



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale
A.a. 2025/2026
Sessione di Laurea marzo/aprile 2026

La Trasformazione Digitale come driver per la qualità e la sostenibilità nel settore del Food and Beverage

Relatori:

GALETTO MAURIZIO
PIOVANO ALBERTO
VERNA ELISA
GENTA GIANFRANCO

Candidati:

ENRICO PAFUNDI

Indice

1	Introduzione	4
1.1	La twin transition nel settore del food and beverage	4
1.2	Le complessità del settore del food and beverage	6
1.3	Analisi dei gap di ricerca nella letteratura corrente.....	7
1.4	Obiettivi della ricerca e domande di ricerca	7
2	Literature review.....	8
2.1	Introduzione della literature review	8
2.2	La transizione dal paradigma 4.0 al 5.0	10
2.3	Quality 4.0	10
2.4	Trasparenza e tracciabilità di processo	12
3	Metodologia	13
3.1	Introduzione alla metodologia	13
3.2	Selezione dei documenti	13
3.3	Metodologia dell'analisi bibliometrica	17
3.4	Metodologia del topic modeling	18
3.5	Metodologia dell'analisi qualitativa	20
4	Risultati	21
4.1	Introduzione dei risultati	21
4.2	Risultati dell'analisi bibliometrica	21
4.2	Risultati del topic modeling	40
4.3	Risultati dell'analisi qualitativa	49
5	Discussioni	65
5.1	Discussione finale	65
5.1	Evoluzione dei paradigmi e trend emergenti.....	65
5.2	Meccanismi di generazione del valore	66
5.3	La natura della relazione tra qualità e sostenibilità.....	67
6.	Conclusioni	68
6.1	Considerazioni finali.....	68
6.2	Contributi scientifici e limiti della ricerca	68
6.3	Prospettive per ricerche future	68
	Bibliografia.....	70
	Appendice.....	71
	Keyword analysis	71
	Cluster topic modeling su tre periodi	72
	Ringraziamenti formali	79

1 Introduzione

1.1 La twin transition nel settore del food and beverage

La presente tesi si propone di analizzare il settore del food and beverage secondo i principi della trasformazione digitale intesa come vettore per lo sviluppo di meccanismi funzionali in grado di migliorare la qualità di prodotto o di processo e i risultati inerenti alla sostenibilità ambientale, economica e sociale. In primo luogo, verrà delineato il quadro delle principali sfide che le imprese dovranno affrontare per integrare con successo queste innovazioni nel proprio modello strategico. Il panorama globale contemporaneo impone al settore del food and beverage una metamorfosi strategica che sia in grado di affrontare le sfide future con particolare riferimento alla sicurezza alimentare, alla riduzione degli sprechi alimentari e alla continua crescita della domanda della popolazione. Il settore è chiamato dunque ad aggiornare i propri modelli abbandonando le logiche lineari del passato in favore di politiche in grado di sfruttare al massimo le risorse e di aderire a normative internazionali sempre più stringenti. Il settore del food and beverage dovrà quindi adottare direttive che siano in grado di sviluppare una doppia transizione in cui la sostenibilità ambientale, sociale ed economica e la digitalizzazione dei processi possano divenire obiettivi interdipendenti. Una delle più grandi sfide che il settore del food and beverage dovrà affrontare in futuro è il continuo aumento della popolazione e quindi l'aumento della capacità di produrre cibo e di diminuire gli sprechi per soddisfare i bisogni dei consumatori finali. All'inizio del 2026 la popolazione mondiale ha superato la soglia di 8,3 miliardi di persone nel mondo e le previsioni indicano un aumento della popolazione fino a 8,5 miliardi entro il 2030. Data questa crescita della popolazione, il settore del food and beverage dovrà essere in grado di soddisfare la domanda complessiva di cibo di cui i consumatori finali avranno necessità. Nonostante l'industria alimentare disponga oggi delle risorse e delle tecnologie per garantire il sostentamento dell'intera popolazione globale, circa l'8,2% degli individui vive ancora in una condizione definibile come fame cronica ("The State of Food Security and Nutrition in the World 2025," 2025). La fame cronica è la condizione in cui un individuo non riesce a consumare regolarmente una quantità di cibo sufficiente a fornirgli l'apporto energetico alimentare necessario per condurre una vita sana. Tale criticità può non essere imputabile a una reale scarsità di risorse bensì a una profonda inefficienza nella gestione e nella distribuzione lungo la catena di approvvigionamento. Il fallimento del sistema alimentare viene ulteriormente analizzato dal documento (Think Eat Save Tracking Progress to Halve Global Food Waste, 2024) e dai relativi aggiornamenti del 2025, i quali documentano come circa un terzo della produzione globale di cibo finisca perso o sprecato annualmente. È necessario distinguere tra la perdita di cibo che si verifica nelle fasi di raccolta e trasformazione a causa di limiti infrastrutturali o di interruzioni della catena del freddo e lo spreco alimentare che avviene, invece, nelle fasi finali della filiera come la distribuzione, la ristorazione e il consumo domestico. In quest'ultimo caso il prodotto viene scartato dopo aver già accumulato il massimo valore aggiunto dopo le lavorazioni e spesso viene sprecato perché non adeguato secondo i vigenti criteri estetici oppure per l'inefficiente gestione delle date di scadenza dei prodotti. L'impatto di tali inefficienze non è esclusivamente economico ma anche ecologico, infatti, lo spreco di 1,3 tonnellate di cibo all'anno porta ad un'emissione di gas serra pari a 3,3 tonnellate all'anno. Sotto il profilo

finanziario, il recente report (A Recommended Blueprint for Food Waste Transformation, n.d.) ha quantificato questa perdita in termini economici di circa 940 miliardi di dollari annui, suggerendo come la digitalizzazione possa rappresentare un valido sistema per la riduzione del danno mediante una strategia di prevenzione. L'integrazione delle tecnologie digitali può permettere la mitigazione delle asimmetrie informative e di coordinare i tempi operativi e logistici con il naturale decadimento biologico del prodotto. La trasformazione digitale nel settore del food and beverage deve quindi convergere verso riconfigurazione di un nuovo modello strategico che sia in grado di portare avanti il miglioramento della qualità di prodotto o di processo con i concetti di sostenibilità ambientale, economica e sociale. Questa evoluzione del modello operativo viene spesso soprannominata twin transition perché l'innovazione digitale funge da fattore abilitante per il raggiungimento di obiettivi legati allo sviluppo sostenibile. Il paradigma dell'industria 4.0 permette di superare i limiti dei sistemi tradizionali attraverso dei meccanismi, che approfondiremo più avanti nella tesi, che permetteranno lo sviluppo di modelli sostenibili. La trasformazione digitale grazie al paradigma dell'industria 4.0 ha permesso l'introduzione sul mercato di nuove tecnologie in grado di aumentare l'efficienza produttiva e la qualità di prodotto. Le nuove tecnologie hanno permesso lo sviluppo di nuovi paradigmi rivolti specialmente verso tematiche come la visibilità e la tracciabilità lungo la filiera, il controllo di qualità avanzato, lo smart manufacturing e la cybersecurity. Nel campo del controllo qualità avanzato spesso riconosciuto con il paradigma di quality 4.0 esistono diverse tecnologie come la spettroscopia e le tecniche ottiche vibrazionali, queste innovazioni superano l'inefficienza dei controlli manuali a campione spesso soggetti a errore umano abilitando un monitoraggio non distruttivo. Ogni singola unità di prodotto può essere analizzata nella sua composizione chimico-fisica senza essere alterata o distrutta. L'integrazione con algoritmi di intelligenza artificiale e deep learning permette al sistema di imparare a riconoscere anomalie impercettibili come contaminazioni o difetti morfologici garantendo un output qualitativo costante e riducendo gli scarti industriali (Hassoun et al., 2023). Nel campo invece della tracciabilità e della visibilità lungo la filiera, esistono tecnologie come la blockchain e il cloud computing. Queste tecnologie permettono di tracciare i prodotti in ogni singola fase della filiera e di rendere queste informazioni immutabili in modo tale da evitare frodi alimentari. Attraverso le tecniche di crittografia e il consenso distribuito, ogni fase della catena dalla provenienza delle materie prime fino al consumo finale viene validato e reso inalterabile riducendo le asimmetrie informative tra produttori, distributori e consumatori. Questi strumenti prevengono le frodi alimentari e i fenomeni di contraffazione facilitando anche la cooperazione tra gli attori della filiera attraverso l'automazione dei processi mediante gli smart contracts. Gli smart contracts verificano automaticamente il rispetto degli standard di qualità e di sostenibilità sbloccando pagamenti o certificazioni solo al verificarsi di determinate condizioni (Ahmadzadeh et al., 2023). Nel campo dello smart manufacturing invece esistono tecnologie come i digital twins che permettono di ottenere delle repliche virtuali dei processi produttivi. I modelli dei digital twins vengono allenati da dati provenienti da sensori di internet of things consentendo di simulare scenari logistici e di ottimizzare le linee di produzione. A differenza delle simulazioni tradizionali, i modelli di digital twins consentono anche di monitorare l'usura dei macchinari e di prevedere derive qualitative del prodotto attraverso la manutenzione predittiva e il controllo statistico avanzato riducendo preventivamente

gli sprechi di materie prime e le risorse energetiche. Per consentire la trasformazione digitale nel settore del food and beverage è necessaria oltretutto un'infrastruttura di sensori di internet of things che sia in grado di raccogliere e di trasmettere i dati in tempo reale. Questa infrastruttura garantirebbe la connettività tra macchine in modo tale che siano in grado di comunicare tra di loro e garantirebbe anche un monitoraggio costante di ogni fase della filiera permettendo agli attori che ne fanno parte di essere sempre aggiornati. L'integrazione delle tecnologie dell'industria 4.0 nel settore del food and beverage non deve quindi solo rappresentare un avanzamento tecnologico del settore ma deve essere considerata come un vettore che sia in grado di migliorare l'efficienza produttiva e la qualità di prodotto per garantire allo stesso tempo la sostenibilità ambientale, economica e sociale.

1.2 Le complessità del settore del food and beverage

Una delle sfide più difficili per il settore del food and beverage risulta essere il superamento della deperibilità biologica dei prodotti. Dal momento in cui la materia prima accede alla prima fase della catena di approvvigionamento, si innesca un decadimento qualitativo, nutrizionale e microbiologico che impone una pianificazione meticolosa per evitare di perdere tempo e di ridurre la shelf-life dei prodotti. Ogni giorno in più nelle fasi di stoccaggio o nelle fasi di produzione o logistica determina una perdita irreversibile di valore commerciale del prodotto finale. Una riduzione della shelf-life dei prodotti indebolisce la forza contrattuale del produttore nei confronti della grande distribuzione organizzata e incrementa sensibilmente il rischio di deperibilità dei prodotti. A questa criticità intrinseca dei prodotti si affianca la rigidità degli standard di sicurezza alimentare regolata da quadri normativi stringenti come i protocolli HACCP e il regolamento CE 178/2002. Il regolamento CE 178/2002 definisce la cornice giuridica della sicurezza alimentare europea introducendo l'obbligo della rintracciabilità e il principio di analisi del rischio lungo tutta l'intera filiera. A questo regolamento si affianca il protocollo HACCP, un sistema di autocontrollo preventivo che impone agli operatori di identificare e monitorare i punti critici di ogni processo produttivo. Questi strumenti trasformano la gestione della sicurezza da un controllo ispettivo sul prodotto finito a una sistematica prevenzione dei rischi biologici, chimici e fisici. In questo scenario emergono grandi difficoltà per garantire la sicurezza alimentare, in assenza di sensori capaci di monitorare in tempo reale lo stato di salute dei singoli lotti. Spesso minime deviazioni dai parametri standard come un'oscillazione termica durante il trasporto, inducono l'azienda a preferire lo scarto preventivo dell'intero lotto piuttosto che incorrere nel rischio di richiamare il lotto dal mercato. Lo spreco industriale diventa quindi una conseguenza diretta della ricerca della massima sicurezza in contesti di incertezza informativa. Ulteriori complessità derivano dall'eterogeneità e anche dalle variabilità stagionali e chimiche dei prodotti. Inoltre, esistono anche problemi di carattere estetico della grande distribuzione organizzata che impone alti standard di perfezione visiva per facilitare l'esposizione e la vendita dei prodotti alimentari. Questi problemi costringono le industrie a scartare gli output nutrizionalmente integri ma morfologicamente imperfetti alimentando il fenomeno dello spreco alimentare. Un altro problema molto importante che riguarda la filiera alimentare è la frammentazione geografica e la molteplicità di attori coinvolti che determinano asimmetrie informative. La mancanza di una visione globale genera il cosiddetto effetto bullwhip per cui piccole oscillazioni nella domanda finale si amplificano risalendo lungo la filiera e spingendo

i produttori a mantenere elevati stock di sicurezza per far fronte alla possibile domanda crescente. In un settore caratterizzato da prodotti a rapida scadenza, questi elevati stock di sicurezza si trasformano spesso in rifiuti successivamente invendibili. Questo rimane uno dei più grandi problemi della filiera alimentare. Inoltre, l'asimmetria informativa riguardante la catena del freddo ovvero l'assenza di una storia termica certificata, obbliga gli attori a valle a scartare lotti nel caso in cui dovessero avere un dubbio sull'interruzione termica. A questo complesso quadro operativo si aggiungono inoltre barriere strutturali che rallentano la transizione digitale del settore. La frammentazione della filiera composta da una moltitudine di piccoli produttori agricoli crea un significativo problema riguardante la mancanza di competenze digitali. Questo problema spesso blocca gli investimenti tecnologici nel settore del food and beverage. Sotto il profilo economico, i margini di profitto ridotti del settore rendono il management particolarmente avverso al rischio frenando gli investimenti tecnologici in nuove infrastrutture che permetterebbero di aumentare l'efficienza operativa e la qualità di prodotto. Per concludere, la globalizzazione delle filiere ha aperto a nuovi rischi riguardanti la sicurezza dei dati, infatti, una manomissione dei dati può comportare per le aziende un danno finanziario ma può anche rappresentare un problema per la sicurezza dei consumatori. Risulta pertanto indispensabile l'implementazione di una nuova infrastruttura digitale che sia in grado di risolvere tutte queste problematiche.

1.3 Analisi dei gap di ricerca nella letteratura corrente

Nonostante la crescente attenzione accademica rivolta ai temi della digitalizzazione e della sostenibilità, l'analisi della letteratura scientifica corrente rivela alcune lacune fondamentali. In primo luogo, emerge una marcata frammentazione tra l'adozione tecnologica e i reali meccanismi di generazione del valore. La maggior parte degli studi esistenti si focalizza sulle prestazioni isolate dei singoli strumenti senza tuttavia indagare i processi attraverso i quali tali innovazioni si traducono in benefici tangibili. La letteratura attuale non risalta di conseguenza il collegamento tra l'implementazione tecnologica e il risultato operativo e non risalta neanche il collegamento tra il miglioramento della qualità di prodotto o processo con gli obiettivi di sostenibilità sociale, economica e ambientale. Quindi di conseguenza la letteratura tende a trattare la gestione della qualità e gli obiettivi inerenti alla sostenibilità come due ambiti d'indagine separati. Il gap di ricerca lascia irrisolto il quesito riguardante la relazione tra la qualità e la sostenibilità e quindi se il miglioramento della qualità conduca intrinsecamente a una maggiore sostenibilità in termini di sinergia o se, al contrario, l'aumento dei parametri qualitativi possa innescare un allontanamento dagli obiettivi di sostenibilità andando a configurare un trade-off. Questa mancanza non limita solo il dibattito accademico ma rende difficile anche per i manager aziendali prevedere l'impatto reale delle tecnologie sulla catena del valore. La presente ricerca si pone dunque l'obiettivo di colmare tale lacuna proponendo un'analisi sull'integrazione della dimensione tecnologica con le dimensioni della qualità e della sostenibilità consentendo un'unica visione d'insieme.

1.4 Obiettivi della ricerca e domande di ricerca

Sulla base delle lacune identificate nell'analisi della letteratura corrente, la presente ricerca si pone l'obiettivo di indagare il ruolo della trasformazione digitale come vettore per la creazione di valore all'interno del settore del food and beverage. Nello specifico, l'indagine intende esplorare le modalità attraverso cui l'adozione delle

tecnologie abilitanti possa migliorare gli standard qualitativi e gli output riguardanti la sostenibilità ambientale, sociale ed economica. L'intento finale è la costruzione di un quadro conoscitivo che permetta di comprendere non solo quali siano le tecnologie più importanti nel settore ma soprattutto come esse agiscano concretamente lungo l'intera catena del valore. Per circoscrivere il perimetro dell'indagine lo studio si articola attorno a tre quesiti di ricerca fondamentali:

- RQ1: Quali sono le principali linee di ricerca, tendenze e tecnologie nella letteratura?
- RQ2: Attraverso quali meccanismi le tecnologie generano valore sostenibile e qualità?
- RQ3: Qual è la natura della relazione tra qualità e sostenibilità (sinergia, trade-off, neutralità)?

Il primo quesito riguarda l'analisi dello stato dell'arte e dei trend tecnologici, mirando a mappare le principali linee di ricerca e le tendenze emergenti identificate dalla comunità scientifica internazionale. In seconda istanza, la ricerca affronta il tema dei meccanismi di generazione del valore. Si intende analizzare attraverso quali specifici meccanismi d'azione le tecnologie digitali producano benefici in termini di sostenibilità e qualità. Infine, lo studio affronta la natura della relazione che intercorre tra il perseguimento dell'eccellenza qualitativa e quello della sostenibilità. Questo quesito mira ad indagare se l'investimento tecnologico consenta di migliorare gli output di qualità o di sostenibilità favorendo l'emergere di sinergie, trade-off o neutralità.

2 Literature review

2.1 Introduzione della literature review

Il presente capitolo si propone di esaminare in maniera critica lo stato dell'arte riguardante l'interazione tra la trasformazione digitale e i paradigmi di gestione della qualità e sostenibilità nel settore del food and beverage. La letteratura accademica ha iniziato a esplorare come le tecnologie possano non solo incrementare l'efficienza produttiva o la qualità del prodotto ma anche agire come vettori a supporto della sostenibilità ambientale, economica e sociale. L'indagine si articola seguendo un percorso logico che parte dalla definizione dei pilastri teorici per approdare all'analisi dei principali cluster tecnologici. Verranno inizialmente delineati i concetti di quality management e di sostenibilità tracciando la loro evoluzione verso i modelli emergenti di quality 4.0 e di green quality. Questa base concettuale è propedeutica all'identificazione dei principali meccanismi sviluppati dalle tecnologie. L'obiettivo finale di questa ricognizione della letteratura non è puramente descrittivo ma ha l'obiettivo di identificare le carenze nella letteratura attuale giustificando così la necessità di un approccio integrato che metta in relazione diretta tecnologie, meccanismi e output di sostenibilità e qualità. Per comprendere come si sia giunti a questa esigenza di integrazione digitale nel settore del food and beverage è necessario ripercorrere i paradigmi tradizionali che caratterizzano la qualità e la sostenibilità. Il concetto di total quality management ha rappresentato il primo grande paradigma inerente alla qualità ed è costituito da tre concetti fondamentali come la focalizzazione verso le esigenze del cliente, il miglioramento continuo di ogni fase del processo e il coinvolgimento totale da parte di tutti gli attori. L'implementazione del total quality management nelle aziende alimentari crea un legame diretto tra il soddisfacimento delle esigenze del cliente

finale e il miglioramento delle performance competitive. La letteratura scientifica ha inoltre approfondito le tematiche inerenti alle metodologie come la lean production, il six sigma e la zero defect manufacturing. L'applicazione della filosofia della lean production ha come obiettivo la sistematica eliminazione delle attività che non generano valore e quindi, nel settore del food and beverage, la lotta contro lo spreco di cibo, la riduzione degli sprechi alimentari derivanti da sovrapproduzione e l'ottimizzazione dei tempi di attraversamento della filiera per migliorare la shelf life del prodotto. Come evidenziato dallo studio di (Dora et al., 2013), sebbene la metodologia della lean production offra benefici in termini di efficienza operativa, la sua implementazione deve fare i conti con l'incertezza dei tempi di fornitura e di vendita e con la stagionalità dei prodotti. La metodologia six sigma interviene sulla riduzione della variabilità dei processi produttivi soprattutto quando si gestiscono ingredienti biologici le cui proprietà chimico-fisiche possono variare sensibilmente da un lotto all'altro. Questa attenzione alla variabilità evolve oggi verso il paradigma dello zero defect manufacturing dove l'obiettivo non è più solo il controllo statistico ma l'eliminazione totale dei difetti attraverso sistemi di monitoraggio preventivo riducendo gli scarti di prodotto. Un contributo fondamentale per comprendere la complessità della materia è offerto dal modello teorico proposto da (Luning & Marcelis, 2006), i quali hanno introdotto il concetto di food quality management functions. Questi autori sostengono che la qualità alimentare non possa essere gestita isolando la componente tecnologica da quella manageriale e che il successo dipenda dalla capacità dell'azienda di far interagire le conoscenze sulla degradazione degli alimenti con l'intervento della manodopera. Questa relazione tra tecnologia e intervento umano evidenzia come l'errore umano o i parametri biologici rappresentino i principali punti di debolezza dei sistemi tradizionali. Questa teoria sposta l'attenzione verso la necessità di una maggiore visibilità dei dati lungo tutta la catena del valore. La gestione della qualità non viene più vista come una funzione interna all'azienda ma come un processo che richiede una condivisione costante di informazioni tra fornitori, produttori e distributori ponendo le basi per il passaggio verso sistemi di gestione intelligenti e interconnessi. Parallelamente all'evoluzione della gestione della qualità, il concetto di sostenibilità ha assunto un ruolo centrale nel dibattito accademico e industriale evolvendosi da un concetto puramente ambientale a un modello di gestione strategica multidimensionale orientato verso aspetti sociali, ambientali ed economici. Nel settore del food and beverage le imprese devono affrontare sfide riguardanti la sicurezza alimentare e la gestione di risorse naturali scarse. Oggi il passaggio da un'economia lineare a un'economia circolare è necessario. L'economia circolare nel settore del food and beverage ha l'obiettivo di chiudere i cicli delle risorse riducendo al minimo l'impiego di nuove materie prime e riducendo la produzione degli scarti non recuperabili. La letteratura evidenzia come le perdite e gli sprechi alimentari siano una delle principali cause dell'inefficienza del sistema attuale. (Jurgilevich et al., 2016) hanno affermato come la circolarità del sistema alimentare non riguardi solo il riciclo dei prodotti alimentari o la valorizzazione dei sottoprodotti ma richiede un ripensamento della progettazione dei prodotti finali e delle catene di fornitura al fine di massimizzare l'efficienza delle risorse in ogni fase. Sebbene la sostenibilità venga percepita come un onere finanziario, la ricerca evidenzia come l'adozione di tecnologie permetta di superare questo trade-off. Queste tecnologie agiscono come vettori per l'innovazione green, trasformando i costi operativi in investimenti strategici che permettono di migliorare sia le performance ambientali sia la

competitività sul mercato(Yadav et al., 2024). Gli studi più recenti evidenziano una crescente interdipendenza tra la capacità di un'impresa di essere sostenibile e la sua capacità di gestire i flussi informativi riguardanti sia il processo sia il prodotto. Un'organizzazione può diventare sostenibile attraverso la capacità di monitorare e analizzare i dati in tempo reale. Le imprese devono puntare a paradigmi come la green quality e la quality 4.0 dove l'eccellenza del prodotto e la sostenibilità ambientale cessano di essere obiettivi distinti per fondersi in un unico modello di valore guidato dalla tecnologia.

2.2 La transizione dal paradigma 4.0 al 5.0

Nel quadro delineato da (Ghobakhloo et al., 2022), la trasformazione digitale non viene interpretata come una semplice innovazione tecnologica ma come la capacità delle organizzazioni nel riconfigurare le proprie risorse. L'autore sottolinea come il passaggio all'industria 5.0 segni il superamento di una visione puramente orientata alla produttività a favore di un approccio orientato verso il conseguimento di valore aggiunto per l'uomo. Il paradigma dell'industria 4.0 si sofferma sui vantaggi delle principali infrastrutture tecnologiche come l'internet of things, il cloud computing e i big data mentre il paradigma dell'industria 5.0 si sofferma molto di più sulla finalità etica e umano centrica. L'autore tratta della trasformazione digitale argomentando come l'infrastruttura tecnologica possa influenzare il settore del food and beverage attraverso quattro meccanismi fondamentali. Il primo meccanismo riguarda la trasparenza dei flussi energetici e dei materiali evidenziando come la sensoristica avanzata permetta di mappare le perdite idriche, termiche e lo stato delle materie prime. Il secondo meccanismo citato dall'autore riguarda la sincronizzazione tra domanda e offerta mirando a ridurre la sovrapproduzione ed inoltre l'integrazione di sistemi cyber-fisici in modo da permettere alle imprese di allineare i ritmi di produzione ai consumi reali andando a ridurre l'utilizzo di risorse primarie e la generazione di scarti. Il terzo meccanismo che identifica l'autore è l'adozione di politiche circolari, nel settore del food and beverage, e cioè la capacità di monitorare la qualità residua di un prodotto che permette di decidere se un lotto debba essere destinato al consumo umano, alla trasformazione industriale o alla produzione di bioenergia massimizzando il valore da ogni singolo prodotto. Il quarto e ultimo meccanismo evidenziato dall'autore è la resilienza e la centralità dell'uomo ponendo l'accento sulla simbiosi uomo-macchina.

