle birre in bottiglia, provoca effetti notevolmente diversi. La **Figura 3.16 A-B** è una cromatografia effettuata su una birra ale, stoccata in bottiglia a temperature di 3°C e 20°C per dieci mesi. Si può osservare come alcuni composti aromatici, nello specifico mircene e isoamilacetato, siano suscettibili al fenomeno.¹⁰

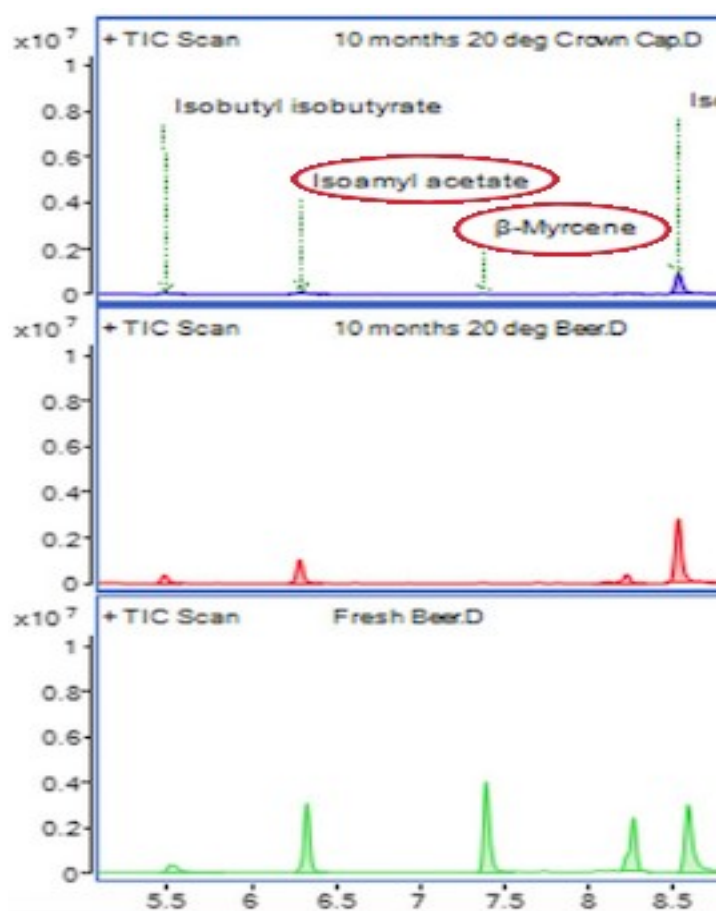


Figura 3.16 - A - Birra ale stoccata a 20°C per dieci mesi.¹⁴

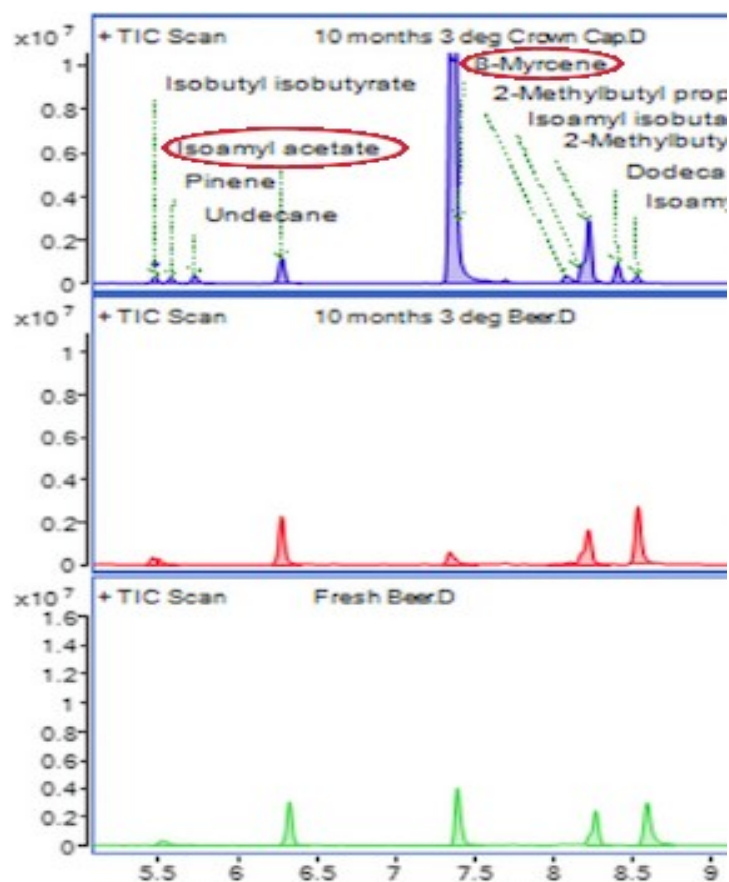


Figura 3.16 – B - Birra ale stoccata a 3°C per dieci mesi. ¹⁴

I grafici rappresentano: **Figura 3.16 – A** stoccaggio a 20°C per dieci mesi; **Figura 3.16 – B** stoccaggio a 3°C per lo stesso periodo. Entrambi i grafici (dal basso verso l'alto) descrivono: verde – birra appena imbottigliata al tempo zero; rosso – birra dopo dieci mesi di stoccaggio; blu – sostanze rilevate sulla copertura in plastica del tappo (il sottotappo).

Per quanto riguarda il mircene (la cui presenza è considerevole nel prodotto appena imbottigliato) a temperatura di 3°C ne rimane una certa quantità nella birra. Una stessa quantità è stata rilevata anche nella copertura plasticata. Mentre a temperatura di 20°C è evidente come, sia nella birra che nella copertura plasticata, non sia rilevata alcuna traccia. Questo ad ipotizzare che, a temperature elevate, il mircene sia stato completamente assorbito dai polimeri della copertura.

Il contenuto viene quindi intrappolato nello spazio che si forma tra frazione metallica e polimeri plastici del tappo. Una sorte analoga ha riguardato anche l'estere isoamilacetato. Come evidenzia il grafico, dopo dieci mesi, a temperature di refrigerazione sono visibili concentrazioni del composto, sia nella birra che nella copertura del tappo. A temperatura di 20°C, invece, la sua quantità nella birra si è ridotta di oltre il 50% e nella copertura non vi è alcuna traccia.