2.3 Quality 4.0

L'evoluzione delle architetture industriali ha dato origine al concetto di quality 4.0, definito dalla letteratura accademica come l'applicazione delle tecnologie digitali e dell'analisi dei dati per migliorare l'eccellenza operativa e la conformità dei prodotti. Secondo(Ahmadzadeh et al., 2023), il concetto di quality 4.0 è stato definito come la digitalizzazione della gestione della qualità. La qualità tradizionale si concentra sull'analisi dei processi mentre l'evoluzione al paradigma quality 4.0 integra il processo industriale con le tecnologie. La qualità nel settore alimentare non viene garantita attraverso una semplice digitalizzazione dei vecchi protocolli cartacei ma costituisce una trasformazione radicale in cui la qualità cessa di essere una fase isolata per diventare una caratteristica intrinseca di tutto il processo produttivo. La gestione della qualità, nel settore del food and beverage in passato si è basata su analisi di laboratorio condotte su campioni statistici. Tale approccio presenta limiti strutturali significativi. Il sistema della quality 4.0 prevede un monitoraggio continuo lungo la linea di

produzione con l'utilizzo di sistemi di sensoristica avanzata e di algoritmi di intelligenza artificiale i quali permettono di analizzare e di tenere sotto controllo la produzione in tempo reale. I sistemi di ispezione automatizzata basati su tecnologie come la computer vision e il deep learning garantiscono alti standard di valutazione eliminando sempre di più lo spreco alimentare. La connettività dei sensori di internet of things permette di inviare alert immediati e di intervenire autonomamente ricalibrando i macchinari se una variabile di processo mostra una deviazione rispetto ai parametri ottimali. In un contesto come il settore del food and beverage il campionamento statistico può non essere rappresentativo dell'intero lotto. Il paradigma della quality 4.0 attraverso l'analisi totale della produzione, garantisce una sicurezza alimentare superiore e una conformità totale agli standard HACCP e alle normative vigenti riducendo i possibili costi derivanti dai richiami di prodotto e dagli scarti preventivi (Ahmadzadeh et al., 2023). Come evidenziato dalla letteratura analizzata, non si tratta solo di rilevare difetti ma di comprendere le correlazioni tra le variabili di processo e la qualità finale del prodotto trasformando il controllo di qualità in uno strumento di miglioramento continuo e di riduzione proattiva dello spreco alimentare lungo l'intera filiera. Uno dei pilastri tecnologici più avanzati è costituito dall'applicazione della machine vision avanzata che segna il passaggio dall'ispezione ottica di base all'analisi cognitiva del prodotto. A differenza dei sistemi di visione tradizionali limitati a controlli bidimensionali come la presenza di un'etichetta o il livello di riempimento, la soluzione moderna della machine vision sfrutta algoritmi di deep learning e reti neurali convoluzionali. Il sistema è in grado di distinguere tra un difetto critico che compromette la sicurezza e un difetto estetico naturale, permettendo di recuperare una quota significativa di output che con i controlli tradizionali o manuali verrebbe erroneamente scartata andando ad aumentare lo spreco di cibo. Un'altra tecnologia molto importante è la spettroscopia iperspettrale in grado di valutare la sicurezza e la qualità alimentare. Rispetto alle tecnologie tradizionali come la visione artificiale classica che analizzava solo lo spettro visibile, la spettroscopia iperspettrale cattura le informazioni in un ampio intervallo dello spettro elettromagnetico. Gli studi condotti da (Ahmadzadeh et al., 2023) dimostrano come l'integrazione dei sensori ottici avanzati consenta di mappare la distribuzione chimica degli elementi interni ad ogni singola unità di prodotto in transito sulla linea senza andare ad alterare la struttura fisica. Questa capacità di analisi non distruttiva permette di monitorare parametri critici come, ad esempio, la concentrazione di umidità che è fondamentale per prevedere la stabilità microbiologica del prodotto e la shelf-life nonché il contenuto di solidi solubili e di grassi e il grado di maturazione interna. In un sistema industriale di quality 4.0, i dati spettroscopici non servono solo a scartare il prodotto non conforme, ma vengono utilizzati come input per ricalibrare i parametri di processo in tempo reale. La ricalibrazione dei parametri di processo consente di prevenire la generazione di scarti trasformando la linea di produzione in un organismo capace di autocorreggersi in base alle variabili biologiche della materia prima. Un altro pilastro della trasformazione digitale nel settore food and beverage è rappresentato dall'intelligenza artificiale e dalle tecniche di analisi predittiva. Uno dei contributi più significativi dell'intelligenza artificiale lungo la filiera è la capacità di ridurre l'effetto bullwhip. Come evidenziato da (Duong et al., 2020) le piccole fluttuazioni della domanda dei consumatori tendono ad amplificarsi risalendo la filiera e portano inevitabilmente i produttori ad accantonare stock di sicurezza eccessivi che, in un settore caratterizzato da prodotti deperibili, si trasformano

inevitabilmente in rifiuti. La letteratura recente analizza come gli algoritmi di machine learning permettano una previsione della domanda molto accurata riuscendo ad integrare variabili diverse tra di loro come dati storici di vendita, tendenze stagionali, previsioni meteorologiche e analisi delle tendenze espresse dai consumatori sui social media. Un perfetto allineamento tra produzione e domanda riduce la sovrapproduzione andando a limitare l'impronta carbonica e la gestione degli invenduti (Ahmadzadeh et al., 2023). La letteratura più recente ha studiato anche l'integrazione tra intelligenza artificiale e i digital twins. Secondo (Ahmadzadeh et al., 2023), l'intelligenza artificiale applicata ai digital twins permette di implementare la manutenzione predittiva. Il guasto improvviso di un impianto di refrigerazione non comporta solo un fermo macchina ma spesso comporta anche la perdita del lotto in lavorazione a causa della rottura della catena del freddo o del mancato rispetto dei tempi di trattamento termico. Gli algoritmi di intelligenza artificiale identificano i segnali deboli di un possibile guasto permettendo interventi di riparazione tempestiva prima che il fermo si verifichi garantendo l'integrità del prodotto e ottimizzando l'uso delle risorse energetiche. In conclusione, la letteratura evidenzia una tendenza verso sistemi di gestione della qualità semi-autonomi o autonomi i quali consentono di apportare le correzioni necessarie sui parametri del processo industriale. Queste infrastrutture tecnologiche riducono l'errore umano e garantiscono una conformità costante degli standard di sicurezza rendendo la trasformazione digitale il vero motore della sostenibilità nel moderno scenario competitivo del settore del food and beverage.

2.4 Trasparenza e tracciabilità di processo

La tecnologia della blockchain costituisce il pilastro immutabile dell'intera infrastruttura tecnologica garantendo l'integrità e la veridicità delle informazioni scambiate tra attori spesso eterogenei e geograficamente distanti. Il concetto di tracciabilità si è evoluto nel tempo in quanto, inizialmente, si basava sulla conoscenza dell'origine geografica di un prodotto ma successivamente è stato esteso in modo da garantire l'informazione lungo tutta la filiera. Come evidenziato da (Guandalini, 2022), la blockchain agisce come un registro elettronico in grado di rendere immutabile e completa l'informazione. In un sistema tradizionale, i dati sulla temperatura raccolti dai sensori di internet of things potrebbero essere soggetti ad essere alterati per nascondere interruzioni della catena del freddo mentre l'integrazione della blockchain con l'internet of things assicura che i dati raccolti non possano più essere modificati o eliminati senza che il sistema ne tenga traccia. Questa storia termica registrata permette di accettare o rifiutare un lotto con la certezza della sua qualità biologica andando a ridurre il rischio di immettere sul mercato prodotti deteriorati che causerebbero sprechi e rischi per la salute pubblica. Oltre ai sistemi di blockchain e di internet of things, esistono gli smart contracts che possono essere integrati nell'infrastruttura tecnologica. Come evidenzia lo studio di (Kamilaris et al., 2019), gli smart contracts sono dei protocolli informatici che eseguono automaticamente clausole contrattuali al verificarsi di determinate condizioni oggettive. Gli smart contracts possono essere programmati, ad esempio, per sbloccare pagamenti automatici. Quindi, per fare un esempio, il fornitore può ricevere il pagamento istantaneo solo se i sensori di internet of things confermano che il prodotto ha viaggiato entro i range di temperatura e umidità stabiliti. Inoltre, gli smart contracts possono validare le certificazioni. Il sistema può, quindi, consentire di emettere o di sospendere automaticamente una certificazione di qualità basandosi su dati precisi di processo. Questo

livello di automazione consente di migliorare l'efficienza operativa e di ridurre i costi di transazione rendendo la filiera più snella e resiliente, riducendo peraltro anche le dispute legali tra fornitore e cliente. Oltre all'automazione dei pagamenti e delle certificazioni, esiste anche il tema legato alla tutela del marchio specialmente per i prodotti ad alto valore aggiunto come quelli a denominazione protetta. La frode alimentare rappresenta una minaccia globale che causa perdite economiche e danni all'immagine e alla reputazione delle aziende. Creando un digital twin del lotto di produzione che viaggia parallelamente al prodotto fisico è possibile prevenire l'adulterazione o la sostituzione del prodotto con varianti di minor pregio. La letteratura evidenzia come la trasparenza permetta di tracciare i comportamenti degli operatori lungo la filiera rendendo ogni attore consapevole delle azioni da lui commesse e prevenendo possibili alterazioni o contraffazione di prodotti.

3 Metodologia

3.1 Introduzione alla metodologia

Al fine di investigare il ruolo della trasformazione digitale lungo la filiera nel settore del food and beverage e i vantaggi che porta per quanto riguarda la qualità di processo e di prodotto e la sostenibilità ambientale, economica e sociale, il presente studio adotta un disegno di ricerca basato sulla revisione sistematica della letteratura. In una prima fase è stata condotta un'analisi bibliometrica descrittiva volta a mappare il panorama scientifico globale e a delineare l'evoluzione delle tendenze principali. Per gestire l'elevata dimensionalità del dataset da analizzare, la ricerca ha integrato una tecnica avanzata di natural language processing, nello specifico è stato utilizzato l'algoritmo di topic modeling di bertopic che ha permesso di identificare gli argomenti principali e di raggruppare i documenti in cluster semantici. Dopo aver raggruppato i documenti in cluster semantici, è stata implementata una procedura di sampling per la selezione dei documenti, per ogni topic emerso sono stati selezionati i tre documenti con la più alta probabilità di appartenenza al cluster, l'articolo con il maggior numero di citazioni del cluster e due ulteriori articoli individuati in base alla significatività tematica, all'anno di pubblicazione e al numero di citazioni. Dopo aver selezionato i vari documenti con la fase di sampling, è stata condotta un'analisi qualitativa. Dall'analisi qualitativa sono state analizzate le tecnologie emergenti e la loro collocazione all'interno della catena del valore. Successivamente attraverso un diagramma di sankey, ogni tecnologia è stata collegata a un meccanismo e ogni meccanismo successivamente è stato collegato a una specifica relazione, tra la qualità di prodotto o processo e la sostenibilità sociale, economica, ambientale, nello specifico di sinergia, tradeoff o neutralità. Nei seguenti paragrafi verrà argomentata in maniera specifica ogni singola fase sopra descritta.

3.2 Selezione dei documenti

Per la strategia di reperimento dei documenti è stata utilizzata la banca dati di Scopus. La scelta di tale banca dati è motivata dalla sua vasta copertura bibliografica che risulta essere superiore ad altre banche dati di ricerca accademiche. La ricerca è stata circoscritta ai documenti pubblicati tra il 2010 e maggio 2025, un arco temporale caratterizzato da una crescita esponenziale dell'interesse accademico verso la trasformazione

digitale nel settore del food and beverage. Per garantire la comparabilità internazionale dei risultati sono stati inclusi esclusivamente articoli originali e revisioni della letteratura redatti in lingua inglese. La query di ricerca in tabella 1 è stata strutturata in cinque blocchi logici combinati mediante operatori booleani come dettagliato nella tabella seguente:

Context:

*“Digital transformation” OR “digitalisation” OR “digitization” OR “industry 4.0” OR “industry 5.0”
OR “smart manufactur*”*

AND

Field:

“food” OR “beverage” OR “food industry” OR “agrifood” OR “agro-food” OR “food system”*

AND

Value chain:

“manufactur” OR “process*” OR “value chain” OR “supply chain*” OR “production”*

AND

Topic:

“sustain” OR “circular economy” OR “esg” OR “triple bottom line” OR “quality” OR “food quality” OR “product quality” OR “food safety” OR “traceab*”*

AND NOT

Stopwords:

“crop” OR “harvest*” OR “farm*” OR “e-commerce” OR “marketing” OR “retail”*

Table 1. Query di ricerca per la banca dati di scopus

La definizione della query di ricerca all'interno della banca dati Scopus è stata strutturata attraverso un approccio modulare volto a intersecare i diversi domini tematici oggetto dello studio. La composizione della query si articola in quattro sezioni tematiche principali ciascuna volta a descrivere un aspetto specifico dell'indagine. La prima parte definisce il contesto tecnologico, focalizzandosi su parole chiave rappresentative dell'innovazione digitale quali la trasformazione digitale, la digitalizzazione e i paradigmi legati all'Industria 4.0 e 5.0. Questo modulo è stato successivamente integrato con una seconda sezione dedicata al settore del food and beverage con un'attenzione particolare all'ambito agrifood in virtù della sua rilevanza scientifica. La terza parte della query è stata invece dedicata all'individuazione delle fasi della catena del valore di interesse per la ricerca, in questa fase l'analisi è stata concentrata esclusivamente sui segmenti del manufacturing, della

produzione e della supply chain. Tale scelta metodologica ha comportato l'esclusione deliberata dei termini legati alle fasi iniziali e finali della filiera poiché non ritenuti strettamente pertinenti rispetto al focus specifico del lavoro. Infine, l'ultima sezione della stringa di ricerca riguarda gli obiettivi e i fattori abilitanti, includendo termini relativi alla sostenibilità nelle sue dimensioni sociale, economica e ambientale con anche parole chiave inerenti alla qualità, alla sicurezza alimentare e alla tracciabilità del prodotto. L'interconnessione di questi blocchi tematici mediante operatori booleani ha permesso di ottenere un dataset di partenza coerente con gli obiettivi della ricerca. In seguito all'estrazione dei dati dalla banca dati Scopus è stato applicato il protocollo PRISMA per la selezione rigorosa dei documenti da sottoporre ad analisi bibliometrica e topic modeling. Il processo di selezione si è articolato in tre stadi sequenziali. Il primo stadio ha riguardato l'identificazione dei contributi ottenuta mediante l'esecuzione della query precedentemente definita e una successiva attività di screening tecnico. Il dataset è stato ripulito attraverso l'eliminazione di eventuali duplicati e la rimozione di documenti non coerenti con i parametri bibliografici prestabiliti. Nella seconda fase i documenti sono stati esaminati per verificarne l'effettiva aderenza al contesto e alle specifiche fasi della catena del valore analizzate. Tale valutazione è stata condotta attraverso un processo di filtraggio progressivo che ha previsto l'analisi dei titoli e degli abstract e una verifica approfondita dei temi trattati. La selezione si è conclusa con la determinazione del numero finale di articoli e revisioni che costituiscono il campione di analisi. La struttura dettagliata di questa selezione è rappresentata graficamente nel diagramma PRISMA riportato nella figura 1.

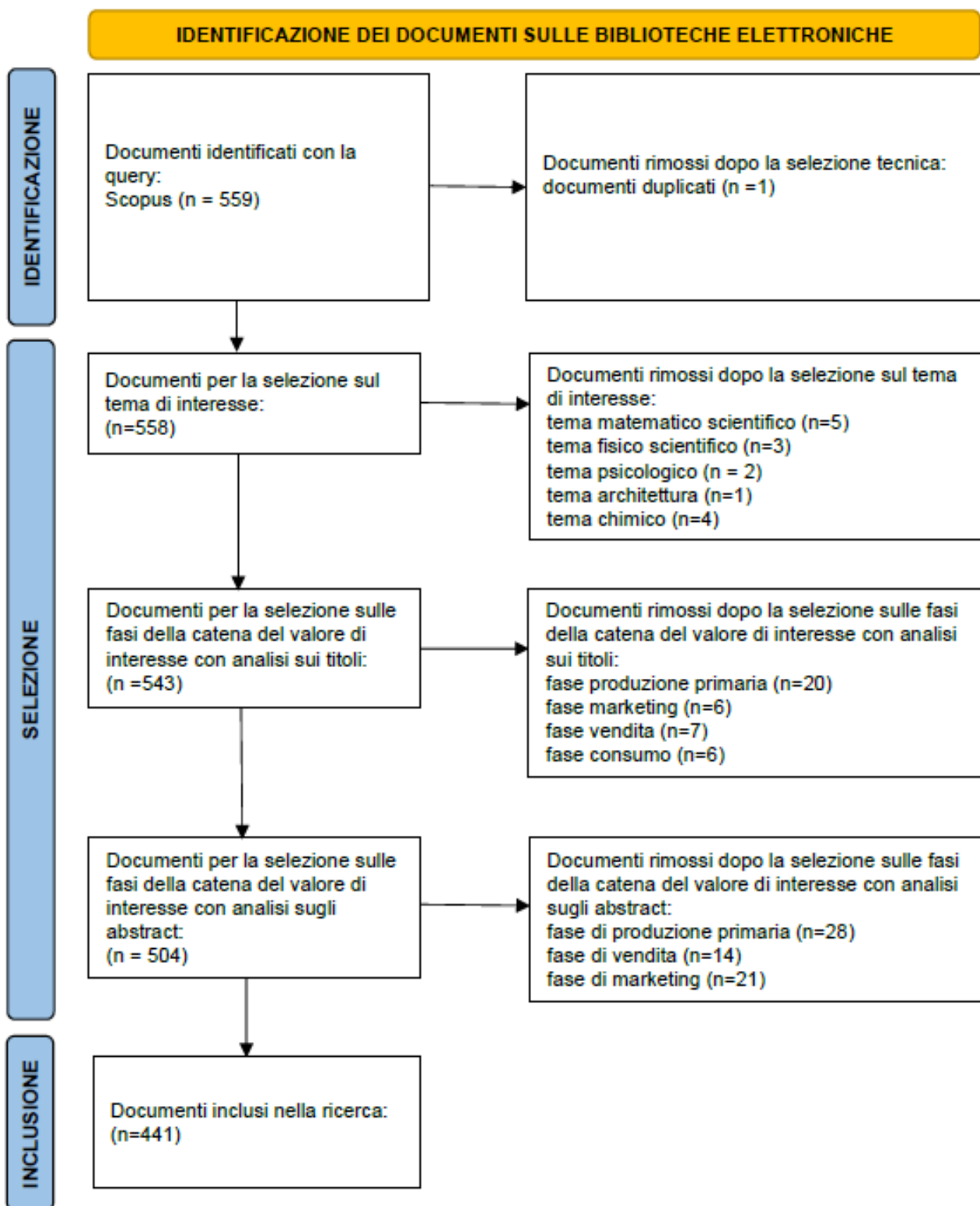


Figura 1. Metodo PRISMA per lo screening dei documenti

3.3 Metodologia dell'analisi bibliometrica

L'analisi bibliometrica rappresenta un approccio metodologico quantitativo volto a esplorare ed analizzare la letteratura accademica per decifrare le dinamiche di diffusione della conoscenza all'interno di un determinato campo d'indagine. L'analisi bibliometrica permette di ottenere una visione macroscopica del panorama scientifico, rendendo oggettivi e misurabili i trend di crescita, l'impatto degli autori e le reti di collaborazione internazionale. La visualizzazione grafica permette di analizzare la produzione accademica, le collaborazioni tra autori, paesi e istituzioni, l'impatto che hanno le diverse collaborazioni e anche l'evoluzione delle tendenze tematiche. La prima fase dell'analisi bibliografica si concentra sull'importanza del contesto, andando ad analizzare l'andamento annuale delle pubblicazioni dove viene mostrata la variazione dei documenti pubblicati nel corso degli anni. L'integrazione della curva cumulativa delle pubblicazioni permette di visualizzare il tasso di crescita complessivo del campo di studio. Il grafico delle pubblicazioni annuali è stato realizzato attraverso un codice python in jupyter notebook. Allo stesso tempo l'analisi del numero di citazioni annuali e la loro curva cumulativa offre una misura dell'influenza esercitata dalla letteratura nel corso degli anni. Il grafico delle citazioni annuali è stato realizzato attraverso un codice python in jupyter notebook. La fase successiva dell'analisi bibliometrica si concentra più sull'individuazione degli attori che portano avanti la ricerca nel settore del food and beverage come editori, riviste, paesi, autori e istituzioni. Inizialmente vengono riportati i principali editori di interesse che hanno avuto il maggiore impatto e vengono classificati in base a un rapporto tra il numero di citazioni ottenuto e il numero di pubblicazioni. Il grafico degli editori è stato realizzato attraverso un codice python con jupyter notebook. Successivamente vengono riportate le riviste più importanti e anche le riviste vengono classificate a seconda di un indicatore formato dal rapporto tra il numero di citazioni e il numero di pubblicazioni. Il grafico delle riviste più importanti è stato realizzato attraverso un codice python con jupyter notebook. Proseguendo con l'analisi bibliometrica, vengono riportati i paesi più influenti con il numero di pubblicazioni, il numero di citazioni e l'impatto che essi hanno attraverso il rapporto tra il numero di citazioni e il numero di pubblicazioni. Questo confronto permette di distinguere i paesi che producono grandi volumi di pubblicazioni e quelli che pur con un numero inferiore di articoli esercitano un impatto superiore a livello di citazioni. Per comprendere anche le relazioni che i paesi hanno tra di loro e quindi illustrare il network di collaborazione internazionale, viene mappato il grafico delle relazioni di co-authorship tra paesi. Questo grafico è stato realizzato in vosviewer con la selezione di paesi con almeno 15 documenti. Questo grafico permette di rappresentare i principali paesi che portano avanti la ricerca nel settore del food and beverage e i legami di cooperazione tra i diversi paesi del mondo. Dopo aver individuato i principali paesi, l'analisi bibliometrica identifica anche i principali autori operanti nel settore della ricerca nel food and beverage che vengono classificati in base al numero di pubblicazioni e al numero di citazioni dei loro lavori. Inoltre, nell'analisi bibliometrica viene anche riportato il grafico delle relazioni tra autori che permette di osservare la formazione di scuole di pensiero ed evidenzia anche i legami tra i ricercatori più influenti. Il grafico delle relazioni tra autori è stato realizzato in vosviewer con autori con almeno 4 pubblicazioni. A livello organizzativo viene riportata una tabella contenente i 10 istituti con il maggior numero di pubblicazioni e a fianco il numero di citazioni totale per identificare chi ha il maggiore impatto a livello accademico e quali sono

gli istituti di ricerca di eccellenza che guidano l'innovazione nel settore del food and beverage. Dopo aver individuato i più importanti attori che riguardano la ricerca nel settore del food and beverage, l'analisi bibliometrica si concentra sull'analisi delle keyword per individuare le parole che caratterizzano questo settore ed individuare anche le loro relazioni tra di loro con la formazione di cluster di macro-argomenti. La keyword analysis è stata realizzata in vosviewer con parole con 4 occorrenze ed è stata preferita a keyword analysis con 5 e 6 occorrenze riportate in appendice. Oltre alla keyword analysis viene fatta un'analisi temporale delle parole più importanti, lo studio di tendenze cumulative permette di osservare la progressione dei termini nel tempo offrendo la possibilità di valutare la maturità di un concetto all'interno della ricerca accademica. Il grafico è stato realizzato attraverso un codice python in jupyter notebook. Per evidenziare la tendenza temporale delle keywords e per catturare i segnali di cambiamento repentini è stata applicata la burst detection basata sull'algoritmo di Kleinberg. Questa tecnica statistica modella l'apparizione delle parole chiave come un processo stocastico utilizzando un automa a stati finiti per identificare i cosiddetti burst. L'algoritmo opera identificando i momenti in cui la frequenza di un termine supera significativamente il tasso di base atteso, segnalando una transizione da uno stato di bassa attività a uno di alta attività. Oltre all'identificazione temporale, l'algoritmo assegna a ogni burst un valore di intensità che permette di distinguere tra semplici oscillazioni statistiche e veri e propri mutamenti. L'impiego della metodologia di Kleinberg fornisce una base scientifica per individuare le tematiche di frontiera e prevedere le future traiettorie della letteratura scientifica. I grafici della burst detection sono stati realizzati in codice python attraverso jupyter notebook.

3.4 Metodologia del topic modeling

L'algoritmo bertopic rappresenta una delle tecniche più moderne nella modellazione dei topic, è necessario evidenziare quanto sia differenziale rispetto ai modelli probabilistici come la latent dirichlet allocation. I modelli tradizionali come la latent dirichlet allocation si basano sull'approccio bag of words riducendo il testo a una frequenza di statistiche lessicali, invece l'algoritmo di bertopic sfrutta le architetture di transformer per fare un'analisi semantica del testo. Il vero punto di forza dell'algoritmo risiede nella capacità di generare embedding testuali, permettendo di mappare i documenti non solo sulla base della presenza di determinati vocaboli ma anche sulla base del senso specifico che essi acquisiscono all'interno della struttura sintattica. L'embedding testuale trasforma il testo in dati numerici, mantenendo la relazione logica dei concetti espressi dall'autore in relazione all'intero contesto della frase. Bertopic permette quindi di raggruppare i documenti sulla base di una reale affinità di significato piuttosto che sulla semplice co-occorrenza di termini. Un'altra differenza rispetto all'algoritmo latent dirichlet allocation è la caratterizzazione dei topic la quale avviene tramite la metrica c-TF-IDF. Questa metrica a differenza della distribuzione di probabilità della latent dirichlet allocation isola i termini che rendono un cluster semanticamente unico rispetto all'intero corpus garantendo una maggiore interpretabilità e una coerenza tematica superiore. L'architettura dell'algoritmo di bertopic si configura come una struttura modulare composta da diverse fasi sequenziali che permettono di trasformare un corpus di testi non strutturati in una gerarchia di topic coerenti. Ogni singola fase può essere personalizzata con le più recenti innovazioni nel campo del machine learning senza dover ricostruire l'intero sistema. Questo permette alla struttura generale di non essere legata a una singola fase ma di essere strutturata in blocchi che

con il passare del tempo si aggiornano in modelli migliori andando a migliorare i risultati dell'algoritmo. La prima fase dell'algoritmo di bertopic riguarda la generazione di embeddings ovvero il processo di trasformazione dei documenti testuali in rappresentazioni numeriche vettoriali. In questa prima fase il linguaggio umano dei testi viene tradotto in un formato comprensibile per la macchina dove ogni documento diventa un punto all'interno di uno spazio multidimensionale. L'obiettivo fondamentale di questa fase non è solo la digitalizzazione del testo dei documenti ma la cattura della sua similarità semantica permettendo ai documenti che trattano argomenti simili di essere mappati in posizioni vicine tra loro anche se utilizzano parole diverse per esprimere lo stesso concetto. Ci sono diversi modelli di embeddings, esistono i modelli di embedding di sentence transformers che permettono di comprendere il significato di intere frasi, esistono modelli più agili e veloci come Model2Vec o FastEmbed ideali per dataset di grandi dimensioni. È inoltre possibile integrare modelli provenienti da framework consolidati come spacy, gensim o hugging face oppure affidarsi a interfacce esterne fornite da provider cloud come openAI o cohere per sfruttare modelli linguistici di grandi dimensioni. Nel contesto di questa tesi è stato utilizzato il modello BAAI General Embedding capace di garantire una densità informativa superiore rispetto ai modelli standard. I vettori generati presentano spesso centinaia di dimensioni, per ovviare a questo problema la seconda fase del modello prevede la riduzione della dimensionalità tramite l'algoritmo UMAP. Questa tecnica è fondamentale poiché è in grado di comprimere lo spazio vettoriale preservando le relazioni topologiche originali. UMAP riduce le dimensioni dei dati assicurando che i documenti semanticamente simili rimangano vicini tra loro anche nello spazio ridotto facilitando così la successiva individuazione dei pattern. Una volta semplificato lo spazio dei dati, interviene la fase di clustering attraverso il modulo di HDBSCAN. Questo algoritmo basato sulla densità identifica i raggruppamenti naturali di documenti senza che sia necessario specificare preventivamente il numero di topic desiderati a differenza di quanto avviene nei modelli come la latent dirichlet allocation o K-Means. La forza di HDBSCAN risiede nella sua capacità di riconoscere cluster di forme irregolari e nella gestione del rumore. L'algoritmo è infatti in grado di isolare i documenti che non mostrano una chiara appartenenza tematica evitando che questi inquinino la purezza dei topic individuati. L'ultima fase della pipeline di bertopic rappresenta il momento in cui i dati puramente numerici e geometrici vengono tradotti in concetti comprensibili e interpretabili. Questo passaggio è affidato al modulo dei vectorizer. Questo modulo è fondamentale per definire l'identità di ciascun tema, la qualità delle etichette e delle parole chiave estratte. Dopo aver raggruppato i documenti, bertopic deve tradurre questi cluster numerici in concetti comprensibili all'essere umano attraverso la tokenizzazione e l'applicazione della metrica c-TF-IDF. In questa fase, tutti i documenti appartenenti a un medesimo cluster vengono trattati come un unico macro documento. c-TF-IDF permette quindi di estrarre le parole chiave che sono più frequenti all'interno di quel cluster ma allo stesso tempo più rare nel resto del corpus. Questo processo differenziale garantisce che le etichette assegnate ai topic non siano termini generici permettendo di catturare l'essenza specifica. In conclusione, l'algoritmo prevede una fase di ottimizzazione e rappresentazione dei topic. In questo stadio, è possibile affinare i risultati attraverso tecniche di maximal marginal relevance per ridurre la ridondanza delle parole chiave oppure procedere a una riduzione gerarchica dei topic qualora il numero di categorie emerse risulti eccessivo. Il risultato finale è una struttura

tematica dove ogni topic è definito da una distribuzione di termini pesati che riflettono fedelmente il contenuto originale. Durante questa fase si è deciso di studiare un modello di bertopic scelto in base a metriche come la topic diversity, la semantic coherence, il coherence index e la topic stability. E' stato scelto di studiare il modello con le migliori metriche e le migliori rappresentazioni dei topic. Di questo modello sono state studiati diversi topic e sono stati etichettati con dei nomi per migliorare la leggibilità. Inoltre sono stati analizzati grafici con il word scores barchart, la similarity matrix, il dendrogramma dei topic e la mappa tra i topics e il grafico topic over time che ha permesso di studiare l'andamento dei topic nel tempo. Tutti i grafici e il codice di bertopic sono stati realizzati in codice python attraverso jupyter notebook. Oltre all'analisi del primo modello di bertopic, è stato deciso di portare avanti un'analisi temporale basata sull'analisi di 3 periodi diversi del dataset. I periodi riguardano gli archi temporali dal 2010 al 2020, dal 2021 al 2022 e dal 2023 al 2025. Questa analisi ha permesso il confronto tra i diversi contenuti del modello di bertopic.

3.5 Metodologia dell'analisi qualitativa

L'analisi qualitativa di questa tesi si concentra sull'elaborazione finale dei risultati del modello di bertopic. Inizialmente si è proceduto al campionamento di 54 articoli. Gli articoli sono stati selezionati attraverso un campionamento strutturato a ciascuno dei cluster individuati dall'algoritmo. Per ogni cluster sono stati scelti i primi tre documenti con la più elevata probabilità di appartenenza al nucleo tematico garantendo così una base analitica perfettamente allineata ai risultati. A questo primo gruppo di documenti è stato integrato il documento avente il maggior numero di citazioni, con l'obiettivo di includere nel corpus le teorie che hanno maggiormente influenzato il dibattito accademico all'interno di ogni specifica area di indagine. Il campione è stato completato con l'inclusione di ulteriori due documenti per ogni cluster scelti in base alla data di pubblicazione più recente, alla significatività del documento e al numero di citazioni ottenuto. Questo campionamento ha permesso di consolidare un corpus di 54 documenti che rappresenta fedelmente la struttura dei topic emersi. Questo campione di documenti ha costituito la base fondante per l'analisi qualitativa. Il primo grafico dell'analisi qualitativa rappresenta la classificazione delle principali tecnologie maggiormente citate nei documenti permettendo di classificare le tecnologie in un ordine di importanza. Il grafico delle tecnologie è stato realizzato attraverso un codice python in jupyter notebook. Successivamente è stato utile mappare l'intervento di queste tecnologie all'interno della catena del valore illustrando in maniera approfondita dove le diverse tecnologie intervengono maggiormente. La heatmap tra tecnologie e fasi della catena del valore è stata realizzata attraverso un codice python in jupyter notebook. Gli ultimi grafici sono dei sankey diagrams e permettono di mettere in relazione i diversi cluster tecnologici con i macromeccanismi e successivamente le varie categorie della relazione tra qualità e sostenibilità. Questi grafici sono stati realizzati in codice python con jupyter notebook. La descrizione e la spiegazione di questi grafici verrà trattata successivamente nella parte dei risultati permettendo la comprensione profonda del contesto.

4 Risultati

4.1 Introduzione dei risultati

Il presente capitolo è dedicato alla discussione dei risultati ottenuti attraverso l'applicazione della metodologia descritta nel capitolo precedente. L'analisi è stata strutturata secondo un percorso logico che inizia con una prima parte quantitativa fino a un'indagine qualitativa delle fonti ricavate dall'algoritmo di bertopic. La sezione dedicata all'analisi bibliometrica delinea il panorama attuale della letteratura identificando le tendenze di pubblicazione e citazione, gli editori e le riviste più importanti, la distribuzione geografica, gli autori chiave, la distribuzione accademica e una fase finale con l'analisi delle principali keyword con le loro relazioni e i loro sviluppi temporali. Nella seconda parte dei risultati si passerà all'analisi dei contenuti del modello bertopic dove verranno identificati i principali cluster emersi e verranno analizzate le loro relazioni e i loro andamenti nel tempo. Per comprendere l'evoluzione temporale delle tematiche principali nel settore del food and beverage, si è ulteriormente deciso di analizzare il dataset su tre periodi diversi per analizzare i contenuti di ogni periodo temporale. L'ultima parte del capitolo si focalizzerà sull'analisi qualitativa. Qui l'attenzione si sposterà sulle tecnologie, sul loro funzionamento all'interno della catena del valore e in fine verranno analizzate le relazioni tra le tecnologie, i meccanismi e gli impatti diretti in termini di sostenibilità e qualità.

4.2 Risultati dell'analisi bibliometrica

Il punto di partenza di questa analisi è una mappatura bibliometrica della letteratura esistente la cui evoluzione storica è sintetizzata nel grafico sottostante. La figura 2 illustra la distribuzione delle pubblicazioni su base annuale all'interno dell'arco temporale tra l'anno 2010 e l'anno 2025 fino al mese di maggio. L'analisi del dataset ha evidenziato come la produzione documentale abbia preso slancio a partire dal 2014, evidenziando

come nel quadriennio 2010-2014 non ci siano state molte pubblicazioni inerenti al nostro ambito di ricerca. Dall'analisi del grafico è possibile individuare due periodi principali. Il primo periodo compreso tra il 2014 e il 2019 è caratterizzato da una crescita graduale ma contenuta dell'interesse scientifico con un maggiore incremento della produzione a partire dall'anno 2018. Il secondo periodo compreso tra il 2020 e il 2025 è

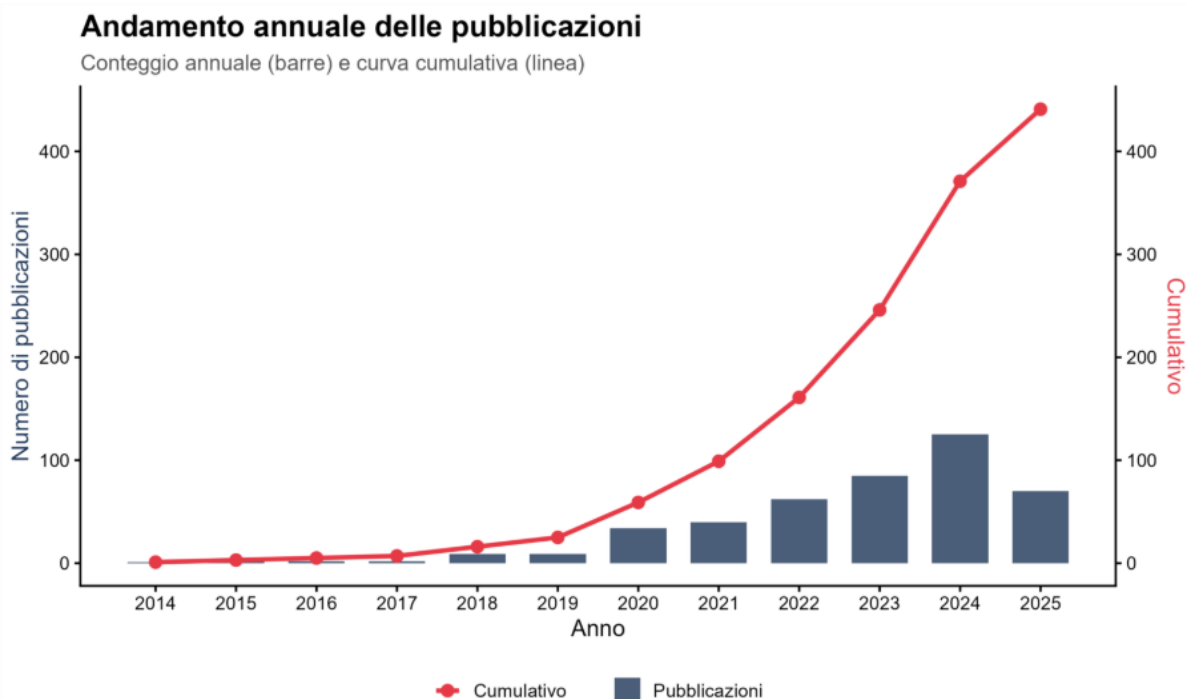


Figura 2. Andamento temporale delle pubblicazioni nel periodo 2010-2025

invece contraddistinto da un marcato aumento dell'attenzione verso il tema del food and beverage, come si può notare le pubblicazioni seguono un andamento esponenziale. L'anno 2025 rappresenta un'eccezione rispetto a tale tendenza in quanto i dati considerati si riferiscono esclusivamente al periodo fino a maggio 2025. Nel grafico viene riportata la curva cumulativa che mostra una pendenza progressivamente crescente indicando un aumento costante e rilevante dell'interesse scientifico. Nel complesso il grafico evidenzia la crescente importanza della ricerca sulla trasformazione digitale nel settore del food and beverage. Dopo aver analizzato l'importanza del tema trattato, viene analizzato l'impatto che la ricerca ha avuto a livello accademico. La figura 3 analizza l'andamento delle citazioni annuali.



Figura 3. Andamento temporale delle citazioni nel periodo 2010-2025

Come si può osservare nel primo quinquennio di osservazione si rileva una fase preliminare della ricerca sul tema della trasformazione digitale nel settore del food and beverage, in questa fase iniziale il numero di citazioni annuo si mantiene su valori contenuti andando a costituire il periodo di transizione necessario affinché il tema venga progressivamente integrato nel dibattito accademico globale. A partire dal 2019 si osserva un forte incremento del tasso annuo di citazioni con il raggiungimento del valore massimo nel 2021. Negli anni successivi il numero di citazioni annue risulta leggermente inferiore rispetto al 2021 probabilmente a causa di eventi quali la pandemia di covid 19 che può aver orientato la ricerca verso altri filoni sempre riconducibili alla digitalizzazione nel settore del food and beverage ma ancora non maturi per ottenere un numero di citazioni considerevole. È comunque possibile affermare che dal 2020 la ricerca in questo ambito mostra una notevole continuità con valori annui di citazioni che rimangono complessivamente elevati contribuendo a generare un valore aggiunto costante e duraturo. Il valore registrato per gli anni 2024 e 2025 deve essere considerato preliminare e non consolidato poiché il periodo di osservazione si conclude a maggio 2025 e poiché i documenti relativi a tali anni sono ancora recenti in termini di pubblicazione. Per quanto riguarda la curva cumulativa, si osserva che inizialmente essa presenta un andamento esponenziale fino al 2021, successivamente probabilmente a causa dell'emergere di nuovi filoni di ricerca si registra una fase di assestamento e una riduzione della pendenza nel 2022 per poi riprendere un'inclinazione più marcata nel 2023. Nel complesso questi dati evidenziano come la trasformazione digitale nel settore del food and beverage continui a mantenere una rilevanza significativa nel panorama della ricerca scientifica. Al volume e alla distribuzione annuale delle citazioni occorre affiancare un'analisi delle principali sedi editoriali, nella figura 4 vengono dunque presentate le fonti d'eccellenza all'interno delle quali è stata pubblicata la produzione scientifica analizzata.

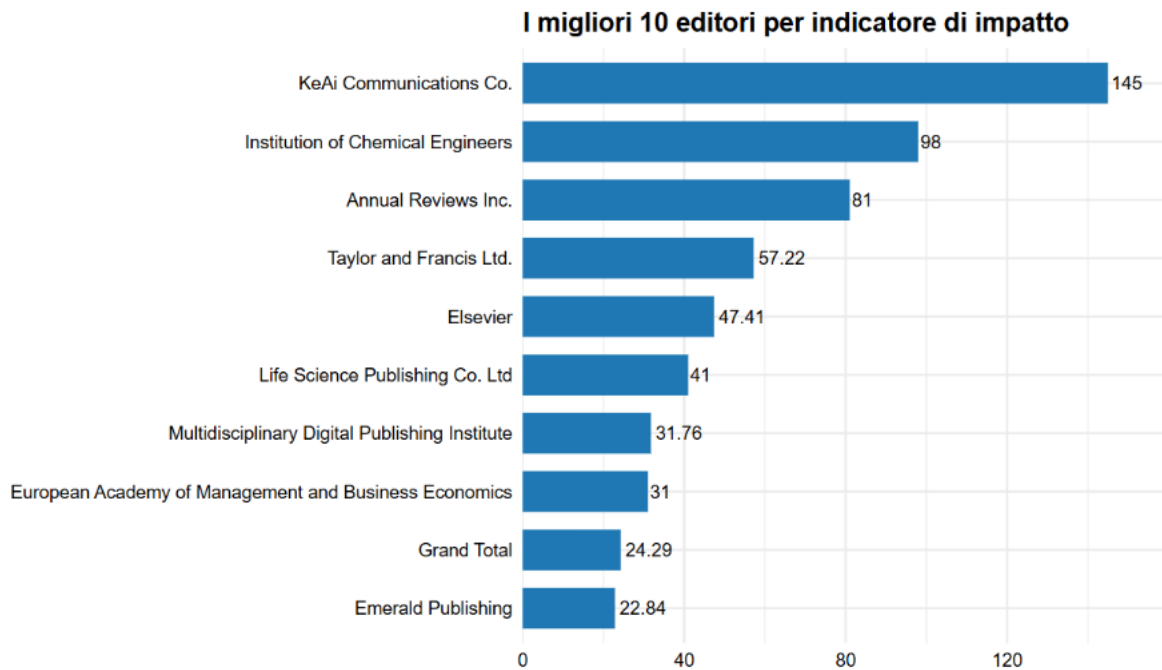


Figura 4. Le 10 principali fonti editoriali classificate in base al rapporto tra il numero di citazioni e il numero di pubblicazioni

Il grafico riporta gli editori più importanti che vengono classificati secondo un indicatore di impatto basato sul rapporto tra il numero di citazioni e il numero di documenti pubblicati. Al primo posto si colloca l'editore di KeAi Communications che si focalizza su studi inerenti a materiali bioattivi e sull'innovazione tecnologica. Tra gli editori più importanti troviamo l'Institution of Chemical Engineers che approfondisce studi fondamentali sui processi di trasformazione chimica. L'editore di Annual Reviews è noto per le sue rassegne critiche che aiutano i ricercatori ad orientarsi nella trasformazione digitale nel settore del food and beverage. Il panorama è ulteriormente arricchito da editori accademici importanti come Taylor and Francis ed Elsevier. Taylor and Francis tende ad approfondire tematiche riguardanti le scienze sociali e le innovazioni tecnologiche. Elsevier è uno degli editori più importanti grazie a un portafoglio di riviste tecniche molto riconosciute nel mondo accademico. A queste si aggiungono editori come Life Science Publishing specializzata nella divulgazione delle biotecnologie e Multidisciplinary Digital Publishing Institute noto per le sue pubblicazioni sul mondo del digitale. In conclusione, istituzioni come la European Academy of Management and Business Economics ed Emerald Publishing si focalizzano su tematiche come l'organizzazione aziendale, la logistica e la gestione economica. Oltre agli editori vengono studiate le diverse riviste più importanti. La figura 5 illustra la classifica delle prime dieci riviste scientifiche basate su un indicatore di impatto calcolato attraverso il rapporto tra il numero di citazioni totali e il numero di pubblicazioni totali. Questa metrica risulta fondamentale per identificare le riviste scientifiche che hanno esercitato la maggiore influenza nel campo della trasformazione digitale nel settore del food and beverage. In vetta alla classifica si posiziona l'International Journal of Production Economics, una rivista che approfondisce tematiche riguardanti strategie manageriali e valutazioni economiche. Al secondo posto troviamo la rivista Management Decision che si focalizza sui processi decisionali e sulla capacità di governance delle imprese. Annals of Operations Research approfondisce tematiche come l'efficienza dei flussi logistici attraverso tecnologie come i big data, l'intelligenza artificiale e

il digital twin. L' Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering è una rivista che si focalizza su tematiche come la scienza dei materiali e la bioingegneria concentrandosi su tecnologie come la simulazione molecolare e l'automazione dei processi chimici.

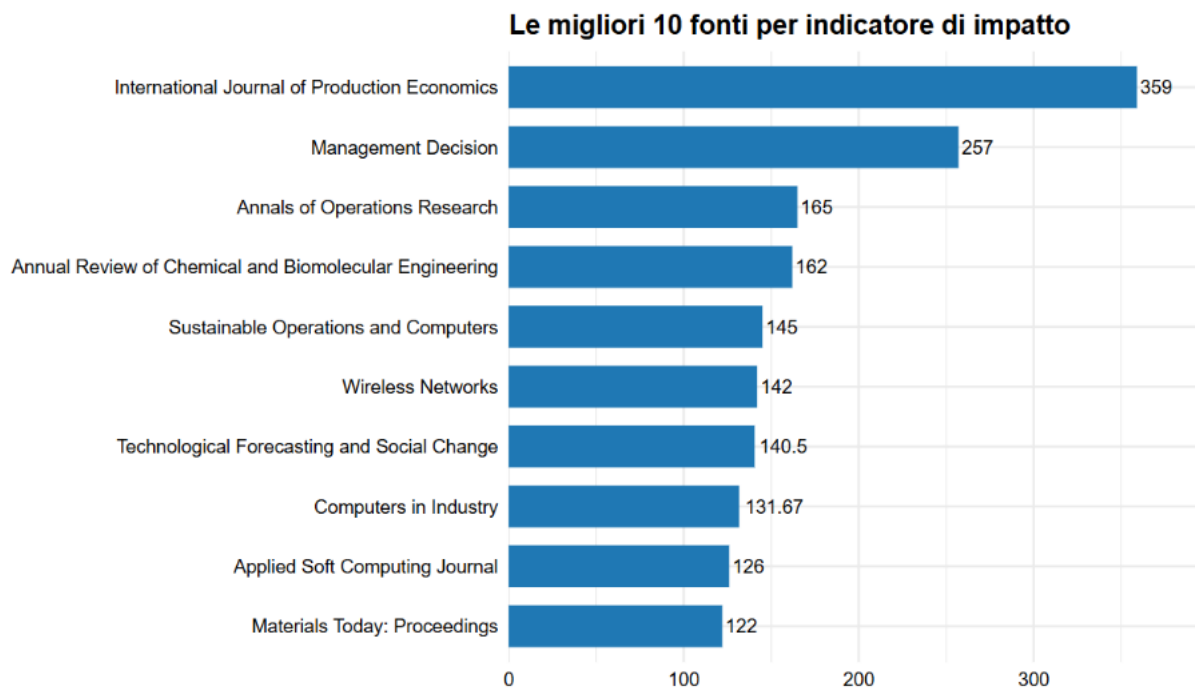


Figura 5. Le 10 principali riviste classificate in base al rapporto tra il numero di citazioni e il numero di pubblicazioni

Riviste come Sustainable Operations and Computers e Technological Forecasting and Social Change si concentrano su tematiche come la trasformazione digitale che agisce come vettore per la sostenibilità e per il cambiamento sociale. La rivista di Wireless Networks si concentra sull'architettura tecnologica dimostrando come l'architettura delle telecomunicazioni e la connettività tra macchine sia indispensabile. Le ultime tre riviste completano il quadro sull'innovazione industriale soffermandosi sull'infrastruttura tecnologica. La rivista di Computers in Industry approfondisce tematiche come l'architettura digitale e l'integrazione dei sistemi cyber-fisici necessari per ottenere un'azienda interconnessa. La rivista Applied Soft Computing Journal si focalizza sulla gestione di variabili complesse e sull'ottimizzazione dei processi decisionali tramite il machine learning. Come ultima rivista troviamo Materials Today: Proceedings che si focalizza sulle nuove frontiere nella scienza dei materiali e nelle nanotecnologie per garantire un packaging sostenibile e approfondimenti su materiali innovativi. Dopo aver analizzato i principali editori e riviste, l'analisi bibliometrica si focalizza sullo studio degli attori principali. Dalla figura 6 sull'analisi della distribuzione geografica della produzione scientifica, si può notare un'eterogeneità di paesi che contribuiscono alla ricerca nel contesto della trasformazione digitale nel settore del food and beverage. Al vertice della classifica si posiziona l'Italia con il numero di pubblicazioni e di citazioni molto alto consolidandosi come punto di riferimento nel dibattito scientifico internazionale. Anche India e Inghilterra svolgono un ruolo da protagonisti nella ricerca testimoniando un forte impegno accademico e un grande impatto a livello di influenza. E' anche utile evidenziare l'analisi dell'impatto medio per singolo contributo dove paesi come gli Stati Uniti hanno una

qualità della ricerca e una capacità di influenza nella letteratura scientifica superiore a qualsiasi altro paese. Questa capacità evidenzia la presenza di lavori capaci di attrarre l'attenzione della comunità internazionale. Una situazione analoga sebbene con volumi più contenuti si riscontra nelle pubblicazioni provenienti da paesi come Grecia, Cina, Turchia, Francia e Spagna. Questi paesi mostrano un'elevata capacità di generare contenuti ad alto valore aggiunto influenzando il contesto accademico. Al contrario, paesi come il Brasile e la Russia presentano un impatto molto basso dimostrando come la ricerca nella trasformazione digitale nel settore del food and beverage non sia ancora molto sviluppata.

PAESE	PUBBLICAZIONI TOTALI	CITAZIONI TOTALI	CITAZIONI PER ARTICOLO
Italia	88	2806	31,89
India	68	1854	27,26
Inghilterra	66	2675	40,53
Cina	41	1834	44,73
Francia	27	1325	49,07
Spagna	26	1175	45,19
Turchia	25	1156	46,24
Stati Uniti	24	2214	92,25
Germania	20	365	18,25
Malesia	19	589	31
Grecia	15	921	61,4
Brasile	15	92	6,13
Australia	14	469	33,5
Russia	14	188	13,43

Figura 6. I principali paesi per numero di pubblicazioni

Tuttavia, la tabella della produttività per singolo paese offre una visione statica che richiede di essere integrata con un'analisi delle co-authorship tra paesi che sia in grado di far emergere la struttura della rete collaborativa come mostrato in figura 7. Gli Stati Uniti, l'Inghilterra e l'India emergono come i principali protagonisti occupando una posizione centrale e stringendo relazioni con la totalità degli altri paesi. Vicino a questi paesi dominanti si riesce ad identificare un gruppo di paesi europeo guidato da Italia, Francia, Germania, Spagna e Turchia la quale sono fortemente interconnessi tra di loro. l'Italia e la Francia appaiono come i principali attori nel gruppo europeo, grazie alla loro posizione centrale riescono ad avere una maggiore influenza e una

connettività densa tra i paesi del gruppo. La loro centralità risulta complementare a quella delle grandi potenze globali formando una struttura in cui la cooperazione del gruppo supporta il network complessivo. Paesi come la Cina e la Malesia occupano una posizione rilevante ma più distaccata dal centro, come si può vedere dal grafico la Cina ha un numero elevato di pubblicazioni riuscendo comunque ad ottenere molte relazioni con altri paesi. La Malesia ha meno pubblicazioni e un ruolo decentralizzato riuscendo comunque ad avere relazioni con il gruppo europeo e i paesi centrali. Paesi come la Grecia e il Brasile si collocano in una posizione decentrata e sono caratterizzate da un numero limitato di connessioni e da un'influenza accademica che si propaga con minor forza verso il centro del sistema. La loro posizione periferica indica una dipendenza dai nodi principali evidenziando una vulnerabilità a livello strategico e d'influenza in ambito accademico. Questa marginalità non riflette una mancanza di potenziale interno ma descrive delle difficoltà di inserimento nel contesto globale limitando la capacità di influenzare la ricerca nel settore.

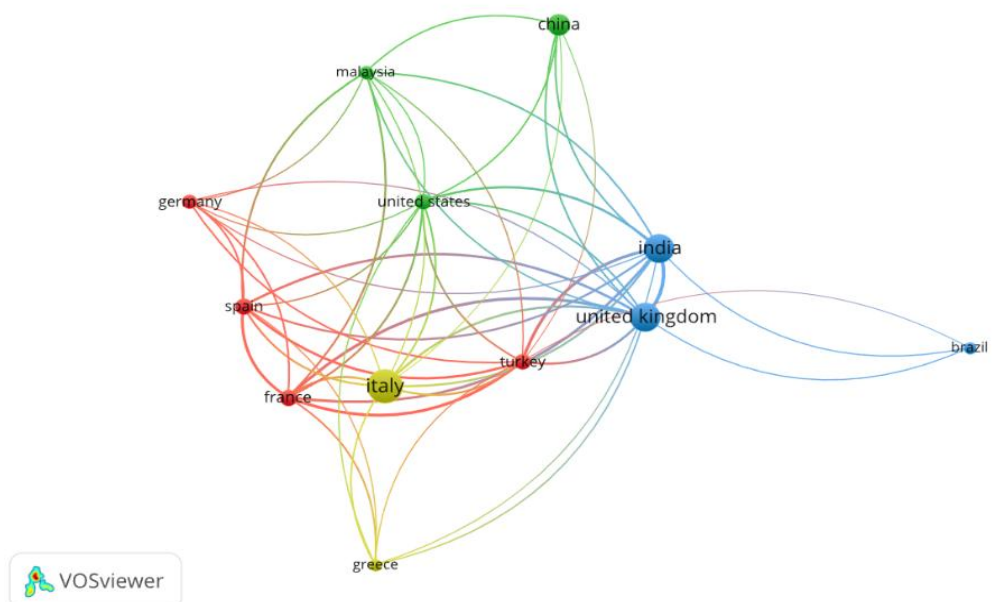


Figura 7. Rete di collaborazione di co-authorship tra paesi

Oltre all'analisi dei paesi principali, è utile approfondire gli autori più influenti. La figura 8 sotto riportata riprende i principali autori con il numero di articoli pubblicati, il numero di citazioni e il loro impatto attraverso le citazioni per articolo. In cima alla classifica dei principali autori si posizionano Abdo Hassoun e Sandeep Jagtap. Entrambi presentano una produzione di 12 pubblicazioni nel dataset analizzato. Hassoun Abdo focalizza la sua ricerca sull'integrazione di tecnologie abilitanti come l'intelligenza artificiale, l'internet of things e la blockchain lungo l'intera filiera alimentare. I suoi lavori analizzano soluzioni innovative per la riduzione dello spreco alimentare e la valorizzazione dei sottoprodotti in un'ottica di economia circolare. La sua produzione scientifica delinea il passaggio verso una produzione alimentare più efficiente, trasparente e resiliente ponendo le basi per l'evoluzione verso l'industria 5.0. Il secondo autore più importante è Sandeep Jagtap, i suoi contributi si focalizzano sul ruolo dell'internet of things e della blockchain come strumenti abilitanti per una gestione più trasparente e resiliente della supply chain permettendo un monitoraggio in tempo reale della qualità e della sicurezza del prodotto. Sandeep Jagtap attraverso il numero elevato di citazioni totali

dimostra una forte capacità di indirizzare il dibattito scientifico e di essere una figura rilevante all'interno della ricerca nel settore del food and beverage. Il suo lavoro offre una guida strategica per la transizione verso sistemi alimentari capaci di minimizzare gli sprechi e massimizzare la trasparenza verso il consumatore finale. Il contributo di Guillermo Garcia-Garcia risulta centrale nell'analisi dei sistemi di economia circolare applicati all'industria alimentare, le sue ricerche si concentrano su modelli strategici per la valorizzazione degli scarti e la riduzione dell'impatto ambientale. I suoi studi integrano i principi della lean manufacturing con le tecnologie dell'internet of things dimostrando come il monitoraggio in tempo reale sia essenziale per ridurre gli sprechi di acqua, energia e materie prime. Proseguendo nella classifica dei principali autori, tra i più importanti c'è Abderrahmane Aït-Kaddour. I suoi studi si concentrano sulla valorizzazione degli scarti industriali e sullo sviluppo del packaging 4.0, dove l'integrazione di sensori e nanotecnologie permette di avere una maggiore sicurezza alimentare. Eleonora Bottani focalizza la propria attività di ricerca sull'ottimizzazione logistica attraverso l'integrazione di sistemi di identificazione automatica e sensori di internet of things. Nelle sue ricerche vengono anche esplorate tecnologie come il digital twin per il controllo predittivo dei processi produttivi riducendo l'inefficienza industriale.