Questo suggerisce che ad elevate temperature molti composti aromatici evaporano condensando nel tappo. Con il trascorrere del tempo, i composti vengono assorbiti dai polimeri, penetrandovi ed intrappolandosi tra i due strati. ¹⁰

La **Figura 3.17** è utile per comprendere il fenomeno dello scalping a temperature ambiente. I rilievi che si formano, assomiglianti a piccole bolle, sono i composti aromatici intrappolati tra le due sezioni del tappo, plastica e metallo.



Figura 3.17 - *Effetto dello scalping nei tappi delle bottiglie stoccate a temperatura ambiente* ¹⁰

4. Conclusioni

Un corretto stoccaggio della birra, come di qualsiasi altro alimento, è fondamentale per trasferire al consumatore tutte le caratteristiche qualitative della bevanda. Visto il crescente mercato interno e la conseguenziale nascita di molti microbirrifici attenti alla ricerca di nuovi stili di birra per venire incontro ai gusti dei consumatori, non si può non prestare particolare attenzione anche allo stoccaggio, dal packaging a tutta la filiera di trasporto. Confrontando i dati relativi al trend sulla scelta dei packaging nel settore brassicolo con quelli di una ricerca personale rivolta a qualche centinaio di *homebrewer* italiani, si evince che una metà dei produttori mantiene la bottiglia in vetro sia per motivi estetico-commerciali che di affidabilità nel mantenimento qualitativo del prodotto; l'altra metà opta invece per una produzione anche in lattina, motivando la scelta nella facilità di stoccaggio e penetrazione del mercato d'interesse. Tra questi ultimi, inoltre, molti stentano nella scelta della lattina per gli elevati costi dei macchinari o, comunque, per la difficoltà di poter reperire lattinatrici in affitto.