AUTORI	PUBBLICAZIONI TOTALI	CITAZIONI TOTALI	CITAZIONI PER ARTICOLO
Hassoun, Abdo	12	843	70,25
Jagtap, Sandeep	12	622	51,83
Garcia-Garcia, Guillermo	7	460	65,71
Aït-Kaddour, Abderrahmane	6	413	68,83
Bottani, Eleonora	5	56	11,2
Ozogul, Fatih	5	405	81
Jambrak, Anet Režek	5	519	103,8
Cropotova, Janna	4	447	111,75
Trollman, Hana	4	344	86
Kazancoglu, Yigit	4	192	48

Figura 8. I 10 autori principali per numero di pubblicazioni

I lavori di Fatih Ozogul approfondiscono metodi analitici avanzati e sistemi di packaging per aumentare la shelf-life dei prodotti e ridurre drasticamente lo spreco alimentare lungo la supply chain. Le ricerche di Anet Režek Jambrak si concentrano sullo sviluppo dell'internet of nonthermal processing, un approccio che serve ad ottimizzare l'estrazione di nutrienti e la sicurezza alimentare. L'autrice promuove l'upcycling dei

sottoprodotti trasformando gli scarti industriali in risorse ad alto valore aggiunto. Gli ultimi tre autori Janna Crobotova, Hana Trollman e Yigit Kazancoglu hanno un numero di pubblicazioni limitato ma comunque un numero di citazioni rilevante. Le ricerche di Janna Crobotova si focalizzano sull'innovazione tecnologica applicata alla trasformazione e conservazione dei prodotti ittici con un particolare interesse per lo sviluppo di formulazioni alimentari. Le ricerche di Hana Trollman si concentrano sulla sostenibilità dei sistemi alimentari e sulle politiche di economia circolare e riduzione degli sprechi. I suoi studi analizzano le interconnessioni tra processi produttivi, impatto ambientale e sicurezza alimentare proponendo modelli teorici e pratici per una gestione più responsabile delle risorse. Le ricerche di Yiğit Kazançoğlu si focalizzano sulla gestione della supply chain sostenibile e sull'integrazione dei principi di economia circolare nei sistemi produttivi. I suoi studi applicano modelli decisionali multicriterio per valutare l'impatto ambientale e la resilienza delle filiere. Dopo aver analizzato gli studi dei principali autori, nella figura 9 viene riportata la mappa delle collaborazioni che permette di capire quali siano i gruppi di ricerca che sono stati formati a livello accademico. La mappatura delle collaborazioni scientifiche nel settore del food and beverage rivela una struttura frammentata dove un grande polo di influenza accademica è concentrato in un nucleo centrale densamente interconnesso mentre una serie di attori opera in una condizione di relativa marginalità relazionale. La figura 10 si concentra su gruppo principale di ricerca, il gruppo rosso del nucleo principale di ricerca è formato da diversi componenti come Hassoun Abdo, Fatih Ozogul, Janna Crobotova, Rai Naveed Arshad, Anet Rezek Jambrak, Abderrahmane ait-Kaddour. Questo gruppo di ricerca tratta a proposito di diverse tematiche come l'integrazione di tecnologie nel settore del food and beverage per esempio blockchain, big data analytics, internet of things e la robotica focalizzandosi sull'efficienza operativa dei processi e sulla riduzione degli scarti. Nello specifico vengono trattati temi come il monitoraggio in tempo reale dei prodotti e della loro qualità attraverso tecnologie come l'internet of things e l'intelligenza artificiale.

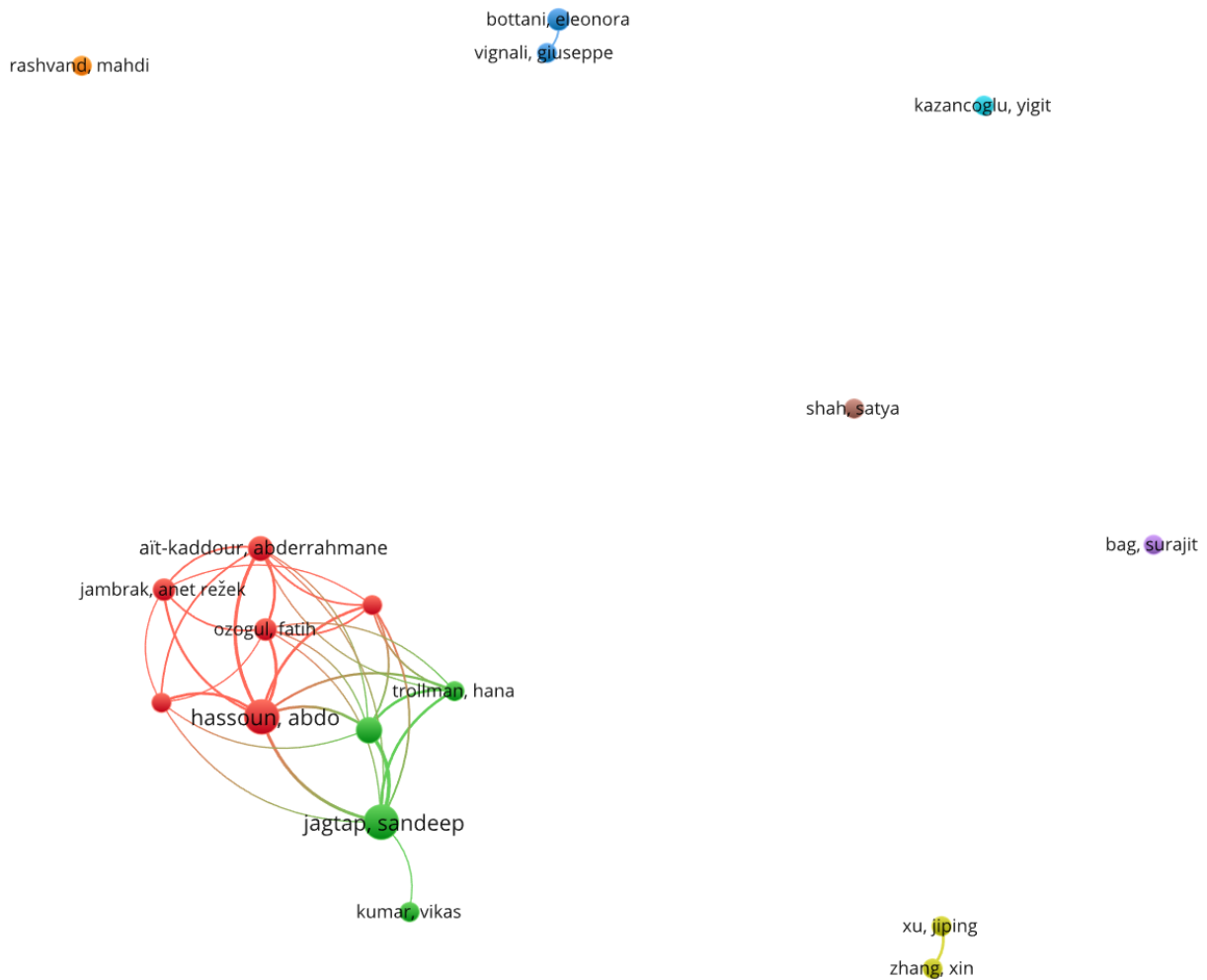


Figura 9. Rete di collaborazione di co-authorship tra autori

Inoltre, gli autori Hassoun Abdo e Aït-Kaddour Abderrahmane analizzano come le tecnologie possano permettere la trasformazione degli scarti in prodotti ad alto valore aggiunto promuovendo modelli di economia circolare. Questo gruppo di ricerca tratta anche a proposito di temi inerenti al packaging intelligente e quindi sulle innovazioni per la conservazione degli alimenti con anche la riduzione della dipendenza da plastiche non biodegradabili. Il gruppo tratta a proposito anche di tecnologie come la blockchain e dell’internet of things che garantiscono l’autenticità alimentare e la sicurezza alimentare. Il gruppo di ricerca, nello specifico autori come Jambrak Anet Režek e Janna Crobotova, analizzano tematiche come la carne coltivata, la stampa 3D di alimenti e la nutrizione personalizzata. Il gruppo verde composto dai ricercatori Garcia-Garcia Guillermo, Hana Trollman, Sandeep Jagtap e Vikas Kumar tratta a proposito di temi come la gestione operativa e la resilienza della filiera. Vengono trattate tematiche come la resilienza e la ristrutturazione della supply chain soprattutto da Kumar Vikas con un particolare approfondimento sulle short food supply chains. Le filiere devono essere riprogettate per l'efficienza economica, per il sostentamento sociale e per la resilienza a shock globali come la pandemia. Un tema distintivo trattato nello specifico da Jagtap è la sicurezza informatica, l'aumento della digitalizzazione espone l'industria alimentare a rischi informatici che potrebbero compromettere la produzione e la privacy. Nelle tematiche principali del gruppo di ricerca vengono anche

trattati i vantaggi di tecnologie come la blockchain che permettono di ridurre le asimmetrie informative tra produttori e consumatori. Autori come Guillermo Garcia-Garcia e Hana Trollman dimostrano invece, attraverso la loro ricerca, come le aziende che adottano tecnologie digitali riescano a implementare meglio pratiche ambientali.

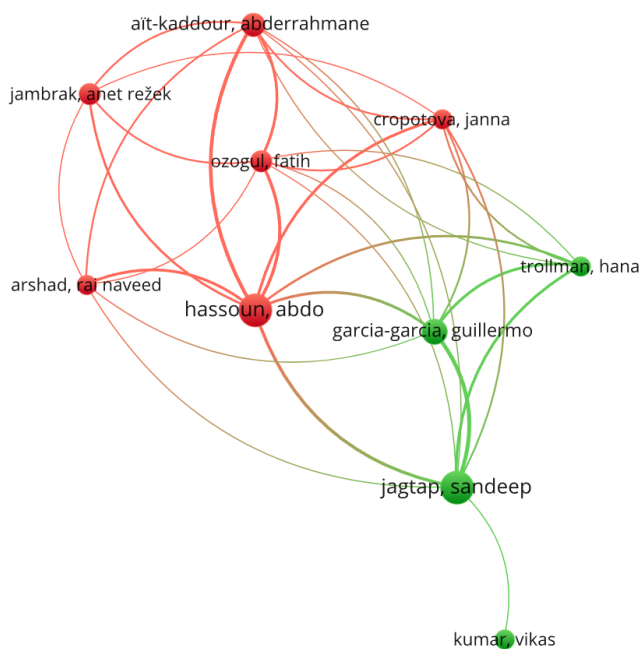


Figura 10. gruppo principale di ricerca della rete di collaborazione di co-authorship tra autori

I temi trattati dal gruppo di Bottani Eleonora e Vignali Giuseppe si concentrano su temi come l'applicazione dei digital twins per il controllo dei processi alimentari, il miglioramento della tracciabilità attraverso tecnologie come RFID e QR codes integrate con sensori di internet of things e blockchain e il monitoraggio e il controllo qualità attraverso strumenti come lo statistical process control e la teoria six sigma. Il gruppo di Xu Jinping e Zhang Xin tratta a proposito di temi legati alla gestione della filiera del riso e alla sicurezza dei dati. Le loro pubblicazioni si concentrano su tecnologie come la blockchain per la condivisione di informazioni sensibili lungo la filiera e l'uso di modelli di machine learning per la valutazione dei rischi di contaminazione. Oltre ai principali autori e le loro collaborazioni, in figura 11 vengono riportate le maggiori istituzioni che portano avanti la ricerca nella trasformazione digitale nel settore del food and beverage. Come si può notare l'istituzione di Sustainable AgriFoodtech Innovation and Research in Francia ha il maggior numero di pubblicazioni sul tema della trasformazione digitale nel settore del food and beverage, allo stesso tempo istituzioni come la Cornell University negli Stati Uniti e l'Università del Salento in Italia presentano una media di citazioni per articolo molto elevata evidenziando come i loro studi siano molto influenti all'interno del contesto accademico. Dalla tabella si può inoltre vedere come la distribuzione geografica delle pubblicazioni sia eterogenea interessando istituzioni di paesi come Turchia, Grecia, Francia, Croazia, Austria e India.

ISTITUZIONE	PUBBLICAZIONI TOTALI	CITAZIONI TOTALI
Sustainable AgriFoodtech Innovation & Research (SAFIR), Arras, France	8	625
Department of Innovation Engineering, University of Salento, Lecce, Italy	4	354
Department of Food Science, Cornell University, Ithaca, NY, United States	3	422
Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, Zagreb, Croatia	2	343
Department of Seafood Processing Technology, Faculty of Fisheries, Cukurova University, Adana, Turkey	2	317
Syrian Academic Expertise (SAE), Gaziantep, Turkey	2	303
Food Waste Recovery Group, ISEKI Food Association, Vienna, Austria	2	273
Research & Innovation Department, Galanakis Laboratories, Chania, Greece	2	273
Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMRIF, Aurillac, France	2	243
Division of Livestock Products Technology, SKUAST-J, Jammu, India	2	168

Figura 11. Le 10 principali istituzioni per numero di pubblicazioni

in tempo reale permette una gestione delle linee di produzione. In stretta sinergia con la componente produttiva si sviluppa il cluster verde, questo raggruppamento è dominato dal machine learning indicando come l'apprendimento automatico sia la principale tecnologia usata per estrarre valore dai dati. Il cluster verde si concentra sul controllo qualità avanzato attraverso strumenti come il machine learning e le reti neurali. L'integrazione di sistemi di visione artificiale e algoritmi predittivi è fondamentale per garantire elevati standard di qualità e sicurezza. La connessione con i temi come l'efficienza operativa e il lean management suggerisce come la ricerca attuale stia puntando verso paradigmi come la quality 4.0 dove la prevenzione dei difetti e il monitoraggio dei parametri critici avvengono in maniera automatizzata. Il cluster blu si concentra sulla tracciabilità della supply chain, sulla trasparenza informativa e sulla sicurezza della catena di fornitura attraverso tecnologie come la blockchain. Il cluster esplora come le tecnologie possano mitigare i rischi, migliorare la resilienza delle catene di approvvigionamento e fornire ai consumatori finali prove tangibili della provenienza e della qualità dei prodotti. Il cluster celeste è composto da concetti molto inerenti al cluster blu, viene risaltata l'autenticità e la tracciabilità del cibo in un'ottica di sicurezza alimentare. Come strumento principale per rendere il cibo tracciabile vengono citati i sensori RFID che permettono una identificazione rapida dei prodotti. I cluster viola e arancione si concentrano sulle dimensioni sociale e ambientale ponendo la sostenibilità come il principale obiettivo da raggiungere. Questo raggruppamento tematico analizza il ciclo vita dei prodotti, l'economia circolare e l'impatto dei cambiamenti climatici sul sistema agroalimentare. L'integrazione della sostenibilità ambientale con la trasformazione digitale suggerisce come le tecnologie abilitanti siano delle leve essenziali per ridurre l'impronta ecologica del settore. La presenza di termini relativi all'economia ambientale e alla gestione dei rifiuti indica una ricerca orientata verso modelli di business che siano tecnologicamente avanzati e responsabili dal punto di vista ecologico. Il cluster giallo rappresenta la frontiera più avanzata della ricerca introducendo il passaggio verso l'industria 5.0 dando enfasi a tecnologie come l'intelligenza artificiale, la realtà aumentata, la stampa 3D alimentare e i sensori avanzati ma con una prospettiva che integra il fattore umano e la personalizzazione.

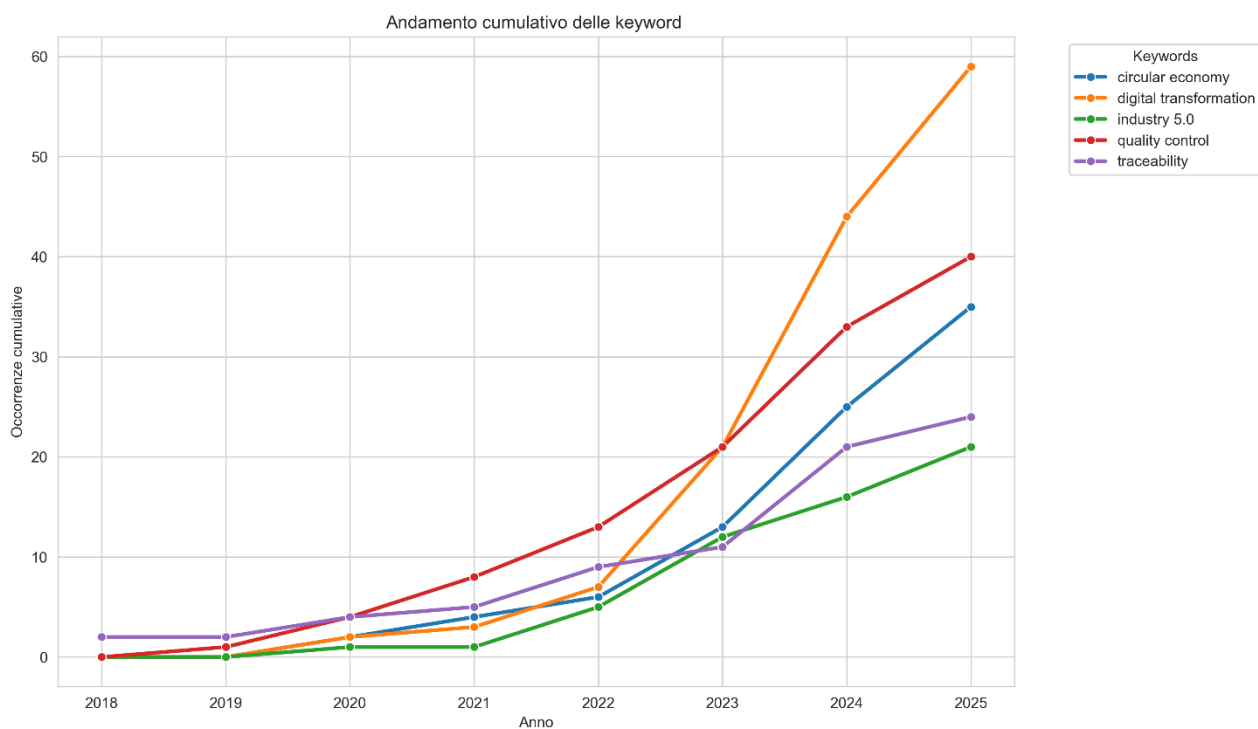


Figura 13. Andamento cumulativo nel tempo di parole tematiche

Dopo aver analizzato i principali cluster delle keywords più frequenti, viene analizzato nella figura 13 l'evoluzione temporale di parole inerenti all'ambito di ricerca in maniera cumulata. Nel grafico viene rappresentato l'andamento cumulativo di alcune parole specifiche volte a rappresentare l'argomento principale della tesi. La trasformazione digitale rappresenta il fulcro centrale della ricerca andando a rappresentare un cambiamento profondo dei processi di produzione, controllo qualità e logistica. Dal grafico emerge chiaramente come la trasformazione digitale mostri una crescita rapida e anche una sinergia con le altre parole analizzate dimostrando come l'evoluzione tecnologica possa essere collegata con temi come la trasparenza della filiera e la sicurezza alimentare. Dal grafico emerge come la tracciabilità sia un concetto in rapida crescita soprattutto tra il 2023 e il 2024, la ricerca si concentra su questa tema facendo notare come sia sempre più importante una filiera trasparente e che permetta di tracciare l'origine e l'integrità di prodotto in ogni fase. L'andamento cumulativo rappresentante la parola sul controllo qualità ha mantenuto una crescita esponenziale con un'accelerazione importante tra il biennio 2022-2024. Questo andamento evidenzia la necessità delle aziende sull'adottare protocolli sul controllo qualità di prodotto e di processo sempre più moderni. Nella parola sul controllo qualità si deve tenere conto anche di un paradigma in rapida evoluzione come la quality 4.0 che si manifesta attraverso l'integrazione di sistemi di monitoraggio in tempo reale e anche la riduzione di asimmetrie informative lungo la catena del valore. La tracciabilità e il controllo qualità sono concetti correlati tra di loro, questo legame è visibile grazie all'andamento corale delle due parole e all'accelerazione che entrambe le parole ottengono nell'anno 2023-2024. L'andamento del termine sull'economia circolare rivela come la sostenibilità non sia più considerata una tematica di secondo ordine ma venga considerata come un vettore tra la trasformazione digitale e la responsabilità ambientale. L'andamento della parola sull'economia circolare rivela un'accelerazione dall'anno 2022 dimostrando come sia diventata una priorità strategica in

risposta alle nuove direttive europee e alla crescente sensibilità dei consumatori al tema. In conclusione, viene analizzato l'andamento della parola sull'industry 5.0, questo termine segna un passaggio da un'ottica puramente tecnologica a una visione di valore sociale nel settore del food and beverage dove la tecnologia è posta al servizio del benessere umano. In questa parola viene osservata una crescita costante e un'accelerazione significativa nell'anno 2022-2023. Nel complesso si possono notare come i concetti chiave inerenti all'argomento di tesi siano in crescita e sempre in evoluzione, una particolarità che emerge dal grafico è come ci sia una rapida crescita dall'anno 2022 testimoniando come la pandemia sul covid 19 abbia innescato un processo di trasformazione digitale e cambiamento nell'intero sistema del food and beverage. Oltre all'analisi cumulativa delle parole specifiche prima elencate, è stata portata avanti un lavoro sulla burst detection dei termini per capire in che periodo temporale c'è stato un incremento importante della frequenza delle parole. In seguito vengono riportati i grafici della burst detection su specifici termini. La figura 14 riprende la burst detection della parola riguardante la digital transformation.

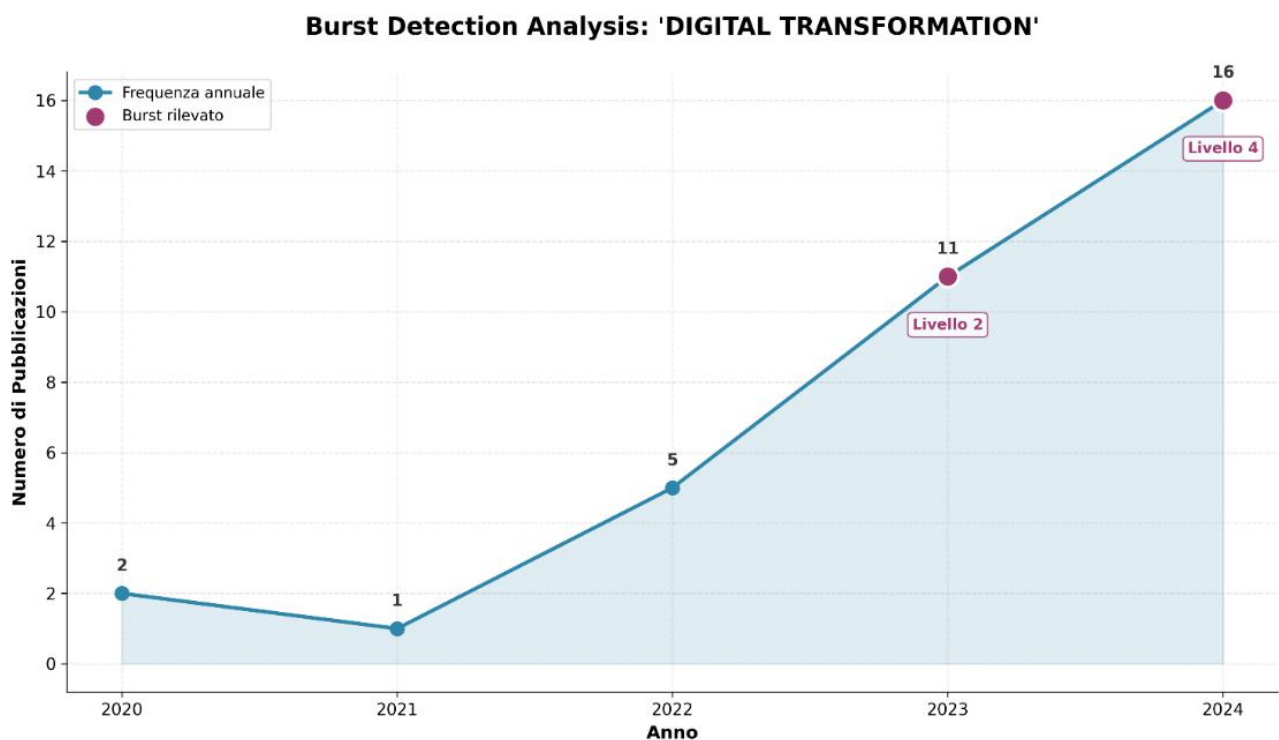


Figura 14. Burst detection della parola "digital transformation"

L'evoluzione dell'interesse accademico nei confronti della digital transformation rivela una traiettoria di crescita caratterizzata da un periodo di latenza iniziale tra il 2020 e il 2021 con una successiva crescita della frequenza annuale. Si può notare come a partire dall'anno 2022 ci sia una crescita di importanza della parola segnalando un maggiore interesse sul tema. Il primo segnale di accelerazione rilevante si è manifestato nel 2023 con un burst di livello 2, nell'anno successivo il termine della digital transformation ha trovato il suo culmine con un burst di livello 4 indicando una frequenza di pubblicazione superiore alla sua media storica. Questa crescita dimostra come la digital transformation sia passata dall'essere un termine emergente fino ad

essere uno dei termini più utilizzati nella ricerca. La figura 15 riprende la burst detection della parola riguardante il quality control.

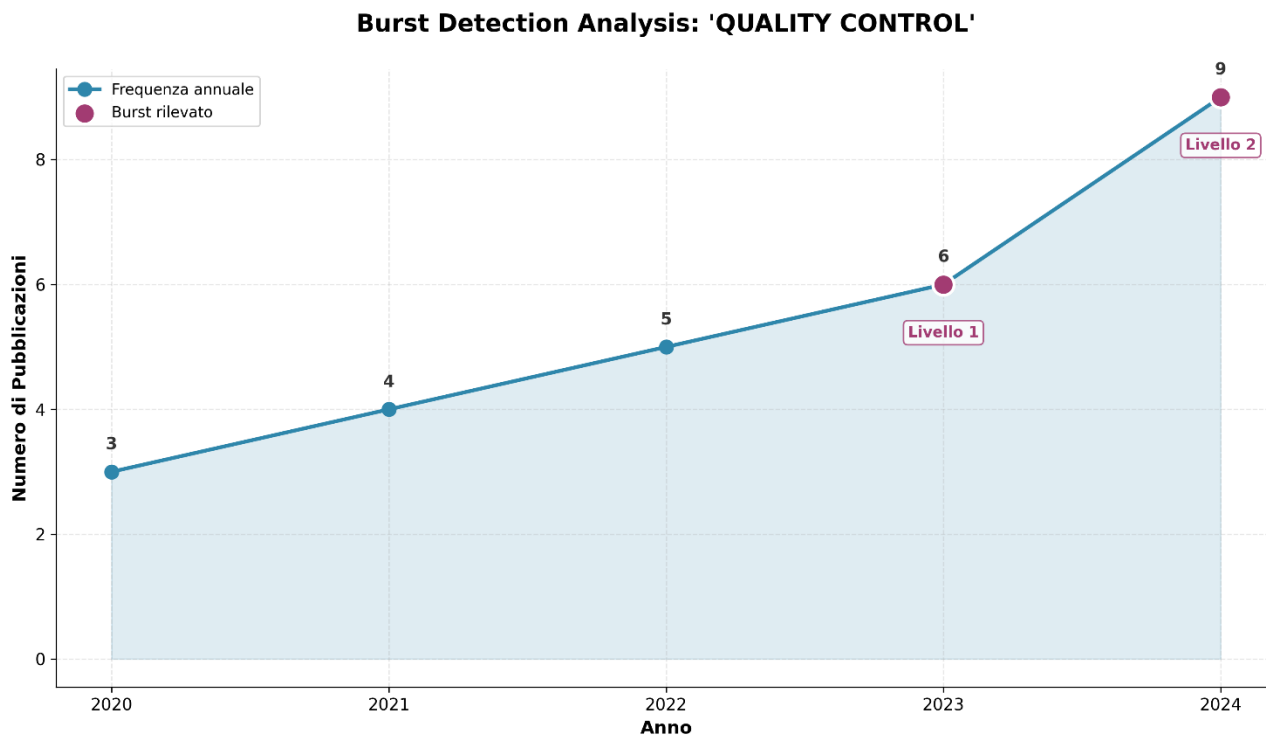


Figura 15. Burst detection della parola "quality control"

L'andamento dell'attività scientifica legata al quality control rivela un percorso di crescita costante, riflettendo l'importanza di questo tema nel settore industriale. Il controllo qualità mostra un incremento regolare, questa progressione costante testimonia come l'esigenza di garantire standard elevati sia un requisito permanente. Nel 2023 viene rilevato un burst di livello 1, sebbene l'intensità sia moderata questo segnale indica un consolidamento delle metodologie di controllo. Nel 2024 si ha un burst di livello 2 suggerendo come il controllo qualità stia diventando una fase di rilevanza strategica. L'incremento dell'intensità del burst proprio nell'ultimo anno analizzato conferma come la qualità non sia più intesa solo come conformità finale del prodotto ma come un processo intrinsecamente legato alla trasformazione digitale e alla necessità di ridurre gli sprechi. La figura 16 riprende la burst detection della parola riguardante l'industry 5.0.

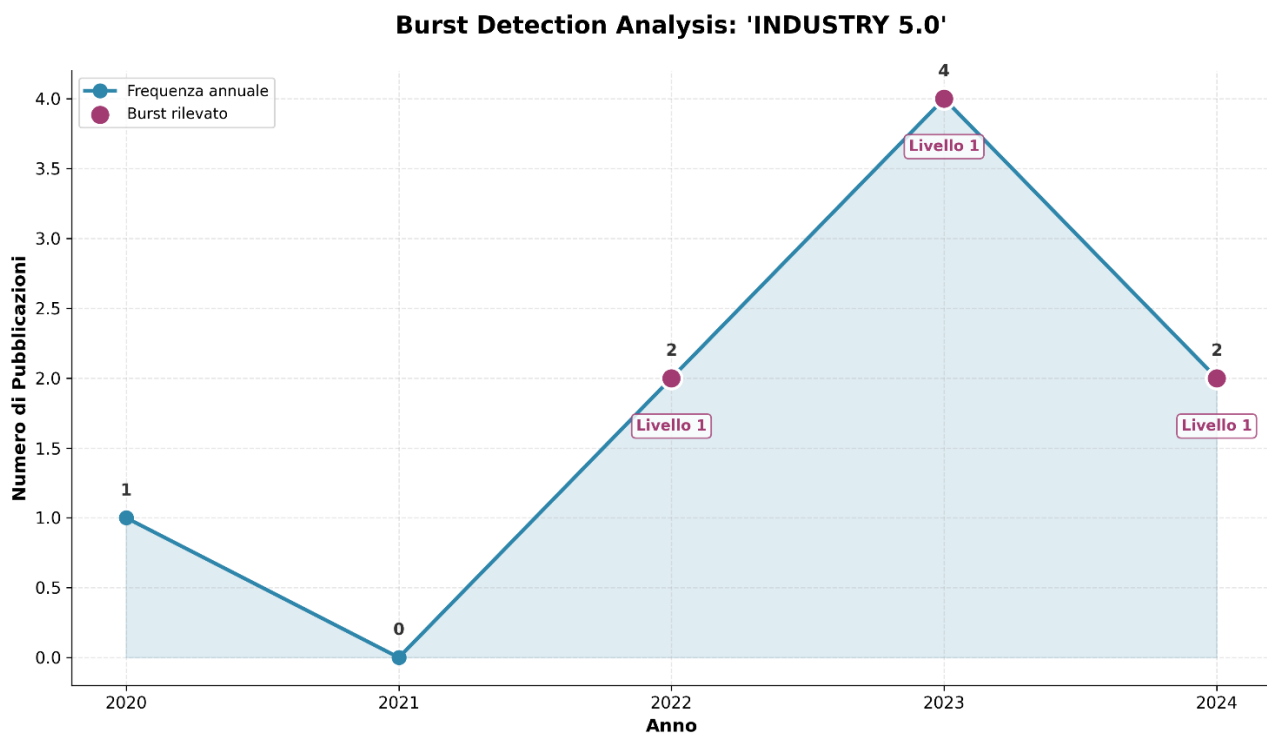


Figura 16. Burst detection della parola "industry 5.0"

Come evidenziato dall'immagine, nel biennio 2020-2021 il concetto di industry 5.0 appare quasi assente dal dibattito accademico raggiungendo il punto di minimo nel 2021. Questo dato suggerisce come mentre il paradigma riguardante l'industria 4.0 era già in una fase di piena maturità, il paradigma riguardante l'industry 5.0 non aveva ancora catturato l'attenzione della comunità scientifica. Il primo burst di livello 1 viene identificato nel 2022 e questo anno indica l'inizio di una transizione che dà sempre più importanza a concetti come la resilienza e la sostenibilità sociale. La crescita prosegue fino al 2023, raggiungendo un picco di 4 frequenze ed identificando un burst di livello 1. In conclusione, l'anno 2024 mostra un calo quantitativo che tuttavia mantiene attivo il segnale di burst di livello 1. La burst detection conferma come il tema riguardante l'industry 5.0 sia un paradigma che non ha ancora catturato la piena attenzione del mondo accademico ma che comunque rimane con una crescita importante e con un ruolo futuro sempre più centrale. La figura 17 mostra la burst detection della parola traceability.

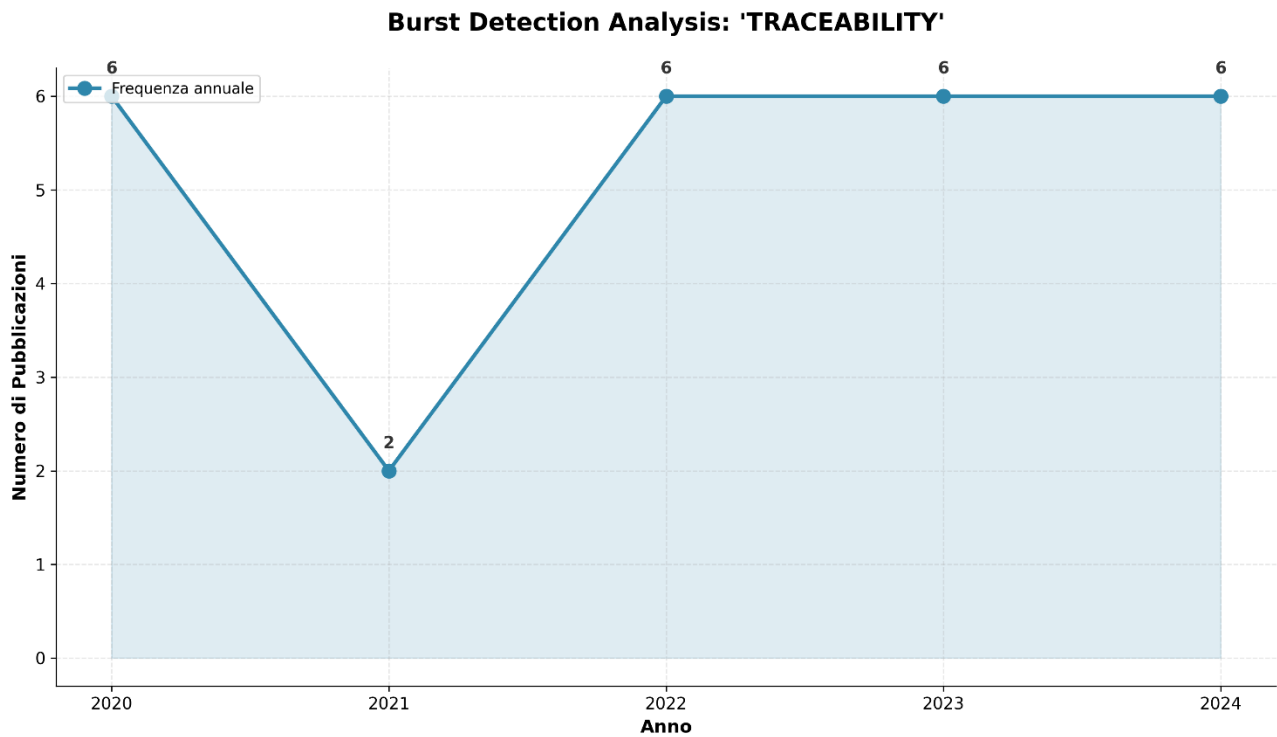


Figura 17. Burst detection della parola "traceability"

Osservando l'arco temporale 2020-2024, emerge come dopo un valore iniziale di 6 pubblicazioni nel 2020 e una flessione nel 2021 il tema sia riuscito a recuperare immediatamente la sua centralità. Dal 2022 al 2024, il numero di frequenze si è stabilizzato su un numero costante di 6 contributi annui, evidenziando come la tracciabilità sia diventata una componente fondamentale nella ricerca. È interessante notare come la tracciabilità sia caratterizzata dall'assenza di burst manifestando una presenza persistente e uniforme e inoltre non assistiamo a una crescita dell'argomento poiché l'interesse scientifico si è già consolidato sul suo ruolo

fondamentale per la sicurezza alimentare. La figura 18 mostra la burst detection della parola circular economy.

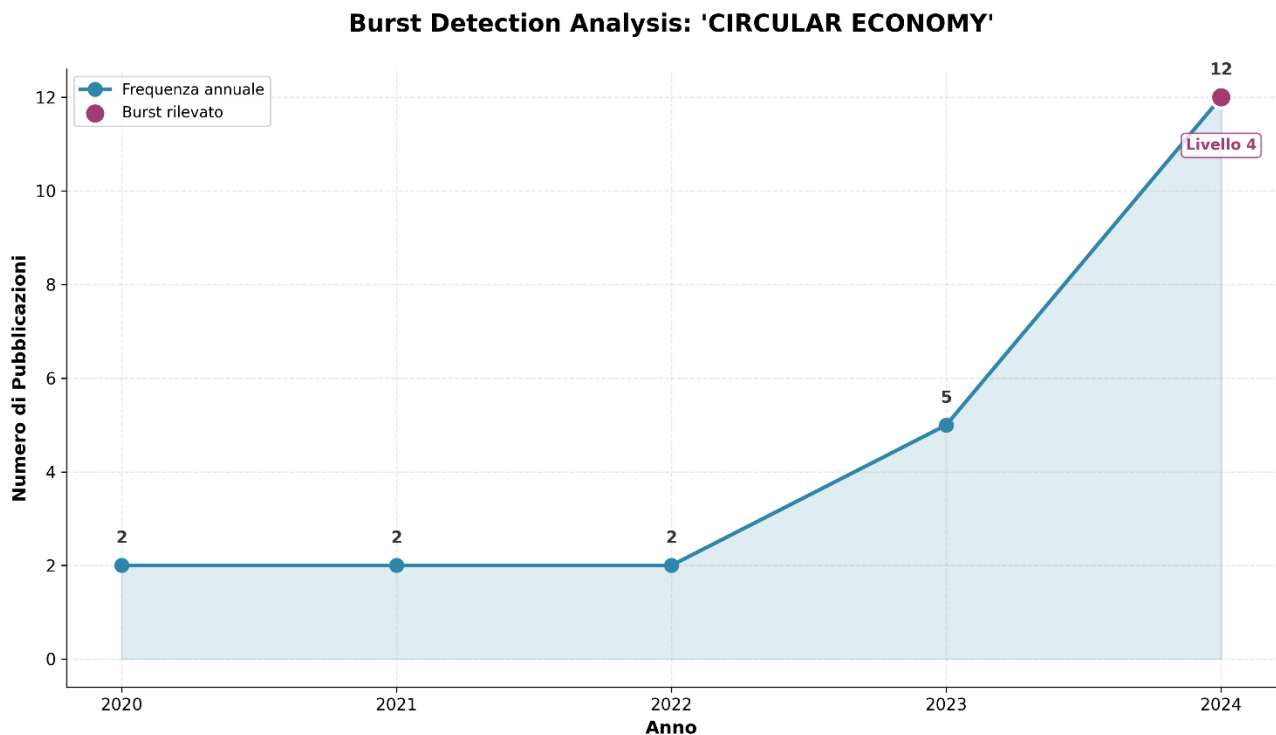


Figura 18. Burst detection della parola "circular economy"

Come si può notare dalla figura, tra il 2020 e il 2022, il numero di frequenze della parola si è mantenuto su un valore costante di 2 contributi annui, questa fase iniziale dimostra come il concetto di circolarità veniva probabilmente discusso in termini generali. Durante il 2023 avviene il primo cambio di frequenza e nel 2024 viene rilevato un burst di livello 4 dimostrando come il concetto riguardante l'economia circolare non venga più visto in maniera marginale ma venga visto come una necessità strategica per il recupero degli scarti, la valorizzazione dei sottoprodotti e la riduzione del ciclo di vita dei rifiuti

4.2 Risultati del topic modeling

In questa sezione vengono presentati i risultati principali derivanti dall'applicazione dell'algoritmo di bertopic al dataset di documenti analizzato. Attraverso la tecnica di topic modeling di bertopic è stato possibile identificare 8 cluster tematici distinti ciascuno rappresentante un argomento trattato nell'insieme dei documenti del dataset. La prima fase riguardante l'analisi prevede l'etichettatura dei cluster, l'esposizione delle keyword principali per ogni cluster e il peso relativo di ogni cluster formato dall'algoritmo di bertopic attraverso l'assegnazione dei documenti. Questo passaggio è fondamentale per trasformare l'insieme delle keyword individuate in categorie concettuali leggibili e funzionali alla ricerca. La figura 19 sotto riportata riassume la struttura degli 8 topic individuati riportando il nome ricavato dall'etichettatura, le parole chiave più rilevanti del cluster e la percentuale di documenti assegnati al cluster. Come evidenziato dalla tabella, la gerarchia dei topic elencata è guidata dal tema della blockchain applicata alla tracciabilità e alla sicurezza alimentare. Questo topic evidenzia come la trasparenza sia un concetto di primo ordine e inoltre la blockchain viene supportata da tecnologie come gli smart contracts che permettono di automatizzare le transazioni. Il secondo topic tratta a

proposito delle tecnologie della quarta rivoluzione industriale, vengono trattate tecnologie come l'intelligenza artificiale, l'internet of things e anche l'adozione di sensori che permette il monitoraggio in tempo reale. Questo controllo costante consente il monitoraggio della sicurezza alimentare e l'integrità dei prodotti lungo la filiera. Attraverso la parola dry viene riportato un collegamento con i processi di essiccazione e di controllo dell'umidità che consentono di mantenere la stabilità microbiologica e la conservazione a lungo termine. Il topic introduce anche aspetti riguardanti l'innovazione del packaging inteso come sistema intelligente e anche tecnologie riguardanti il 3d printing per la prototipazione di imballaggi sostenibili e per la personalizzazione degli alimenti. Nel terzo topic emergono come parole principali la simulazione e la modellizzazione, tecnologie che permettono di prevedere il comportamento delle linee produttive e di prevenire le inefficienze prima ancora che si verifichino. Il topic risalta anche concetti riguardanti l'ottimizzazione dei costi operativi e dei consumi di energia e inoltre tratta a proposito anche della gestione del magazzino dove i sistemi automatizzati permettono di ridurre gli errori umani e di ottimizzare i tempi di risposta. Il topic 4 approfondisce il paradigma dell'economia circolare, il concetto di circolarità prende in considerazione il riciclo dei materiali, la ridefinizione dei flussi di energia e l'ottimizzazione delle risorse lungo l'intera catena del valore. Viene approfondito il ruolo delle startup nel foodtech che agiscono sul mercato con nuovi modelli di business capaci di trasformare gli scarti in nuove risorse, di ridurre lo spreco alimentare e di ottimizzare l'impronta carbonica nei trasporti. Viene approfondito anche il tema legato alle policy ovvero alle politiche e normative come il green deal europeo dove tali direttive allineano le aziende alla modellizzazione di nuovi scenari circolari che si trasformano in crescita economica. Nel quinto topic emerge l'impiego della spettroscopia e dell'imaging iperspettrale che permettono di identificare la composizione chimica o la presenza di contaminanti negli alimenti. Il processo non si limita alla raccolta dei dati o all'analisi della composizione chimica ma si estende anche all'applicazione di algoritmi di machine learning per l'estrazione delle caratteristiche di prodotto. Il sesto topic tratta a proposito della bioeconomia nel settore agricolo e viene intesa come un modello di sviluppo che utilizza risorse biologiche rinnovabili superando la dipendenza dalle risorse fossili. La competitività e l'economia intesa come circolare e rigenerativa sono concetti centrali in questo topic. Il settimo topic introduce l'aspetto della pianificazione strategica e si concentra su parole chiave come la sostenibilità ambientale, la trasformazione verde includendo aspetti legati ai nuovi modelli di business aziendali e anche ad orientamenti imprenditoriali. Emergono anche concetti come la green supply chain management dove le aziende devono integrare criteri ecologici nelle fasi di approvvigionamento, produzione e distribuzione bilanciando gli obiettivi di tutela ambientale con quelli di sostenibilità economica. Vengono impiegati anche modelli matematici e decisionali avanzati come la logica fuzzy per gestire l'incertezza e la complessità tipiche delle valutazioni di impatto ambientale. I parametri di sostenibilità sono spesso multidimensionali e sono spesso difficili da quantificare con precisione, l'adozione della logica fuzzy permette al management di prendere decisioni coerenti. L'ultimo topic si focalizza sulla resilienza della filiera agroalimentare concentrandosi sulle capacità di affrontare interruzioni del sistema da eventi esterni come la pandemia da covid 19. Viene risaltato il concetto di rischio che viene declinato in una duplice accezione, da un lato si fa riferimento alla necessità di proteggere il tessuto produttivo e quindi alla possibilità di avere rischi legati a blocchi operativi e dall'altro lato vi è

l'integrazione tecnologica con la cybersecurity dove si fa riferimento al rischio di avere attacchi informatici. Il topic evidenzia come la costruzione di un sistema resiliente venga costruito attraverso la capacità di integrare protocolli di difesa e piani di emergenza che proteggano sia i flussi fisici sia quelli digitali.

NUMERO	NOME CLUSTER	KEYWORD	PESO CLUSTER
0	Blockchain per la tracciabilità e la trasparenza	blockchain, traceability, transparency, agri, safety, smart_contract, risk, model, transaction, blockchain_smart_contract	14,96 %
1	Smart manufacturing	artificial_intelligence, fourth_revolution, smart, 3d_printing, dry, internet_thing, monitoring, safety, sensor, packaging	13,38 %
2	Modellazione e automazione dei processi	control, model, simulation, cost, automation, automate, modeling, machine, energy, warehouse	12,93 %
3	Economia circolare e politiche per l'innovazione	circular_economy, circular, energy, model, foodtech, logistic, smart, startup, economic, policy	11,11 %
4	Sensoristica e spettroscopia per il controllo qualità	sensor, accuracy, machine, hyperspectral_imaging, detection, model, feature, spectroscopy, monitoring, algorithm	10,88 %
5	Transizione bioeconomica e competitività del settore agroalimentare	agri, transformation, economic, ecological, bioeconomic, economy, competitiveness, transition, agro, cluster	9,07 %
6	Strategia e governance d'impresa sostenibile	green, transformation, corporate, model, economy, strategic, fuzzy, economic, entrepreneurial, green supply chain management	8,16 %
7	Resilienza e gestione dei rischi	resilience, disruption, covid, pandemic, agri, resilient, covid_pandemic, risk, micro, cybersecurity	7,48 %

Figura 19. Tabella dei principali cluster dell'algoritmo di bertopic

Il grafico dei topic word scores riportato in figura 20 evidenzia il peso statistico dei termini chiave offrendo un'analisi dell'identità semantica di ciascun cluster. Come riportato in figura ogni bargraph rappresenta un topic specifico dove la lunghezza delle barre orizzontali indica l'importanza relativa di ogni termine rispetto all'intero corpus documentale. Il primo topic si focalizza sulla sicurezza e sulla trasparenza della filiera. Le parole dominanti nel cluster sono blockchain, traceability e transparency. Seguono inoltre parole come agri e safety suggerendo come il cluster si concentri sul campo dell'agroalimentare e sulla sicurezza alimentare o di sistema. Il topic 1 viene rappresentato da diverse parole facenti parte delle tecnologie abilitanti della quarta rivoluzione industriale come l'intelligenza artificiale, la quarta rivoluzione industriale e il 3d printing. E' un cluster che rappresenta l'automazione intelligente nel contesto di industria 4.0. Il topic 2 si concentra sui processi produttivi, parole come control, model, simulation e automation indicano l'uso di software di simulazione e modelli digitali per ottimizzare i processi produttivi e per ridurre i costi. Le parole più importanti per il topic 3 rappresentano nuovi tipi di strategie orientate verso politiche circolari. Parole come circular_economy, circular e model rappresentano la ricerca in nuovi modelli riguardanti politiche circolari invece le parole energy e foodtech danno maggiore risalto al risparmio energetico e alla digitalizzazione del settore alimentare. Il topic 4 si focalizza sul controllo qualità di precisione. Vengono riportate parole come i sensori che permettono la raccolta dati e il monitoraggio in tempo reale e successivamente il termine hyperspectral imaging permette un controllo basato su centinaia di bande dello spettro elettromagnetico permettendo un controllo maggiormente accurato. Il topic 5 viene rappresentato attraverso le parole agri, transformation, economic, ecological e bioeconomic. Il tema centrale è la bioeconomia ovvero un concetto che mette insieme i modelli economici e con gli aspetti ecologici e inoltre viene accompagnata da una parola come trasformazione che sottolinea la necessità di cambiare nel settore agroalimentare. Il topic 6 si focalizza sugli aspetti legato alla sostenibilità più a livello istituzionale, economico e strategico. Questo topic si focalizza sulla visione aziendale orientata verso strategie sostenibili. Il topic 7 è caratterizzato da parole come resilience, disruption, covid, pandemic e agri. Questo topic è rappresentato da parole inerenti alla pandemia di covid 19 e come la filiera agroalimentare abbia dovuto affrontare questa sfida cercando di diventare il più possibile resiliente. L'insieme di questi bargraph permette di fare una sintesi dei temi principali che trattano i diversi topic andando a confermare l'interpretazione dei risultati e giustificando le etichette assegnate in precedenza.

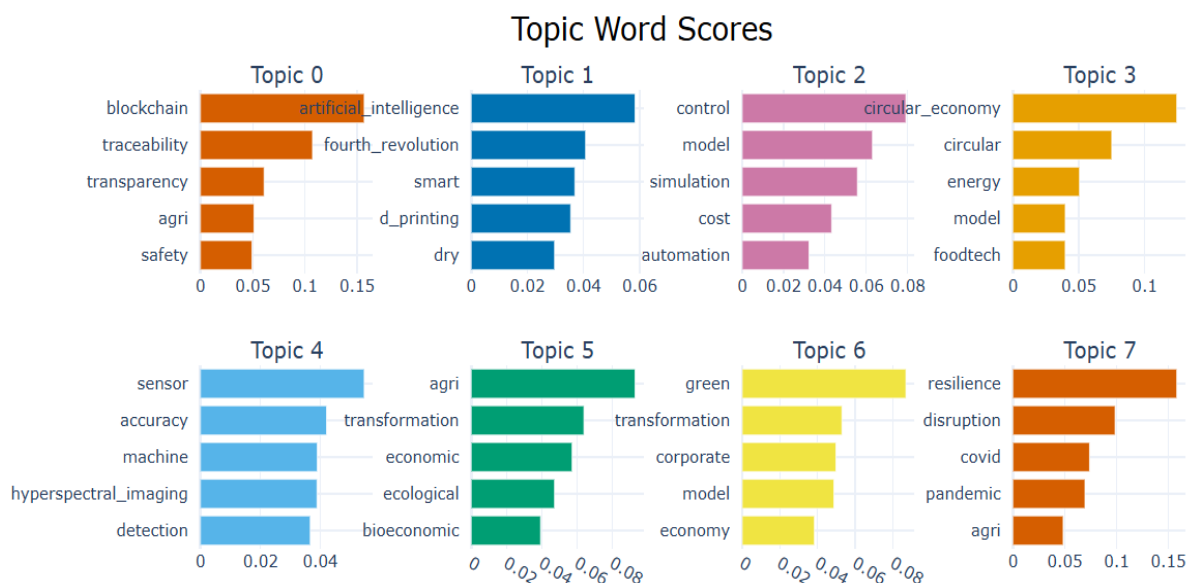


Figura 20. Grafico delle topic word scores

Dopo aver esaminato la composizione interna dei singoli cluster, la figura 21 rappresenta la mappa dei topic che permette di visualizzare la struttura macroscopica del corpus evidenziando non solo la distanza semantica tra i temi ma anche le potenziali sovrapposizioni. Dall'osservazione del grafico si può identificare immediatamente una netta suddivisione in due macro aree situate in quadranti opposti rispetto all'origine degli assi, questa separazione spaziale suggerisce che i documenti analizzati tendano a trattare i temi tecnologici e quelli strategici come domini indipendenti sebbene questi temi siano complementari all'interno del settore food and beverage. Nel quadrante inferiore sinistro si concentra il polo tecnologico industriale caratterizzato da quattro topic molto vicini tra loro che riflettono l'integrazione di tecnologie come intelligenza artificiale, sensori avanzati per il controllo qualità, l'automazione industriale e la simulazione. La loro prossimità indica una forte sovrapposizione confermando come queste tecnologie vengono spesso discusse in modo sinergico. Il quadrante superiore destro è il polo orientato alla sostenibilità e alla gestione del rischio dove si collocano i temi della resilienza post-pandemica e delle strategie circolari per la supply chain. La solidità della classificazione è testimoniata dalla quasi totale assenza di sovrapposizioni tra i cerchi, un indicatore del fatto di quanto bertopic sia riuscito a isolare nuclei tematici. La dimensione dei cerchi suggerisce inoltre un corpus omogeneo in cui nessuno degli otto temi prevale sugli altri. Questa mappa quindi rappresenta la distribuzione delle aree tematiche ma non riesce a cogliere le relazioni tra ciascun cluster, in questo caso la matrice delle similarità ci permette di mettere in relazione tra di loro i diversi topic riuscendo effettivamente a capire quanto sono simili e relazionati tra di loro.