Un packaging ideale da utilizzare sembra non esserci; inoltre prolungati tempi di stoccaggio dei contenitori in condizioni ambientali non idonee, quali temperature e trasporto, non permettano alla birra di essere consumata con le stesse caratteristiche sensoriali del prodotto appena confezionato. Infatti si è potuto osservare come una semplice temperatura ambiente inadeguata induca rapidi processi ossidativi, che si traducono in un deterioramento delle principali componenti aromatiche. Si dovrebbe quindi cercare di mantenere anche con la birra una catena del freddo, come si fa per altri comparti alimentari, quali ad esempio per i prodotti ortofrutticoli. Se poi alle temperature non idonee si associano la luce del sole e le vibrazioni da trasporto, i processi di deterioramento si accelerano notevolmente e, pertanto, si dovrebbero prendere in considerazione anche specifiche metodiche di trasporto. Ad esempio, studi degli ultimi anni hanno evidenziato come già la semplice sostituzione della cassa di plastica con l'imballaggio di cartone, oltre a costi inferiori, assicuri benefici qualitativi al prodotto. Un'altra possibilità potrebbe essere quella di sperimentare, anche nel settore brassicolo, i più recenti risultati riguardanti gli *oxygen packaging scavenger*. Si tratta di imballaggi costituiti da materiali in grado di ridurre i processi ossidativi innescati dalle forme reattive ROS, di inibire la crescita microbica, mantenere controllata la concentrazione di anidride carbonica ed esplicare attività antiossidanti. La strada da percorrere è ancora tanta e, in futuro, sarebbe auspicabile che il settore della birra avviasse una collaborazione tra *homebrewer*, marchi multinazionali e mondo accademico per potenziare la ricerca verso questi packaging innovativi e valutare una loro reale efficacia e possibile integrazione anche nel confezionamento della birra.

5. Bibliografia

- (1) Rani H., Bhardwaj R. D. Quality attributes for barley malt: “The backbone of beer.”
J Food Sci. (2021) ;86:3322–3340. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15858>
- (2) Stefano Buatti, *Chimica degli alimenti*, edizioni Piccin 2004. pag. 557-597
- (3) Marsh, K.; Bugusu, B. Food packaging—Roles, materials, and environmental issues. *J. Food Sci.* (2007) 72, R39–R55.
- (4) Bath Roger - *The chemistry of beer – the science in the suds*, pag.241-249 - Ph.D. 2013
ISBN 978-1-118-67497-0
- (5) www.enciclopediadellabirra.it
- (6) Lowe C.M; Elkin W.I; *Journal of the Institute of Brewing* – pp.517-528 - (1986)
<http://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2007.tb00755.x>
- (7) Fergus G.Priest; Graham G. Stewart - *Handbook of brewing* - 2006 ISBN : 0-8247-2657-X
- (8) <http://it.fillingmachinefactory.com/news/a-guide-to-counter-pressure-isobaric-filling-24370192.html>
- (9) Vanderhaegen B. *et al.* - *The chemistry of beer aging – a critical review* (2006)
- (10) Oliver Kamp *et al.* – *Changes in key hop-derived compounds and their impact on perceived dry-hop flavour in beer after storage at cold and ambient temperature* (2021) - <https://doi.org/10.1002/jib.667>
- (11) C.Shubert *et al.* - *The influence of storage condition on the chemistry and flavors of hoppy ales* – (2022); <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133616>
- (12) Intelmann D. *et al.* - *Comprehensive sensomics analysis of hop-derived bitter compounds during storage of beer* (2011)

- (13) Ana C.Pereira *et al.* - The influence of transport and storage conditions on beer stability (2022). <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02790-8>
- (14) Bamforth, C., Russell, I., & Stewart, G. (2011). *Beer: A quality perspective*. Academic Press.
- (15) Liu, C. F., Shen, Y. Y., Yin, X. S., Peng, L., & Li, Q. (2014). Influence of pasteurization and microfiltration on beer aging and anti-aging levels. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 72(4), 285–295. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-2014-0925-01>
- (16) Vaughan, A., O’Sullivan, T., & Van Sinderen, D. (2005). Enhancing the microbiological stability of malt and beer—A review. *Journal of the Institute of Brewing*, 111(4), 355–371. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2005.tb00221.x>
- (17) San-Juan, F., Cacho, J., Ferreira, V., & Escudero, A. (2012). 3-Methyl- 2-butene-1-thiol: Identification, analysis, occurrence and sensory role of an uncommon thiol in wine. *Talanta*, 99, 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.05.043>
- (18) Stewart, G. G. (2004). The chemistry of beer instability. *Journal of Chemical Education*, 81(7), 963. <https://doi.org/10.1021/ed081p963>
- (19) Van Doorn, G., Timora, J., Watson, S., Moore, C., & Spence, C. (2019). The visual appearance of beer: A review concerning visually- determined expectations and their consequences for perception. *Food Research International*, 126, 108661. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108661>
- (20) Paternoster, A., Jaskula-Goiris, B., Buyse, J., Perkisas, T., Springael, J., Braet, J., de Rouck, G., & De Cooman, L. (2019a). The relationship between flavour instability, preference and drinkability of fresh and aged beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 126, 59–66. <https://doi.org/10.1002/jib.582>