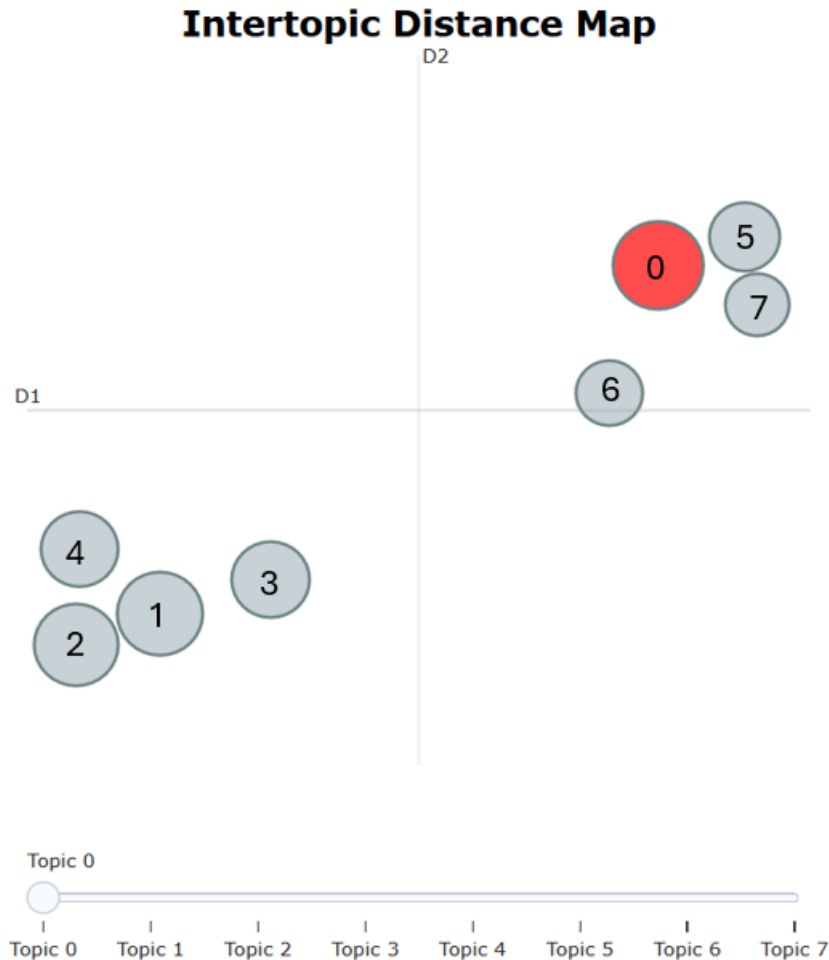


Figura 21 Mappa dei topic principali

La figura 22 rappresentante la matrice di similarità, evidenzia come i topic tra di loro siano caratterizzati da un'elevata coesione semantica dove i punteggi non scendono mai al di sotto della soglia dello 0.82. Questo dato suggerisce come i topic analizzati non siano tra di loro indipendenti. Dalla matrice delle similarità si può notare come il topic 1 riguardante i temi dello smart manufacturing sia fortemente correlato con i topic 2 e 4 che trattano a proposito di temi riguardanti la creazione di modelli di simulazione e sistemi di controllo avanzati e con i topic 3 e 5 che trattano a proposito di temi riguardanti le politiche circolari, la bioeconomia e la competitività economica nel settore. Il topic 2 ha una forte correlazione con i topic riguardanti la smart manufacturing e il controllo di qualità accurato quindi con i topic 1 e 4 e anche con i topic 3, 5, 6 che trattano a proposito di politiche circolari, bioeconomia e settore della supply chain sostenibile. Anche i topic 3,5,6 hanno una forte correlazione tra di loro, questa relazione era già stata evidenziata dalla mappa tra i topic, tutti e tre parlano a proposito di politiche circolari, politiche di gestione della supply chain in maniera sostenibile e bioeconomia. Risulta anche che tutti e tre i topic siano poco correlati con il topic 4 riguardante il controllo qualità accurato e la sensoristica. I topic 0, 4, 7 appaiono come i cluster più isolati del sistema presentando dei valori più bassi nelle intersezioni. Il topic 0 risulta fortemente correlato con i topic 5 e 6 riguardanti la transizione bioeconomica e la strategia e governane sostenibile. Il topic 4 risulta fortemente correlato con i

topic 1 e 2 riguardanti lo smart manufacturing e la modellazione e automazione dei processi. Il topic 7 è fortemente correlato con i topic 5 e 6 risultando simile al topic 0. Dai valori di prossimità calcolati nella matrice delle similarità si può ricavare, attraverso l’algoritmo di raggruppamento di bertopic, il dendrogramma che illustra graficamente la storia delle fusioni dei topic.

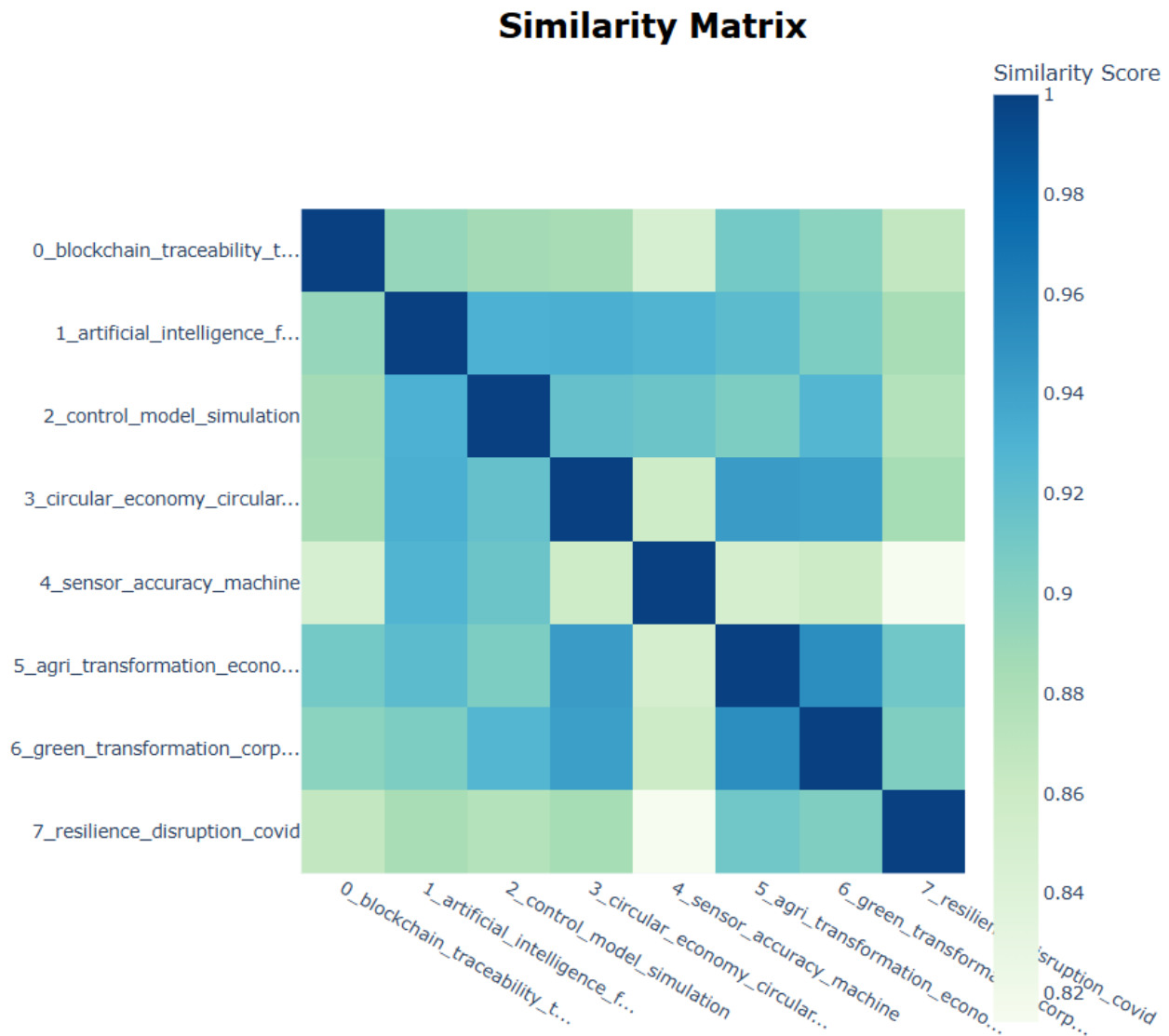


Figura 22 La matrice di similarità dei topic principali

Oltre alla matrice delle similarità, in figura 23 viene riportato il dendrogramma che permette di capire come i topic possano fondersi tra di loro individuando la similarità tra le tematiche. Il dendrogramma rivela come i diversi topic si ricongiungano attraverso rami progressivi permettendo di identificare le tematiche principali. Più i ricongiungimenti sono vicini allo 0 più i topic tra di loro sono simili. Nel primo gruppo verde il topic 1 riguardante lo smart manufacturing si fonde con il topic 4 riguardante la sensoristica e la spettroscopia per il controllo qualità. Questa fusione avviene prima di tutte evidenziando come questi due topic siano i più simili

del gruppo. Successivamente viene anche fuso il topic 2 che tratta a proposito di modellazione e automazione di processi. Nel secondo gruppo in rosso, si può notare la fusione iniziale tra i topic 5 e 6 inerenti alla transizione bioeconomica e competitività del settore agroalimentare e alla strategia e governance d'impresa sostenibile. Successivamente avviene la fusione con il topic 3 inerente all'economia circolare e alle politiche per l'innovazione. Questi 3 topic sono molto interconnessi tra di loro. In un secondo momento avviene la fusione con i topic 0 e 7 che riguardano la blockchain per la tracciabilità e la trasparenza e la resilienza e la gestione dei rischi. Questi topic sono più distaccati per tematiche, risulta di particolare interesse osservare come il cluster riguardante la blockchain pur essendo intrinsecamente una tecnologia digitale che ha come obiettivo la comunicazione e l'efficienza operativa si collochi nel secondo raggruppamento riguardante maggiormente modelli circolari e gli aspetti strategici. Tale posizionamento suggerisce come il suo ruolo venga percepito come quello di uno strumento abilitante per la trasparenza superando la dimensione di semplice tecnologia per diventare parte integrante della visione strategica aziendale. Da un lato si osserva quindi l'adozione di tecnologie avanzate per l'incremento dell'efficienza operativa mentre dall'altro si assiste a una riprogettazione strategica orientata alla resilienza e all'adozione di politiche circolari.

Hierarchical Clustering

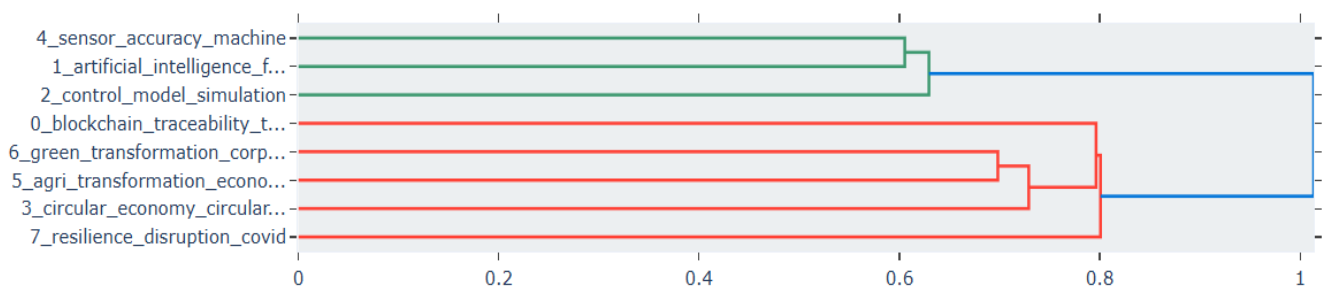


Figura 23 Dendrogramma dei principali topic

La figura 24 rappresenta il grafico di topic over time, analizzando il grafico è evidente come emerge una traiettoria di evoluzione tecnologica che si divide in due fasi distinte separate dall'anno 2020. Nella prima parte del periodo, che va dal 2014 fino a circa il 2019, assistiamo a una fase di latenza in cui tutti i temi mantengono frequenze minime. La situazione muta con l'inizio del nuovo decennio, quando si innesca un'accelerazione verticale che coinvolge simultaneamente quasi ogni area di ricerca, portando la maggior parte delle tematiche a raggiungere il proprio apice nel biennio tra il 2023 e il 2024. È interessante notare come l'esplosione dei temi legati alla resilienza e alla gestione delle pandemie abbia agito da vettore per una rapida trasformazione digitale, confermando come l'instabilità globale abbia spinto il sistema verso una digitalizzazione più matura. Il grafico evidenzia la maturazione dei temi legati alla sostenibilità e alla transizione ecologica, con particolare riferimento all'economia circolare e alla trasformazione green delle piccole e medie imprese. Questi argomenti mostrano una crescita estremamente rapida negli ultimi tre anni, segno di una convergenza tra gli obiettivi ambientali e la digitalizzazione.

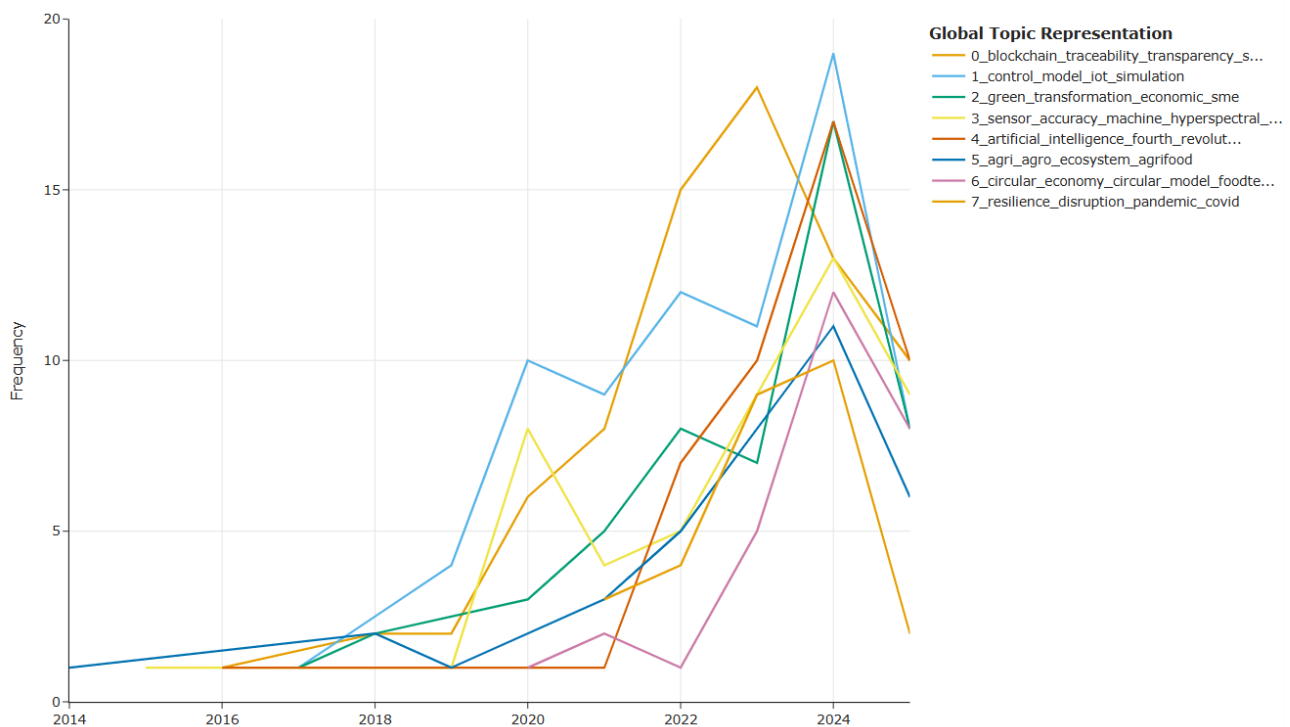


Figura 24. Grafico di topic over time

Oltre all'analisi del modello di bertopic scelto, è stata portata avanti anche un'analisi su tre modelli di bertopic riguardanti tre periodi diversi. La figura 25 mostra la sintesi dei contenuti che sono stati trovati. Sono stati analizzati i periodi tra il 2010 e il 2020, tra il 2021 e il 2022 e tra il 2023 e il 2025. Questa analisi suddivisa in periodi ha permesso di far emergere le diverse tematiche che si sono sviluppate nell'arco del tempo. L'analisi è stata fatta per confermare i risultati di ricerca precedenti e per evidenziare l'evoluzione delle tematiche inerenti ai tre periodi diversi. Nelle tabelle sotto riportate vengono analizzati i cluster principali dei tre modelli di bertopic. Dal grafico si può notare come i temi trattati nei tre periodi siano molto simili tra di loro, è utile notare come dall'anno 2021-2022 si aggiunga il tema inerente alla resilienza della filiera dopo il periodo pandemico da covid 19 e come anche nel periodo 2023-2025 i temi trattati siano molto simili ai periodi precedenti ma con una maggiore frammentazione andando ad evidenziare come ci sia stato uno sviluppo della letteratura nella trasformazione digitale nel settore del food and beverage. In questo periodo i temi trattati risultano sempre appartenenti ad aree come il controllo qualità avanzato, lo smart manufacturing, la sostenibilità e le politiche circolari e la resilienza della filiera post pandemia ma con una maggiore frammentazione delle tematiche.

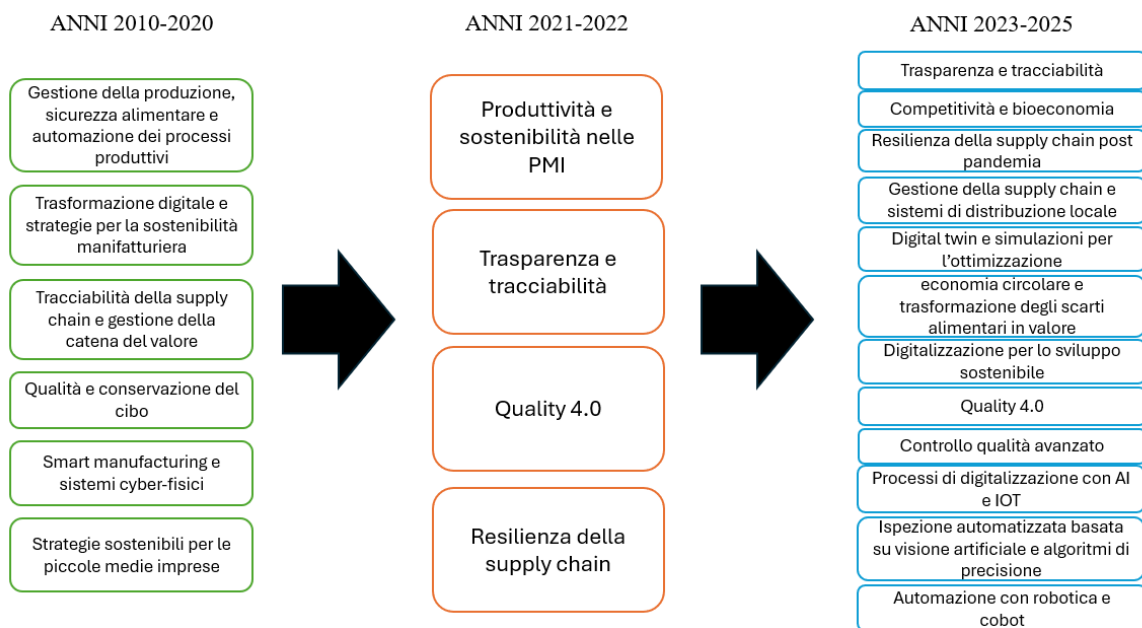


Figure 25 Analisi temporale dei 3 modelli di bertopic basati su 3 periodi distinti

4.3 Risultati dell'analisi qualitativa

L'analisi qualitativa come evidenziato nella metodologia si è basata sull'analisi di un campione di 54 documenti estratti dai cluster creati dall'algoritmo di topic modeling di bertopic. L'analisi dei risultati di questa fase prevede inizialmente l'individuazione delle principali tecnologie che sono state analizzate nei 54 articoli. La figura 26 rappresenta il numero di volte che una determinata tecnologia è stata citata all'interno del campione dei documenti permettendo un'approfondita analisi su quali siano le tecnologie più influenti nel panorama accademico. Nel settore del food and beverage queste tecnologie non lavorano in maniera isolata ma lavorano in sinergia in modo tale da garantire una maggiore efficienza produttiva, una maggiore qualità di prodotto e un miglioramento della sostenibilità ambientale, economica e sociale. Al vertice della classifica troviamo come tecnologia principale l'internet of things spesso associata con la sensoristica. L'internet of things viene interpretata come la rete capillare di sensori che trasferiscono i dati ai registri elettronici che rendono i dati immutabili e condivisibili tra macchine o attori. E' una tecnologia che spesso si integra con tecnologie come la blockchain, gli smart contracts, il machine learning, le tecnologie ottiche e l'intelligenza artificiale. I sensori di internet of things si basano sul monitoraggio in tempo reale, spesso permettono di monitorare i costituenti alimentari o i parametri del processo come possono essere l'umidità, la temperatura e i gas come l'etilene.

Le 20 tecnologie più rilevanti

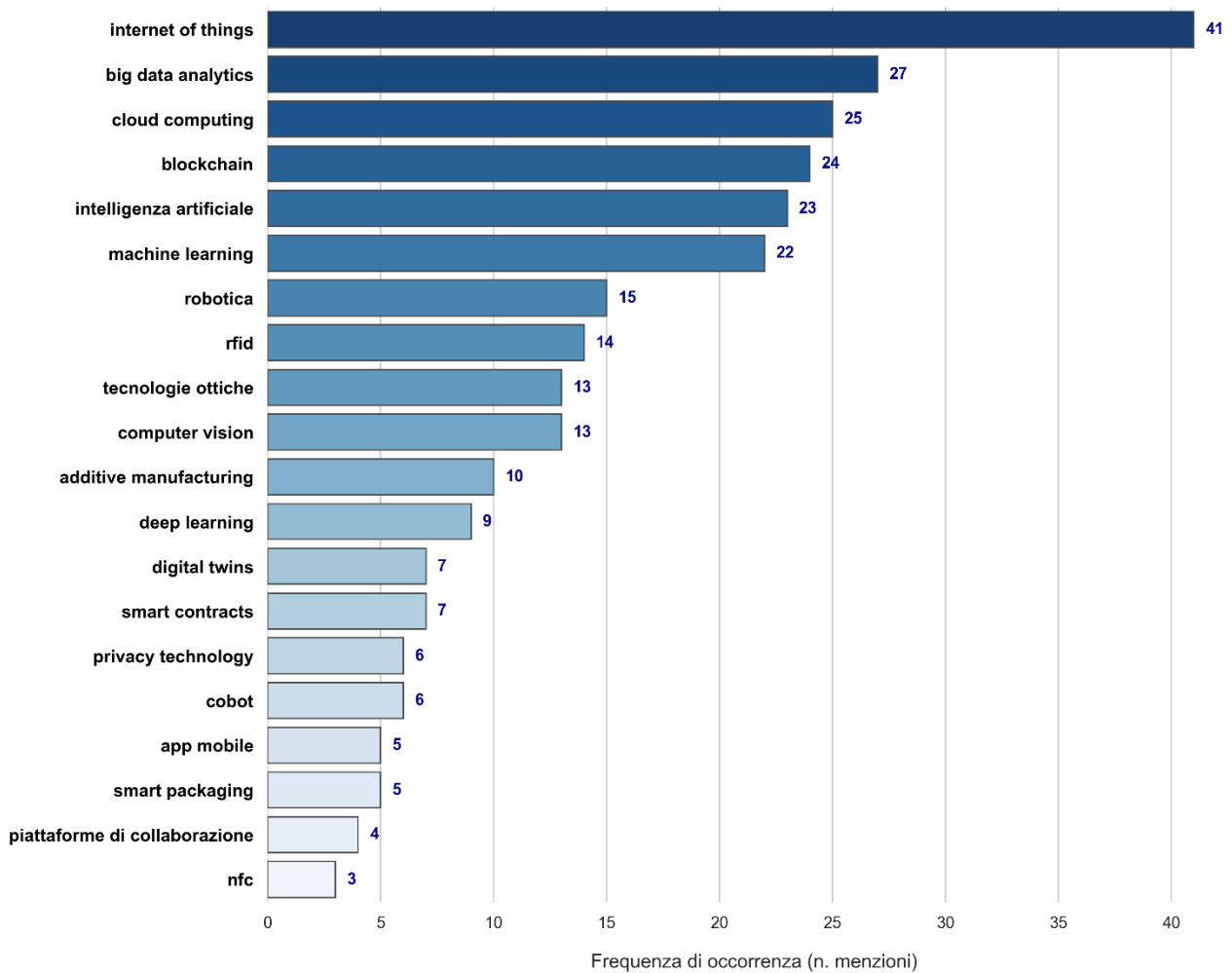


Figura 16. Classifica delle principali tecnologie dell'analisi qualitativa

Durante il monitoraggio delle varie fasi della catena, l'infrastruttura dell'internet of things ha anche il compito di raccogliere i dati inerenti alle interruzioni della catena del freddo e anche di raccogliere dati e di verificarli per permettere la tracciabilità digitale assicurando l'origine di provenienza e la sicurezza alimentare dei prodotti. In combinazione con l'intelligenza artificiale e le tecnologie ottiche, l'infrastruttura di internet of things è in grado di rilevare in tempo reale i prodotti difettosi nelle varie fasi di processo e anche di velocizzare i controlli e quindi aumentare l'efficienza del controllo qualità. La valorizzazione di tutti questi dati avviene attraverso tecnologie come i big data analytics che hanno la capacità di gestire ed elaborare grandi quantità di dati. Come citato da diversi articoli del campione preso in considerazione, l'infrastruttura di big data analytics permette di svolgere diverse funzioni come la manutenzione predittiva, l'ottimizzazione delle scorte e della shelf life di prodotto, il controllo qualità avanzato ed è anche di supporto alle decisioni aziendali a livello operativo e strategico. Per quanto riguarda la manutenzione predittiva, spesso l'infrastruttura di big data analytics si integra con tecnologie come il machine learning, il deep learning e l'intelligenza artificiale oltre all'internet of things. La loro funzione è l'analisi dei dati storici e in tempo reale dei macchinari permettendo di prevedere la loro vita utile residua consentendo di intervenire prima che avvenga un guasto. Questa funzione

permette la riduzione dei fermi macchina e quindi una maggiore efficienza produttiva e anche una riduzione dei costi di riparazione. Per quanto riguarda l'ottimizzazione delle scorte e della shelf life di prodotto, il sistema è in grado di analizzare i parametri ambientali e attraverso le tecnologie ottiche di analizzare la composizione alimentare. L'incrocio di queste serie di dati permette di prevedere con precisione la data di scadenza di un prodotto aiutando a gestire al meglio le scorte e a ridurre lo spreco alimentare. Come detto precedentemente, l'integrazione di tecnologie ottiche insieme al machine learning, all'intelligenza artificiale e ai big data analytics permette un controllo qualità avanzato. Attraverso questo sistema si riesce ad identificare la composizione chimica dei vari alimenti come la percentuale di grasso, la presenza di adulteranti e la freschezza. Le infrastrutture di big data analytics possono essere anche di sostegno per le decisioni aziendali a livello operativo e strategico, possono identificare inefficienze operative nella produzione e nella logistica come per esempio la gestione sbagliata di politiche di inventario o l'identificazione di colli di bottiglia durante la produzione portando a una riduzione degli sprechi e di conseguenza verso strategie legate alla sostenibilità. Tra le tecnologie più importanti riportate dall'analisi qualitativa risulta la blockchain che funge da registro digitale condiviso, decentralizzato e immutabile lungo l'intera filiera. A differenza dei sistemi informativi che si affidano a un'autorità centrale per validare le transazioni e conservare le informazioni, la blockchain distribuisce il controllo su un'intera rete di nodi indipendenti. La blockchain consente la piena tracciabilità e trasparenza lungo tutto il percorso dal produttore iniziale fino al consumatore finale permettendo di tracciare ogni passaggio e verificando al tempo stesso l'autenticità delle merci e il rispetto degli standard di sicurezza. La blockchain permetterebbe di ridurre i rischi di frodi alimentari o di contraffazioni consentendo anche una gestione efficiente dei ritiri di prodotti contaminati e assicurando un isolamento dei lotti difettosi senza il bisogno di bloccare intere linee di produzione. Spesso insieme alla blockchain e all'infrastruttura di internet of things, vengono integrate tecnologie come gli smart contracts. Gli smart contracts sono protocolli digitali che eseguono automaticamente clausole contrattuali al verificarsi di determinate condizioni predefinite. All'interno della filiera alimentare, gli smart contracts sono integrati insieme a tecnologie come i sensori di internet of things e i sensori RFID che consentono di attivare azioni immediate come il blocco di un pagamento o l'invio di un alert se viene rilevata una interruzione termica durante il trasporto. Gli smart contracts riducono il passaggio di documenti cartaceo, i tempi di verifica e i margini di errore umano assicurando una conformità costante agli standard di sicurezza. Un'altra tecnologia particolarmente citata nei diversi documenti è il cloud computing che rappresenta l'architettura portante nella moderna infrastruttura tecnologica. Il cloud computing consente di far interagire tra di loro tutte le altre tecnologie come l'intelligenza artificiale e i modelli di analisi dei big data e permette all'infrastruttura di operare alla massima velocità offrendo una potenza di calcolo scalabile. La condivisione dei dati facilita la collaborazione tra i diversi attori della filiera permettendo di interagire su piattaforme comuni e garantendo che le informazioni siano sempre aggiornate e consultabili. Tra le altre tecnologie più importanti che vengono citate nel campione dei documenti troviamo i robot e i cobot. La robotica industriale è progettata per l'automazione ad alta velocità e la precisione di compiti ripetitivi, spesso viene usata per la pallettizzazione pesante o per il taglio automatizzato di cibi. A differenza dei robot tradizionali, i cobot sono progettati per lavorare insieme all'essere umano, possono svolgere compiti di