- (21) Caballero, I., Blanco, C., & Porras, M. (2012). Iso- α -acids, bitterness and loss of beer quality during storage. *Trends in Food Science and Technology*, 26, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.01.001>
- (22) Filipowska, W., Jaskula-Goiris, B., Ditrych, M., Bustillo Trueba, P., De Rouck, G., Aerts, G., Powell, C., Cook, D., & De Cooman, L. (2021). On the contribution of malt quality and the malting process to the formation of beer staling aldehydes: A review. *Journal of the Institute of Brewing*, 127(2), 107–126. <https://doi.org/10.1002/jib.644>
- (23) Trueba, P., Jaskula-Goiris, B., Ditrych, M., Filipowska, W., De Brabanter, J., De Rouck, G., Aerts, G., De Cooman, L., & De Clippeleer, J. (2021). Monitoring the evolution of free and cysteinylated aldehydes from malt to fresh and forced aged beer. *Food Research International*, 140, 110049. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110049>
- (24) Štulíková, K., Novák, J., Vlček, J., Šavel, J., Košin, P., & Dostálek, P. (2020). Bottle conditioning: Technology and mechanisms applied in refermented beers. *Beverages*, 6(3), 56. <https://doi.org/10.3390/beverages6030056>
- (25) Nobis, A., Kunz, O. S., Gastl, M., Hellwig, M., Henle, T., & Becker, T. (2021). Influence of 3-DG as a key precursor compound on aging of Lager beers. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 69(12), 3732–3740. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c08003>
- (26) Vanderhaegen, B., Delvaux, F., Daenen, L., Verachtert, H., & Delvaux, F. R. (2007). Aging characteristics of different beer types. *Food Chemistry*, 103(2), 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.062>
- (27) Li, H. P., Zhao, M. M., Cui, C., Sun, W. Z., & Zhao, H. F. (2016). Anti-oxidant activity and typical ageing compounds: Their evolutions and relationships during the storage of lager beers. *International Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2026–2033. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13173>

- (28) Malfliet, S., Van Opstaele, F., De Clippeleer, J., Syryn, E., Goiris, K., De Coornan, L., & Aerts, G. (2008). Flavour instability of pale lager beers: Determination of analytical markers in relation to sensory ageing. *Journal of the Institute of Brewing*, *114*(2), 180–192. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2008.tb00324.x>
- (29) Jaskula-Goiris, B., De Causmaecker, B., De Rouck, G., Aerts, G., Paternoster, A., Braet, J., & De Cooman, L. (2019). Influence of transport and storage conditions on beer quality and flavour stability. *Journal of the Institute of Brewing*, *125*(1), 60–68. <https://doi.org/10.1002/jib.535>
- (30) Viegas, O., Prucha, M., Gökmen, V., & Ferreira, I. M. P. L. V. O. (2018). Parameters affecting 5-hydroxymethylfurfural exposure from beer. *Food Additives & Contaminants: Part A*, *35*(8), 1464–1471. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1483584>
- (31) Cameiro, J. R., Guido, L. F., Almeida, P. J., Rodrigues, J. A., & Barros, A. A. (2006). The impact of sulphur dioxide and oxygen on the behaviour of 2-furaldehyde in beer: An industrial approach. *International Journal of Food Science and Technology*, *41*(5), 545–552. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.01104.x>
- (32) Liu, C. F., Li, Q., Niu, C. T., Zheng, F. Y., & Zhao, Y. (2018). Simultaneous determination of diethylacetal and acetaldehyde during beer fermentation and storage process. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *98*(12), 4733–4741. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9008>
- (33) Saison, D., Vanbeneden, N., De Schutter, D., Daenen, L., Mertens, T., Delvaux, F., & Delvaux, F. R. (2010). Characterisation of the flavour and the chemical composition of lager beer after ageing in varying conditions. *Brewing Science*, *63*, 41–53.