precisione come attività di picking di prodotti delicati, il confezionamento o il controllo qualità visivo. Inoltre, tra le tecnologie più importanti troviamo i sensori RFID che fanno parte di un sistema di identificazione wireless che utilizza tag e lettori per trasmettere dati tramite onde radio senza la necessità di un contatto visivo diretto. I sensori RFID permettono la lettura simultanea di centinaia di oggetti accelerando le operazioni di inventario e logistica, consentono una tracciabilità automatizzata dal campo alla tavola di ogni singolo prodotto e inoltre possono rilevare interruzioni della catena del freddo. Per il controllo qualità avanzato, emergono tra le tecnologie più importanti le tecnologie ottiche che sono strumenti essenziali per il controllo qualità non distruttivo. Queste tecnologie permettono di analizzare gli alimenti e le loro proprietà attraverso l'interazione tra la luce e la materia. Tra le tecnologie ottiche troviamo le tecnologie ottiche vibrazionali che misurano il modo in cui i legami chimici all'interno delle molecole vibrano quando interagiscono con la luce permettendo di analizzare la composizione chimica del prodotto. Tra le tecnologie ottiche vibrazionali esiste la near infrared technology, la fourier transform infrared spectroscopy e la spettroscopia raman. La near infrared spectroscopy è la più utilizzata e permette un controllo qualità rapido e su larga scala. Questa tecnologia utilizza una regione dello spettro tra i 780 e i 2500 nanometri che permette alla luce di analizzare i diversi legami ad idrogeno C-H, N-H, O-H. Questa tecnologia viene utilizzata per la previsione della shelf-life e per la determinazione della composizione di grassi e di umidità in diverse specie ittiche e carni. La fourier transform infrared spectroscopy è generalmente operante nel medio infrarosso e viene soprannominata MIR, questa tecnologia grazie alla trasformata di fourier acquisisce dati ad alta risoluzione spettrale su un ampio intervallo ed è molto sensibile alle variazioni della struttura molecolare. Grazie a questa tecnologia si riesce a riconoscere l'intera composizione chimica del prodotto riuscendo ad evitare frodi alimentari. Come ultima tecnologia ottica vibrazionale, viene studiata la spettroscopia raman. Questa tecnologia ottica si basa sulla diffusione anelastica ovvero quando un raggio laser colpisce una molecola la maggioranza dei fotoni rimbalza ma una piccolissima frazione scambia energia con le vibrazioni molecolari riemergendo con una frequenza diversa. Questo spostamento di frequenza fornisce informazioni sulla struttura chimica del prodotto. Questa caratteristica rende la spettroscopia raman lo strumento ideale per analizzare liquidi o qualsiasi alimento ad alto contenuto di umidità. Esistono inoltre tecnologie ottiche come l'imaging multispettrale e l'imaging iperspettrale. L'imaging multispettrale è una tecnologia ottica che cattura immagini permettendo di mappare sia l'aspetto visivo sia la composizione chimica di un alimento. L'integrazione tra l'imaging multispettrale e l'intelligenza artificiale permette infine di classificare rapidamente i prodotti e di ridurre gli sprechi. L'imaging iperspettrale è una tecnologia ottica avanzata che cattura centinaia di bande spettrali per pixel creando una combinazione tra visione spaziale e analisi chimica profonda. L'imaging iperspettrale permette ispezioni non distruttive in tempo reale identificando anomalie molecolari e contaminanti. Oltre al controllo qualità avanzato attraverso le tecnologie ottiche troviamo tecnologie come la computer vision. La realtà virtuale insieme alla realtà aumentata fanno parte delle tecnologie di computer vision e sono tecnologie fondamentali per l'interazione uomo-macchina. La realtà aumentata sovrappone elementi digitali al mondo fisico permettendo di visualizzare dati in tempo reale direttamente sui macchinari tramite visori o smartphone. Viene spesso utilizzata per la manutenzione assistita dove guide grafiche indicano i componenti su cui intervenire e per il picking virtuale

dove viene utilizzato per il picking nei magazzini alimentari. La virtual reality crea un ambiente digitale e immersivo isolando l'utente dalla realtà esterna permettendo di simulare scenari complessi. Viene utilizzata per la progettazione virtuale di linee produttive per testarne l'efficienza prima della costruzione fisica e viene anche utilizzato come strumento di formazione permettendo al personale di imparare procedure di sicurezza e igiene in un ambiente privo di rischi. Tra le tecnologie più importanti troviamo l'additive manufacturing, nel settore alimentare questa tecnologia permette di creare geometrie più complesse per i prodotti alimentari e di creare prodotti con una determinata composizione nutrizionale per soddisfare la necessità di diete personalizzate. Nella parte finale della classifica, vengono citate tecnologie come i digital twins che vengono utilizzati per modellare in maniera digitale intere linee di produzione in modo tale da ottimizzare la produzione e i parametri di processo come temperatura, pressione e tempi di miscelazione dei liquidi. Con l'aumento della tracciabilità delle fasi e con l'aumento dei dati raccolti lungo la filiera, le privacy technology diventano delle tecnologie essenziali per garantire la sicurezza dei dati e la condivisione dei dati tra gli attori della filiera in maniera protetta. Le app mobile sono invece tecnologie che permettono la comunicazione tra produttore e consumatore specialmente nella fase di vendita. La loro funzione principale riguarda la condivisione delle informazioni dove al consumatore finale viene data la possibilità di scansionare un prodotto per verificarne l'origine, gli allergeni e l'impatto ambientale. La tecnologia riguardante lo smart packaging consente attraverso sensori e indicatori di tempo e temperatura di capire se la catena del freddo è stata interrotta fornendo uno strumento utile per ottenere una garanzia di qualità superiore rispetto alla semplice data di scadenza. Oltre alla blockchain e al cloud computing già citati precedentemente, esistono anche le piattaforme di collaborazione basate sul cloud che permettono lo scambio di informazioni in tempo reale. Questo coordinamento è fondamentale per gestire i richiami di prodotti difettosi in tempi rapidi e per implementare strategie che permettano la riduzione di scorte di magazzino. L'ultima tecnologia citata nella classifica è la tecnologia NFC che a differenza del QR code, offre una maggiore sicurezza contro la contraffazione. Questa tecnologia consente al consumatore finale di accedere alla storia del prodotto, alle certificazioni bio o al suggerimento di possibili ricette mentre dal punto di vista dell'azienda c'è una maggiore informazione riguardante il luogo e il momento della vendita del prodotto. Questa classifica che evidenzia la rilevanza tecnologica deve andare di pari passo con l'implementazione di queste tecnologie lungo la filiera del settore del food and beverage. La figura 27 riportata rappresenta la struttura di una heatmap con le venti tecnologie più importanti e le varie fasi della catena del valore nel settore del food and beverage. Questo grafico è fondamentale perché permette di identificare non solo quali tecnologie siano rilevanti ma soprattutto dove esse esercitino il maggiore impatto operativo rivelando la densità dell'innovazione digitale lungo il percorso che va dal design del prodotto fino al consumo finale. L'asse delle ordinate elenca le tecnologie già analizzate mentre l'asse delle ascisse riporta le diverse fasi della filiera. L'intensità del colore indica la frequenza di occorrenza fornendo l'informazione su dove si concentra maggiormente l'innovazione.

Heatmap: Tecnologie vs Fasi Value Chain

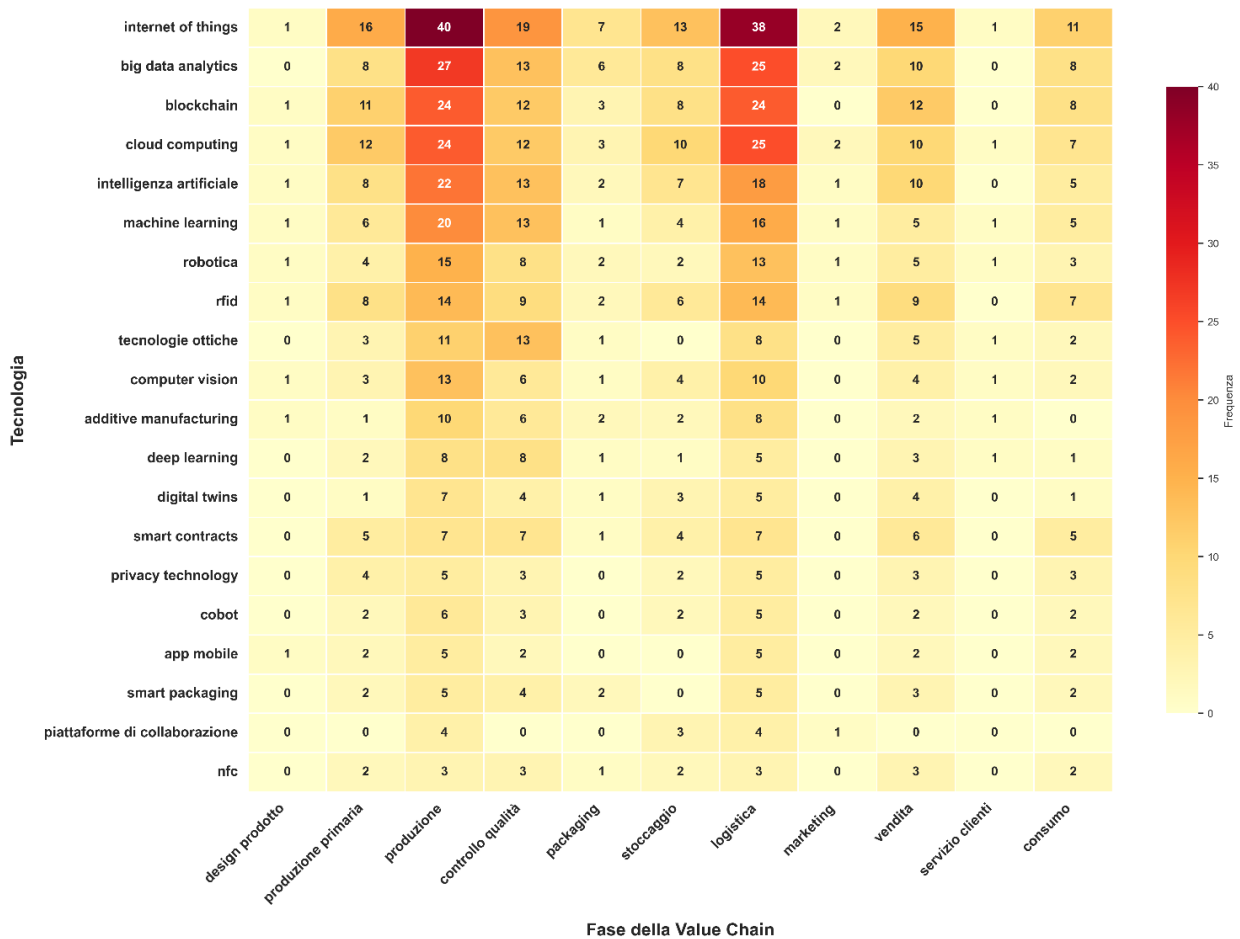


Figure 27 Heatmap tra tecnologie e fasi della catena

Dall'osservazione della mappa emerge con estrema chiarezza come l'integrazione tecnologica si concentri prevalentemente nelle fasi di produzione e logistica che si presentano come le colonne verticali più scure dell'intero grafico. La fase di produzione rappresenta la fase con la più alta innovazione dove tecnologie come l'internet of things, i big data analytics, la blockchain e il cloud computing raggiungono i loro picchi di applicazione. Questo dato evidenzia come la trasformazione digitale nel settore del food and beverage si concentri maggiormente nella fase di produzione dove la raccolta, l'analisi dei dati in tempo reale e la tracciabilità lungo la catena siano essenziali per migliorare l'efficienza operativa e la qualità di prodotto. La fase della logistica mostra valori quasi identici confermando come la gestione dei flussi fisici vada di pari passo con la gestione dei flussi informativi grazie a tecnologie come la blockchain e l'internet of things che garantiscono la tracciabilità e il monitoraggio in tempo reale lungo la catena. Dal grafico si intuisce come una tecnologia come l'internet of things sia molto trasversale ovvero viene applicata in molte fasi della catena mantenendo una presenza significativa anche nella produzione primaria, nel controllo qualità e nella vendita. Si possono notare anche diverse tecnologie che si concentrano in determinati settori, per esempio le tecnologie ottiche e il machine learning mostrano una concentrazione specifica nella fase di controllo qualità a dimostrazione di come l'automazione dell'ispezione visiva sia diventata molto importante per garantire la sicurezza alimentare e l'efficienza operativa nel controllo riducendo i tempi. Una curiosità di

questo grafico è l'importanza della fase di vendita, i colori intensi evidenziano come venga approfondita questa fase nei diversi documenti analizzati e come l'internet of things, la blockchain e l'intelligenza artificiale siano le principali tecnologie di interesse in questa fase andando a testimoniare la condivisione delle informazioni di prodotto fino al momento dell'acquisto. Esaminando anche le zone più chiare della heatmap si individuano le fasi che risultano meno coinvolte dalla trasformazione digitale. Fasi come il design di prodotto, il marketing, il servizio clienti e le risorse umane presentano frequenze molto basse. Questo dato suggerisce come la trasformazione digitale nel food and beverage sia focalizzata sull'efficienza del processo e sulla garanzia del prodotto lasciando ancora ampi margini di sviluppo per l'innovazione negli aspetti più sociale e di progettazione. Anche il packaging mostra valori moderati indicando come lo smart packaging sia un'innovazione ancora in fase di consolidamento. La figura delinea un modello di maturità digitale diviso in due parti, da un lato una forte digitalizzazione in ambiti come produzione, logistica, controllo qualità e vendita e dall'altro lato una serie di fasi dove la trasformazione digitale deve ancora esprimere il suo pieno potenziale. Nella sezione finale dell'analisi qualitativa viene messa in risalto la relazione tra i diversi cluster tecnologici, i meccanismi e i fattori che descrivono la relazione tra la qualità di prodotto o processo e la sostenibilità ambientale, sociale ed economica. La figura riporta uno schema riassuntivo dell'analisi che verrà portata avanti.



Nel primo blocco vengono riportati i cluster tecnologici che sono stati formati. Per la formazione dei cluster è stata considerata come linea guida la lettura dei paper e la classificazione del modello di bertopic. Le tecnologie citate precedentemente sono state divise in quattro cluster rispettivamente riguardanti la tracciabilità digitale e la connettività tra le tecnologie, il controllo qualità avanzato in ottica quality 4.0, la smart manufacturing e la privacy e la sicurezza. I cluster tecnologici sono stati collegati successivamente ai diversi meccanismi che generano. Nei diversi blocchi sotto riportati, vengono ripresi i diversi macromeccanismi e i micromeccanismi di appartenenza che sono stati analizzati.



MONITORAGGIO REAL-TIME

- **Raccolta dati**
- **Analisi dati**
- **Monitoraggio frodi**
- **Monitoraggio temperatura**
- **Monitoraggio umidità**
- **Monitoraggio condizioni chimiche**
- **Monitoraggio composizione chimica dei prodotti**
- **Monitoraggio pH**
- **Monitoraggio del suolo**
- **Monitoraggio colore**
- **Monitoraggio forma**
- **Monitoraggio dei difetti**
- **Monitoraggio viscosità**
- **Monitoraggio densità**
- **Analisi immagini**
- **Analisi chimico strutturale dei prodotti**
- **Monitoraggio della salute delle colture**

COMUNICAZIONE

- **Connettività tra macchine**
- **Comunicazione tra attori della filiera**

OTTIMIZZAZIONE

- **Ottimizzazione della distribuzione**
- **Ottimizzazione dei consumi energetici**
- **Ottimizzazione dei parametri di processo**
- **Ottimizzazione uso dei fertilizzanti**
- **Ottimizzazione gestione dell'acqua**
- **Ottimizzazione della gestione dell'inventario**
- **Ottimizzazione gestione delle materie prime**
- **Ottimizzazione dei tempi di produzione**

PREVISIONE

- **Analisi predittiva delle contaminazioni**
- **Analisi predittiva per la produzione**
- **Manutenzione predittiva**
- **Previsioni sulla domanda di mercato**
- **Previsione dei cambiamenti delle condizioni metereologiche**
- **Previsione degli sprechi**
- **Previsione della shelf life dei prodotti**
- **Previsione del comportamento dei consumatori**
- **Previsione delle interruzioni della catena**

SICUREZZA DATI

- **Gestione dei permessi per oscurare dati sensibili a terzi**
- **Protezione sistema informatico**

PERSONALIZZAZIONE

- **Produzione cibo per strati**
- **Progettazione personalizzata dei processi**
- **Progettazione personalizzata dei prodotti**
- **Personalizzazione nutrizionale del cibo**

EDUCAZIONE E APPRENDIMENTO

- **Programmi di formazione per i dipendenti**
- **Attività per l'apprendimento di nuove conoscenze**

Questi meccanismi che sono stati analizzati sono stati successivamente collegati alle relazioni tra la qualità di prodotto o processo e la sostenibilità sociale, ambientale o economica. In seguito, vengono riportati i fattori principali che fanno parte delle sinergie, dei trade-off e delle neutralità tra la qualità di prodotto o processo e la sostenibilità sociale, economica e ambientale. Per rendere più interpretabili le sinergie, i tradeoff e le neutralità è stato deciso di suddividere i vari fattori in cinque categorie riguardanti la trasparenza e l'autenticità di prodotto, la valorizzazione delle risorse e le politiche circolari, l'efficienza operativa e l'automazione, la formazione e la collaborazione tra attori, la qualità di prodotto. Come detto in precedenza nelle varie sezioni vengono riportati i diversi fattori che hanno caratterizzato la relazione tra qualità e sostenibilità.

SINERGIE TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI LA TRASPARENZA E L'AUTENTICITA' DI PRODOTTO

- Una maggiore tracciabilità delle varie fasi della filiera e quindi una maggiore qualità di processo permette di ridurre gli sprechi e di conseguenza riduce i costi sugli sprechi e l'impatto ambientale consentendo di aumentare la sostenibilità economica e ambientale
- Una maggiore tracciabilità delle varie fasi della filiera e quindi una maggiore qualità di processo permette di aumentare la fiducia del consumatore e quindi di aumentare la sostenibilità sociale
- Una maggiore trasparenza delle varie fasi della filiera e quindi una maggiore qualità di processo consente di gestire al meglio l'utilizzo dell'acqua e quindi di aumentare la sostenibilità ambientale
- Una maggiore trasparenza delle varie fasi della filiera e quindi una maggiore qualità di processo permette di ottenere una migliore gestione del suolo e quindi di aumentare la sostenibilità ambientale
- Una maggiore privacy dei dati e quindi una maggiore qualità di processo permette di ridurre i conflitti tra attori e quindi di aumentare la sostenibilità sociale
- La garanzia di autenticità del prodotto e quindi una maggiore qualità di prodotto consente di aumentare la fiducia del consumatore e quindi di aumentare la sostenibilità sociale
- La garanzia di autenticità del prodotto e quindi una maggiore qualità di prodotto permette di aumentare la fiducia nel marchio e il valore economico e quindi di aumentare la sostenibilità economica
- Una promozione dell'economia locale derivante dalla garanzia di autenticità del prodotto e quindi una maggiore qualità di prodotto permette di aumentare il valore del territorio e quindi di aumentare la sostenibilità sociale ed economica

SINERGIE TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI L'EFFICIENZA OPERATIVA E L'AUTOMAZIONE

- Una maggiore efficienza operativa e quindi una maggiore qualità di processo permette di ridurre i costi operativi e quindi di aumentare la sostenibilità economica
- Una riduzione di errori umani e burocrazia e quindi una maggiore qualità di processo permette di ridurre i costi operativi e di pianificazione e quindi di aumentare la sostenibilità economica
- L'automazione di attività ripetitive e faticose e quindi una maggiore qualità di processo permette di migliorare la soddisfazione dei dipendenti e quindi di aumentare la sostenibilità sociale

SINERGIE TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI LA VALORIZZAZIONE DELLE RISORSE E LE POLITICHE CIRCOLARI

- Una maggiore gestione della shelf life e quindi una maggiore qualità di prodotto permette di ridurre lo spreco di cibo e quindi di aumentare la sostenibilità ambientale
- Una maggiore gestione della shelf life e quindi una maggiore qualità di prodotto permette di ottenere maggiori vendite e quindi di aumentare la sostenibilità economica
- Un maggiore controllo della temperatura e quindi una maggiore qualità di prodotto e di processo permette di ridurre gli sprechi e di ottenere maggiori risparmi energetici permettendo di aumentare la sostenibilità ambientale ed economica
- Una maggiore efficienza energetica e quindi una maggiore qualità di processo permette di ridurre i costi energetici e quindi di aumentare la sostenibilità economica e ambientale
- La trasformazione degli scarti di produzione in produzione di nuova energia per l'azienda e quindi una maggiore qualità di processo permette di ridurre i costi di approvvigionamento energetico e quindi di aumentare la sostenibilità economica e ambientale
- Il riciclo e la rigenerazione di prodotti e quindi una maggiore qualità di prodotto/processo permette di ottenere un minor utilizzo di risorse naturali e quindi di aumentare la sostenibilità ambientale
- Un packaging biodegradabile e quindi una maggiore qualità di prodotto permette di ridurre l'utilizzo di plastica e quindi di aumentare la sostenibilità ambientale
- Una maggiore gestione dei rifiuti e quindi una maggiore qualità di processo permette di ottenere una maggiore protezione della biodiversità e quindi di aumentare la sostenibilità ambientale

SINERGIE TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI LA FORMAZIONE E LA COLLABORAZIONE

- Una maggiore formazione e quindi una maggiore qualità di processo permette di aumentare l'efficienza e quindi di aumentare la sostenibilità economica
- Una formazione programmata e quindi una maggiore qualità di processo permette di ridurre i costi di formazione non necessaria e quindi di aumentare la sostenibilità economica
- Una riduzione dei difetti derivante dalla maggiore formazione e quindi una maggiore qualità di processo permette di ridurre gli scarti e i costi di ri-lavorazione, aumentando la sostenibilità economica e ambientale
- Una maggiore collaborazione tra attori e quindi una maggiore qualità di processo permette di aumentare l'inclusività e quindi di aumentare la sostenibilità sociale
- Una maggiore condivisione del rischio tra gli attori e quindi una maggiore qualità di processo permette di ottenere una maggiore inclusività e quindi di aumentare la sostenibilità sociale

SINERGIE TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI LA QUALITA' DEL PRODOTTO

- Una maggiore sicurezza alimentare e quindi una maggiore qualità di prodotto permette di aumentare la fiducia del consumatore e quindi di aumentare la sostenibilità sociale
- Una maggiore personalizzazione del prodotto e quindi una maggiore qualità di prodotto permette di aumentare la soddisfazione del cliente e quindi di aumentare la sostenibilità sociale
- Un migliore profilo nutrizionale del prodotto e quindi una maggiore qualità di prodotto permette di ridurre le emissioni e quindi di aumentare la sostenibilità ambientale

Dopo aver citato i diversi fattori inerenti alle sinergie tra qualità e sostenibilità, vengono riportati i fattori riguardanti i trade-off tra qualità e sostenibilità. In questi casi un aumento della qualità comporta una riduzione della sostenibilità.

TRADE-OFF TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI LA TRASPARENZA E L'AUTENTICITA' DI PRODOTTO

- Una maggiore condivisione di informazioni tra attori e quindi una maggiore qualità di processo può portare a problemi sulla privacy e sulla riservatezza dei dati industriali riducendo la sostenibilità sociale ed economica
- Una maggiore trasparenza delle fasi della filiera e quindi una maggiore qualità di processo può portare a problemi della privacy e alla diffusione di dati sensibili tra gli attori riducendo la sostenibilità sociale

TRADE-OFF TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI L'EFFICIENZA OPERATIVA E L'AUTOMAZIONE

- Una maggiore quantità di informazioni e dati gestiti e quindi una maggiore qualità di processo può rendere il sistema tecnologico più lento e meno reattivo, riducendo la sostenibilità economica
- Una maggiore automazione e quindi una maggiore qualità di processo può portare a una riduzione dei posti di lavoro, riducendo la sostenibilità sociale
- La riduzione al minimo delle scorte per risparmiare sui costi può generare insicurezza alimentare in caso di interruzioni della filiera, riducendo la sostenibilità sociale

TRADE-OFF TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI LA VALORIZZAZIONE DELLE RISORSE E LE POLITICHE CIRCOLARI

- L'innovazione tecnologica e quindi una maggiore qualità di processo può aumentare la complessità dello smaltimento dei componenti a fine vita, creando un conflitto con l'economia circolare e riducendo la sostenibilità ambientale
- L'utilizzo di packaging spesso necessario per garantire una maggiore qualità di prodotto e conservazione può contrastare gli obiettivi di riduzione dei rifiuti e dell'impatto ambientale, riducendo la sostenibilità ambientale
- Una maggiore gestione dei dati e quindi una maggiore qualità di processo può portare a un maggiore consumo di energia, riducendo la sostenibilità ambientale

TRADE-OFF TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI LA FORMAZIONE E LA COLLABORAZIONE

- L'esigenza di alti investimenti tecnologici e quindi una necessaria qualità di processo elevata può portare all'esclusione dei piccoli produttori dalla filiera, riducendo la sostenibilità sociale
- La necessità di alti investimenti iniziali per l'implementazione tecnologica può rappresentare un ostacolo finanziario per le imprese, riducendo la sostenibilità economica
- L'implementazione delle tecnologie e quindi la ricerca di una maggiore qualità di processo porta a maggiori costi sulla formazione del personale, riducendo la sostenibilità economica
- L'adozione di processi standardizzati può portare a una svalutazione della cultura e delle abitudini locali, riducendo la sostenibilità sociale

TRADE-OFF TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI LA QUALITA' DEL PRODOTTO

- Il tentativo di ottenere una maggiore qualità di prodotto come l'estetica perfetta e la conservazione prolungata può portare a un aumento delle sostanze chimiche utilizzate, riducendo la sostenibilità ambientale e sociale
- La ricerca di una costante varietà di prodotto si scontra con la stagionalità richiesta dalla sostenibilità ambientale, portando a un aumento dei consumi energetici o all'uso di conservanti

Negli ultimi blocchi vengono riportati i fattori inerenti alla neutralità tra la qualità e la sostenibilità.