- (34) Rettberg, N., Schubert, C., Dennenlohr, J., Thorner, S., Knoke, L., & Maxminer, J. (2020). Instability of hop-derived 2-methylbutyl isobutyrate during aging of commercial pasteurized and unpasteurized ales. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 78(3), 175–184.
<https://doi.org/10.1080/03610470.2020.1738742>
- (35) Scholtes, C., Nizet, S., & Collin, S. (2015). How Sotolon can impart a madeira off-flavor to aged beers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(11), 2886–2892. <https://doi.org/10.1021/jf505953u>
- (36) Paternoster, A., Vanlanduit, S., Springael, J., & Braet, J. (2018). Measurement and analysis of vibration and shock levels for truck transport in Belgium with respect to packaged beer during transit. *Food Packaging and Shelf Life*, 15, 134–143.
<https://doi.org/10.1016/j.foodpack.2017.12.007>
- (37) Gibson, B., Aumala, V., Heiniö, R.-L., Mikkelsen, A., & Honkapää, K. (2018). Differential evolution of Strecker and non-Strecker aldehydes during aging of pale and dark beers. *Journal of Cereal Science*, 83, 130–138.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.08.009>
- (38) Wietstock, P. C., Kunz, T., & Methner, F. J. (2016). Relevance of oxygen for the formation of strecker aldehydes during beer production and storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(42), 8035–8044.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b03502>
- (39) Lorencová, E., Salek, R. N., Černošková, I., & Buňka, F. (2019). Evaluation of force-carbonated Czech-type lager beer quality during storage in relation to the applied type of packaging. *Food Control*, 106, 106706.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106706>
- (40) Šulc, R., Bojas, J., & Dančová, P. (2018, November). Beer foam decay: Effect of glass surface quality and CO₂ content. *Epj Web of conferences*, 12th international conference on experimental fluid mechanics: Vol. 2017. Mikulov, Czech Republic.

- (41) Wietstock PC, Glattfelder R, Garbe LA, Methner, F.J. 2016. Characterization of the migration of hop volatiles into different crown cork liner polymers and can coatings. *J Agric Food Chem* 64:2737–2745.
[https:// doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00031](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00031)
- (42) Gabriel P. et al; Characterization of packaging ability to protect beer from light degradation and introduction of a new Packaging Riboflavine Index
[http://doi.org 10.188 2 k 2022.68.6](http://doi.org/10.1882/k2022.68.6)
- (43) Templar, J., Arrigan, K., Simpson, W.J. (1995). Formation, measurement and significance of lightstruck flavor in beer: A review. *Brewers Digest* 70, 18–25.
- (44) Sakuma, S., Rikimaru, Y., Kobayashi, K., Kowaka, M. (1991). Sunstruck flavor formation in beer. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 49(4), 162–165. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-49-0162>
- (45) Aron, P., and Shellhammer, T. H. (2010) A discussion of polyphenols in beer physical and flavour stability, *J. Inst. Brew.* 116, 369–380.
[https:// doi.org/10.1002/j.2050-0416.2010.tb00788.x](https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2010.tb00788.x).
- (46) Intelmann, D., Demmer, O., Desmer, N., and Hofmann, T. (2009) 18O stable isotope labelling, quantitative model experiments, and molecular dynamics simulation studies on the *trans*-specific degradation of the bitter tasting *iso- α* -acids of beer, *J. Agric. Food Chem.* 57, 11014–11023.
<https://doi.org/10.1021/jf903000c>.
- (47) [https:// brewersofeurope.org/uploads/mycms-files/documents/archives/ publication\(1\).pdf](https://brewersofeurope.org/uploads/mycms-files/documents/archives/publication(1).pdf)
- (48) [https://brewersofeurope.org/uploads/mycmsfiles/documents/publications/2020/ contribution-made-by-beer-to-EU-economy-2020.pdf](https://brewersofeurope.org/uploads/mycmsfiles/documents/publications/2020/contribution-made-by-beer-to-EU-economy-2020.pdf)

- (49) Hashimoto, N. (1972). Oxidation of higher alcohols by melanoidins in beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 78, 43–51.
- (50) Andersen, M. L., & Skibsted, L. H. (1998). Electron spin resonance spin trapping identification of radicals formed during aerobic forced aging of beer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 1272–1275.
- (51) Paternoster A. et al. (2018). The interaction effect between vibrations and temperature simulating truck transport on the flavor stability beer
DOI 10.1002/jsfa.9409
- (52) <https://fkv.it/strumentazione/laboratorio/2023/02/15/intervista-mastro-birraio-produzione-della-birra/>
- (53) <https://cimecitalia.it/it/portfolio-item/riempitrici-di-lattine-in-alluminio/>
- (54) M.Ranos et al (2015). New trends in beverage packaging systems: a review.
doi:10.3390/beverages1040248