NEUTRALITA' TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTI L'EFFICIENZA OPERATIVA E

- L'implementazione di tecnologie e quindi una maggiore qualità di processo intesa come efficienza o automazione è neutrale rispetto alla qualità intrinseca dei prodotti come sapore e proprietà organolettiche

NEUTRALITA' TRA QUALITA' E SOSTENIBILITA' RIGUARDANTE LA FORMAZIONE E LA

- L'implementazione di tecnologie e quindi una maggiore qualità di processo non porta automaticamente a nuove competenze senza interventi esterni, restando neutrale rispetto alla sostenibilità sociale se non accompagnata da formazione specifica

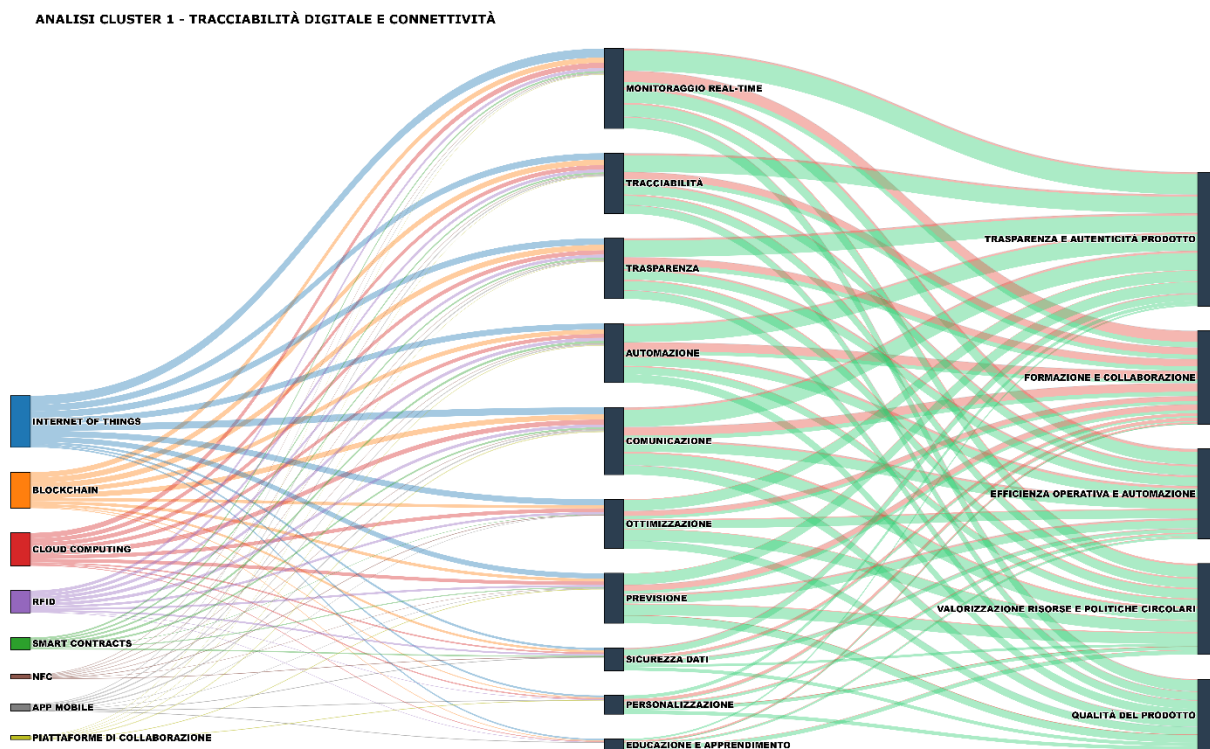


Figure 28 sankey diagram cluster della tracciabilità

La figura 28 analizza la distribuzione dei flussi nel diagramma di sankey relativo al cluster tecnologico inerente alla tracciabilità digitale e alla connettività, emerge come il ruolo più importante viene ricoperto dalla tecnologia di internet of things. Lo spessore dei suoi flussi indica come l'internet of things sia prevalentemente collegata con meccanismi come il monitoraggio real-time, la tracciabilità, la trasparenza, l'automazione, la comunicazione, l'ottimizzazione e la previsione. La blockchain mostra flussi di spessore rilevante ma maggiormente concentrati verso meccanismi che richiedono l'integrità del dato come la trasparenza e la

tracciabilità. La sua connessione con la trasparenza e la tracciabilità è visivamente consistente, suggerendo come sia la tecnologia principale a garantire l’immutabilità e la verificabilità dei dati lungo le varie fasi della catena del valore. Questa sinergia è ulteriormente rafforzata dal Cloud Computing il quale mostra dei flussi consistenti con i meccanismi di monitoraggio real-time, di tracciabilità, di trasparenza, di automazione, di comunicazione, di ottimizzazione e di previsione. Presenta gli stessi collegamenti con la blockchain anche se con meno spessore visto che è una tecnologia che viene citata di meno. Le tecnologie come RFID e NFC presentano flussi più sottili e specializzati, segno di un'applicazione mirata prevalentemente alla tracciabilità logistica e alla trasparenza verso il consumatore finale. La figura mostra dei flussi ridotti per gli smart contracts e per le app mobile, indicando oìù una funzione di supporto. Gli smart contracts sono confinati alla sicurezza dei pagamenti e all'automazione dei permessi mentre le app mobile si concentrano sulla comunicazione e sulla personalizzazione del servizio. Dal sankey emergono maggiormente sinergie soprattutto legate alla trasparenza e all’autenticità di prodotto. I tradeoff maggiormente evidenti sono invece legati al gruppo formazione e collaborazione dove il costo delle tecnologie e i problema sulla privacy hanno un grande peso.

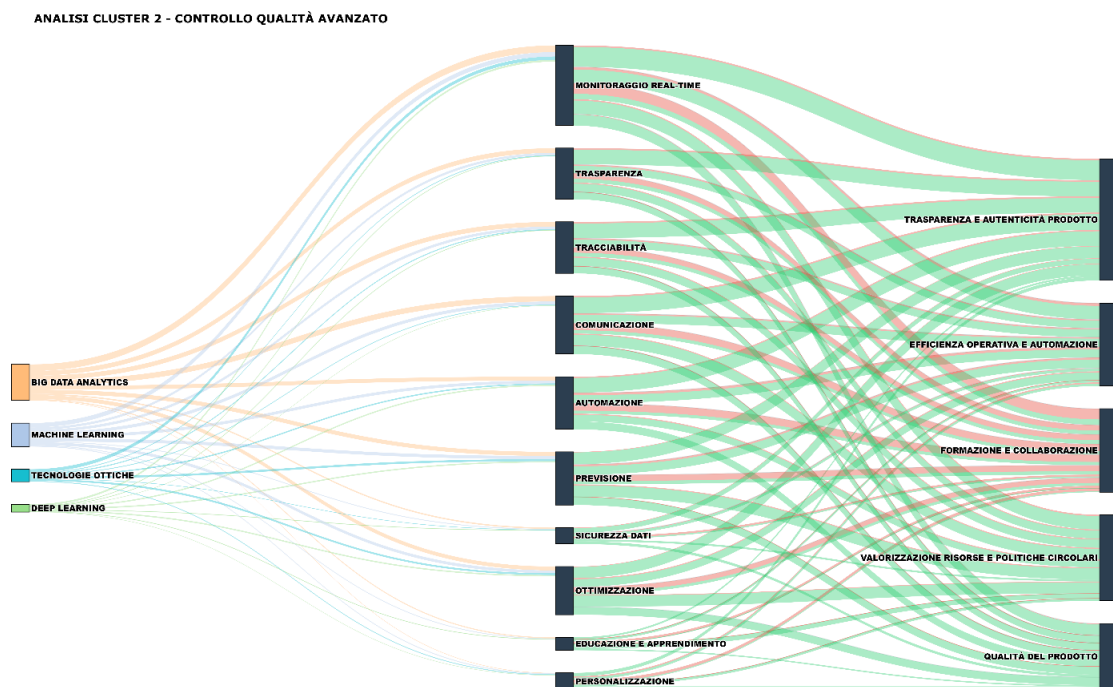


Figure 29 sankey diagram del cluster sulle tecnologie ottiche

Come mostrato in figura 29, il sankey riporta diverse tecnologie inerenti al controllo qualità avanzato. I big data analytics dimostrano di essere la tecnologia maggiormente citata in questo cluster e si collega con molti meccanismi come il monitoraggio real-time, la trasparenza, la tracciabilità, la comunicazione, l’automazione e l’ottimizzazione. Si collega con molti di questi meccanismi dato che si tratta di una delle tecnologie maggiormente usate in sinergia con altre. Anche le altre tecnologie si collegano con i meccanismi citati in precedenza mostrando come il controllo qualità avanzato non permetta solo il monitoraggio real time ma anche l’automazione del controllo qualità, i diversi tipi di previsione spesso riguardanti la shelf life di prodotto o la manutenzione predittiva. Dal sankey si può notare come emergano soprattutto sinergie nelle categorie inerenti

la trasparenza e l'autenticità di prodotto e l'efficienza operativa e l'automazione. Nei tradeoff emerge invece la categoria inerente alla formazione e alla collaborazione sempre per via degli alti costi delle tecnologie.

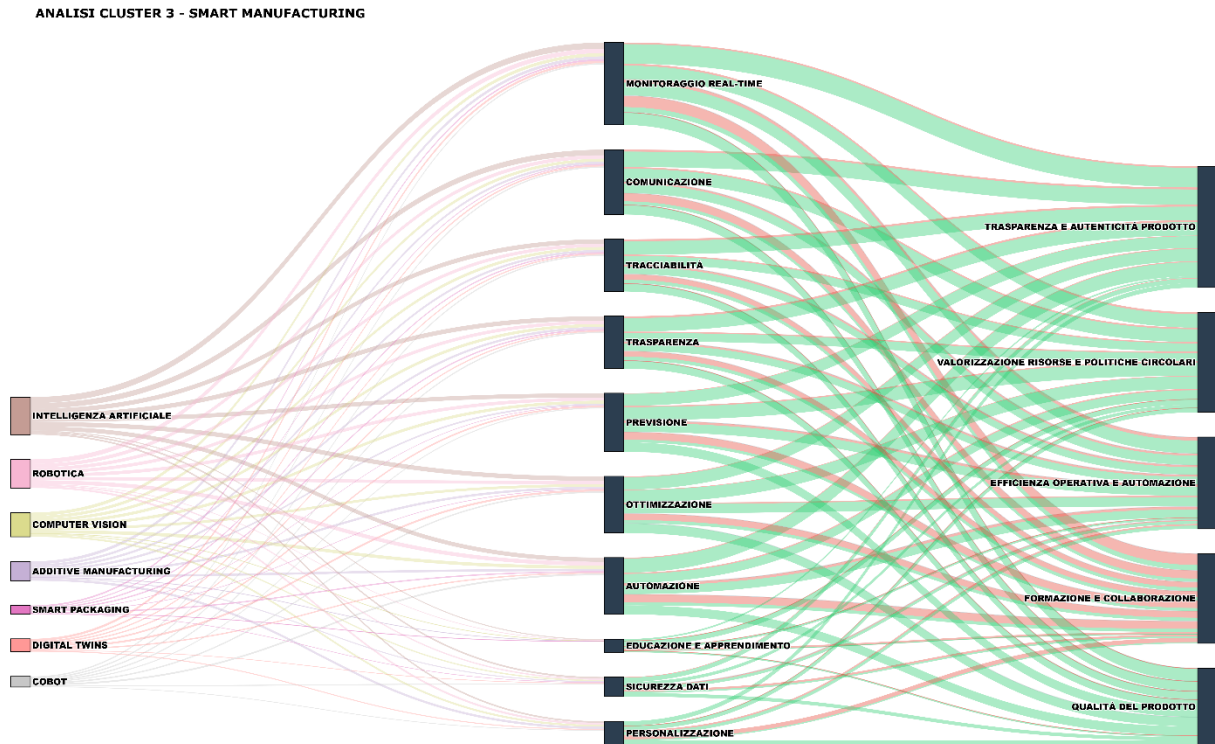


Figure 30 sankey diagram del cluster sullo smart manufacturing

La figura 30 riporta il cluster inerente allo smart manufacturing, troviamo tecnologie come l'intelligenza artificiale, la robotica, la computer vision, l'additive manufacturing, lo smart packaging, i digital twins e i cobot. Tutte queste tecnologie fanno parte del grande insieme di tecnologie per rendere l'azienda più efficiente a livello operativo. Tra i meccanismi più importanti a cui si collegano troviamo l'automazione che permette di rendere automatiche certe attività operative, la comunicazione maggiormente intesa come connettività tra macchine, il monitoraggio real-time probabilmente dovuto a tecnologie come l'internet of things che permettono di raccogliere i dati e in fine l'ottimizzazione che avviene attraverso algoritmi e modelli digitali come i digital twins che permettono di verificare diversi scenari di produzione e logistica. Come si può notare le sinergie prevalgono sui tradeoff e vengono spesso collegati i blocchi inerenti alla trasparenza e autenticità prodotto, la valorizzazione delle risorse e politiche circolari e l'efficienza operativa e l'automazione. Tra i tradeoff emerge sempre la formazione e la collaborazione sempre per problemi inerenti gli alti costi delle tecnologie e sugli alti costi di formazione dei dipendenti.

ANALISI CLUSTER 4 - PRIVACY E SICUREZZA

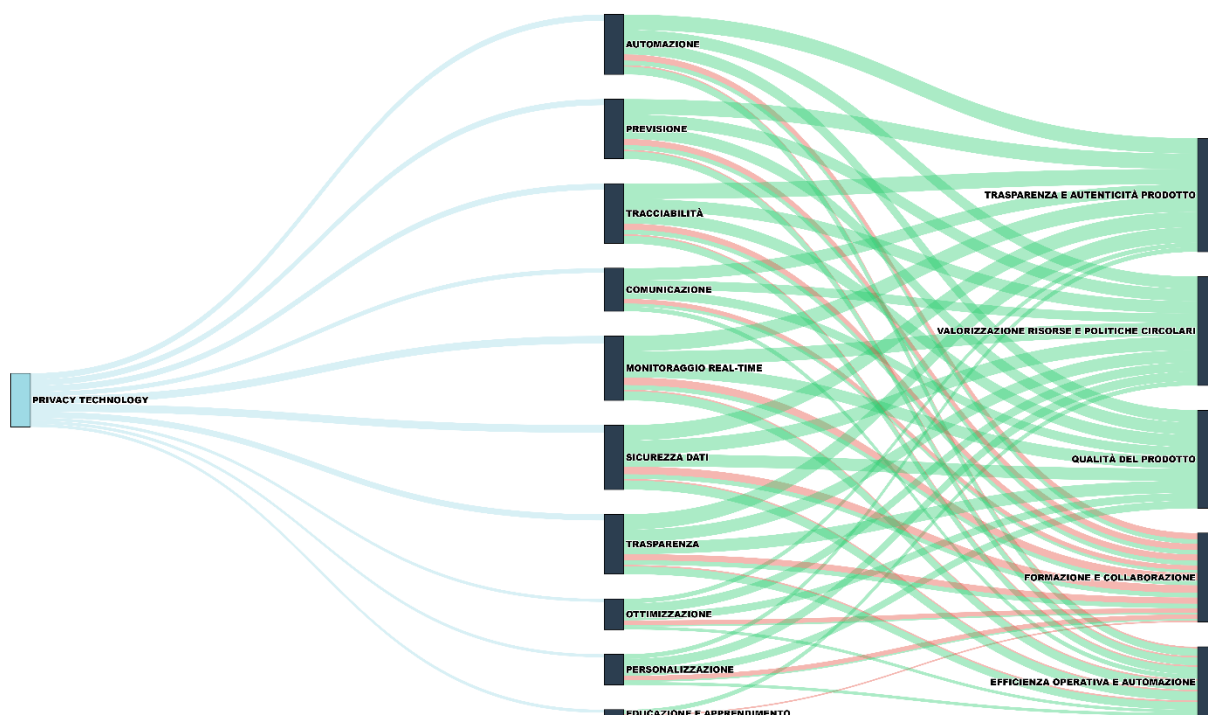


Figure 31 sankey diagram del cluster sulla privacy e sicurezza

La figura 31 riporta il sankey inerente al cluster della privacy e della sicurezza. Le privacy technology che fanno parte di questo cluster sono inerenti alla crittografia e alla cybersecurity. I primi sono dei protocolli che permettono di proteggere i dati consentendo la massima privacy e l'opacità dell'informazione lungo la filiera alimentare. La cybersecurity invece si basa sulla protezione dei sistemi informatici da possibili attacchi informatici consentendo sempre la protezione dai dati. Il meccanismo maggiormente collegato a questo tipo di tecnologie è la sicurezza dei dati. Gli altri collegamenti con i meccanismi sono dovuti al fatto che spesso le privacy technology nei diversi documenti vengano citate insieme ad altre tecnologie. Anche in questo sankey emergono principalmente le sinergie specialmente con le classi inerenti alla trasparenza e autenticità del prodotto, alla valorizzazione di risorse e politiche circolari e alla qualità di prodotto. Tra i tradeoff troviamo sempre la classe riguardante la formazione e la collaborazione per via degli alti costi di implementazione delle tecnologie e per gli alti costi di formazione.

5 Discussioni

5.1 Discussione finale

L'indagine condotta nella presente tesi, ha permesso di delineare come la trasformazione digitale agisca come un vettore per la cosiddetta twin transition all'interno del settore del food and beverage. La trasformazione digitale permette un'integrazione sinergica tra l'evoluzione digitale e il paradigma della sostenibilità dove l'eccellenza qualitativa cessa di essere un obiettivo isolato. Dall'analisi dei dati emerge un cambio di paradigma fondamentale, mentre in passato l'adozione di nuove tecnologie era guidata quasi esclusivamente da logiche di efficienza operativa, oggi la principale capacità risiede nel rispondere ad aspetti ambientali, sociali ed economici. Emerge principalmente come la trasformazione digitale abiliti meccanismi come la tracciabilità e la trasparenza che permettono di certificare l'integrità del prodotto lungo tutta la filiera. La trasformazione digitale inoltre permetterebbe il passaggio da una gestione della qualità di tipo reattivo focalizzata quindi sul contenimento del danno ex-post a una gestione della qualità di tipo predittivo. Prevenire un difetto qualitativo attraverso il monitoraggio costante dei dati significa infatti evitare intrinsecamente lo spreco di risorse preziose rendendo il processo produttivo sostenibile. L'eccellenza qualitativa quindi si evolve in un concetto che riguarda sia la qualità del prodotto dove le proprietà organolettiche vengono analizzate in maniera molto specifica sia le qualità di processo dove viene dato risalto al continuo monitoraggio dei dati. La ricerca dimostra quindi come nel settore del food and beverage sia necessaria una trasformazione digitale che permetta di abilitare determinati meccanismi per raggiungere gli obiettivi riguardanti la sostenibilità e la qualità.

5.1 Evoluzione dei paradigmi e trend emergenti

L'analisi sistematica della letteratura e i risultati derivanti dal processo di topic modeling evidenziano una traiettoria evolutiva nel settore del food and beverage a partire soprattutto dall'anno 2020 ovvero dopo il periodo post pandemico. I dati bibliometrici non mostrano soltanto un incremento quantitativo delle pubblicazioni ma rivelano una varietà e una maturazione qualitativa dei temi trattati dove la trasformazione digitale non serve più solo ad aumentare l'efficienza dei sistemi produttivi ma anche a rendere i sistemi resilienti e capaci di sopportare shock esterni. Il quadro viene soprattutto approfondito nel topic 7 del modello di bertopic dove viene trattata la resilienza del sistema come principale necessità visto che gli shock pandemici hanno messo a dura prova tutta la filiera alimentare. Emerge quindi la necessità ricostruire la filiera attraverso le tecnologie rendendola flessibile e capace di rispondere nel modo più veloce possibile agli shock esterni. In questo scenario, si osserva una transizione dal paradigma dell'industria 4.0 verso il paradigma dell'industria 5.0. Il paradigma dell'industria 4.0 era focalizzato principalmente sull'integrazione di tecnologie digitali per l'efficienza operativa, per l'automazione e l'ottimizzazione dei costi. Il paradigma dell'industria 5.0 pone invece al centro il valore umano e soprattutto la sostenibilità come vettore principale per la competitività. La trasformazione deve smettere di essere vista soltanto come un fine per aumentare l'efficienza e per ridurre i costi ma deve essere vista come un mezzo che sia in grado di portare avanti i concetti di qualità e sostenibilità per il benessere collettivo. I cluster tematici mettono in risalto tecnologie come la blockchain e l'internet of things e questi strumenti non devono più essere soltanto visti come strumenti per il monitoraggio in tempo

reale ma devono rappresentare le fondamenta per garantire trasparenza e tracciabilità della filiera garantendo un patto di fiducia tra produttore e consumatore. E' necessaria quindi prevalentemente una visibilità dell'intera filiera che permetta ai diversi attori di collaborare tra di loro permettendo anche una tracciabilità del prodotto che garantisca l'autenticità evitando possibili frodi e contraffazione. I risultati di ricerca si concentrano molto sul binomio internet of things e blockchain proprio perché l'internet of things è in grado di abilitare una visibilità della filiera trasformando il concetto di sicurezza alimentare da un controllo statico a un processo basato su dati oggettivi raccolti in tempo reale. La blockchain rende il processo trasparente e l'informazione è verificabile e immutabile. Questo binomio tecnologico garantisce quindi il superamento delle asimmetrie informative lungo la filiera e funge da garanzia per l'autenticità dei prodotti e la loro conformità. I risultati della ricerca evidenziano come le aziende che hanno saputo interpretare questa evoluzione tecnologica mostrano una maggiore capacità nell'adattarsi a sfide riguardanti la twin transition. In conclusione, viene dimostrato come i principali trend emergenti e paradigmi riguardino principalmente l'industria 5.0 e quindi una trasformazione che mette al centro il rapporto tra uomo e macchina e allo stesso tempo renda l'intera infrastruttura tecnologica connessa e capace di resistere a shock esterni.

5.2 Meccanismi di generazione del valore

La tesi condotta permette di affermare come il valore generato dalla trasformazione digitale nel settore del food and beverage non risieda nell'adozione di singole tecnologie per migliorare determinati aspetti sull'efficienza operativa o sulla qualità di prodotto, quanto piuttosto nell'integrazione di architetture tecnologiche in grado di far dialogare la realtà materiale con quella digitale. Il primo meccanismo principale riguarda il passaggio da una logica di controllo reattivo a una di monitoraggio in tempo reale. L'impiego di sensori di internet of things in grado di rilevare parametri lungo tutta la filiera genera una grande quantità di dati che elaborata con tecnologie come i big data analytics, permette di superare l'inefficienza dei controlli a campione. Questa grande quantità di dati abilita una stima accurata della shelf-life residua di ogni singolo lotto permettendo di evitare la gestione delle scorte su una prassi basata su medie statistiche. La capacità di prevedere il naturale decadimento biologico del prodotto prima ancora che questo si verifichi consentirebbe alle imprese di ridurre lo spreco alimentare. Oltre alla capacità di previsione, l'integrazione della blockchain lungo la filiera permette di sviluppare il meccanismo di trasparenza e immutabilità delle informazioni. L'integrazione di questa tecnologia garantirebbe la riduzione di asimmetrie informative tra i produttori, i distributori e i consumatori consentendo la visibilità dell'intera filiera. Inoltre, la blockchain registra ogni singola informazione e ogni parametro di processo rendendoli immutabili e accessibili in modo decentralizzato. Questo processo permette di abbattere il rischio di frodi alimentari e contraffazioni generando allo stesso tempo un valore immateriale legato alla reputazione del marchio. L'immutabilità e la trasparenza permettono una garanzia di autenticità del prodotto e riducono i costi di verifica aumentando significativamente il valore percepito dal consumatore finale. In conclusione, la tesi evidenzia come l'integrazione tecnologica abiliti un meccanismo di riutilizzo circolare andando a ridefinire il concetto di scarto industriale. L'utilizzo di tecnologie ottiche potenziate da algoritmi di machine learning, consente un'analisi accurata della composizione chimico strutturale dei prodotti permettendo una rapida classificazione dei

prodotti in base al loro potenziale valore nutrizionale. Tale precisione analitica favorisce il reinserimento dei sottoprodotti in nuovi cicli produttivi permettendo lo sviluppo di politiche circolari. In conclusione, l'unione di questi tre meccanismi permette di far coincidere l'efficienza economica con la responsabilità ambientale dimostrando come la trasformazione digitale possa essere considerato un vettore per la qualità e la sostenibilità.

5.3 La natura della relazione tra qualità e sostenibilità

L'indagine complessiva sulla trasformazione digitale nel settore alimentare ha permesso di analizzare in maniera approfondita il legame intercorrente tra il perseguimento dell'eccellenza qualitativa e il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità. Dall'analisi qualitativa si può notare come spesso l'interconnessione tra i temi della qualità e della sostenibilità si manifestino prevalentemente attraverso una sinergia se pur con qualche presenza di trade-off e neutralità che il management deve saper bilanciare. Come si può notare esistono molte più sinergie rispetto ai trade off e alle neutralità, sinergie che possono essere inerenti a diverse aree tematiche come la trasparenza e l'autenticità di prodotto, la valorizzazione delle risorse e politiche circolari, la qualità di prodotto, la formazione e la collaborazione e l'efficienza operativa e l'automazione. Dai sankey diagram emerge come la principale sinergia sia inerente ai temi della trasparenza e dell'autenticità di prodotto. In questo scenario, la riduzione delle asimmetrie informative e il monitoraggio predittivo permettono di ridurre sistematicamente gli sprechi di materia prima e i consumi energetici, dimostrando come una migliore gestione della qualità dei processi conduca ad una maggiore sostenibilità economica e ambientale. Tuttavia, la ricerca evidenzia anche come determinati parametri qualitativi possano generare conflitti con gli obiettivi di sostenibilità andando a creare dei trade-off. Tra i principali trade-off ricordiamo gli alti investimenti delle tecnologie, i piccoli produttori che possono rimanere fuori da questa trasformazione digitale non avendo i mezzi per svilupparla, gli alti standard estetici dei prodotti che spesso generano tanti scarti e anche un aumento dell'uso di materiali non biodegradabili per gli imballaggi. Queste sono una delle principali sfide a cui il management dovrà fare molta attenzione. Anche l'implementazione di infrastrutture digitali che garantiscono una tracciabilità immutabile e una maggiore sicurezza alimentare comportano un consumo energetico crescente per il mantenimento dei server e dei registri distribuiti, ponendo un quesito etico e ambientale sull'effettiva impronta ecologica della trasformazione digitale. Oltre alle sinergie e ai trade-off, si riscontrano anche neutralità dove il miglioramento della qualità non influisce sulla sostenibilità se non accompagnato da interventi. La trasformazione digitale resta neutrale rispetto alla sostenibilità sociale se non vengono integrati programmi di formazione che tutelino i dipendenti dall'obsolescenza professionale. La trasformazione digitale funge quindi da fattore abilitante che rende possibile la convergenza tra la sostenibilità e la qualità ma spetta al management e alla sua visione strategica orientare l'innovazione tecnologica affinché le sinergie prevalgano sui trade-off.

6. Conclusioni

6.1 Considerazioni finali

La presente tesi ha analizzato in maniera approfondita il tema della trasformazione digitale nel settore del food and beverage interpretandola come il vettore principale per il raggiungimento di obiettivi inerenti alla qualità e alla sostenibilità. Attraverso l'integrazione di analisi bibliometriche, della tecnica di topic modeling di bertopic e di un'indagine qualitativa approfondita, la ricerca ha permesso di approfondire le principali tecnologie del settore, di mappare i principali meccanismi per la generazione di valore e successivamente di analizzare l'output finale riguardante la relazione tra la qualità e la sostenibilità. L'analisi bibliometrica e il topic modeling hanno evidenziato come, a partire dal 2020, l'interesse scientifico si sia spostato da una visione basata sull'efficienza operativa con il tema dell'industria 4.0 verso un nuovo modello basato sull'industria 5.0 che vede la tecnologia come vettore per la resilienza e la sostenibilità sociale. La tesi ha identificato inoltre come la generazione di valore non scaturisce dalla sola adozione di strumenti digitali isolati tra loro, ma dall'integrazione di infrastrutture tecnologiche capaci di attivare meccanismi specifici. I meccanismi principali evidenziati includono il monitoraggio in tempo reale e la manutenzione predittiva, la trasparenza e la tracciabilità che permette di mitigare le asimmetrie informative lungo la filiera e il controllo qualità avanzato che permette di riclassificare gli scarti in risorse chiudendo i cicli produttivi. In conclusione lo studio si è concentrato sulla relazione tra qualità e sostenibilità dimostrando come tale legame sia caratterizzato da una prevalente sinergia. Tuttavia, la ricerca ha fatto emergere anche dei trade-off come la tensione tra gli alti standard estetici e la vera natura del prodotto e la sfida della sostenibilità sociale sul fronte dell'automazione industriale che richiede una riqualificazione delle competenze per evitare fenomeni di esclusione lavorativa. In sintesi, la trasformazione digitale agisce come vettore per la twin transition a patto che ci sia una visione manageriale che riesca a far fronte a dei possibili trade-off.

6.2 Contributi scientifici e limiti della ricerca

Il lavoro apporta un contributo originale alla letteratura esistente colmando il divario conoscitivo tra l'adozione tecnologica e l'effettiva generazione di valore tra la qualità e la sostenibilità. Nonostante la solidità della struttura metodologica della tesi, la ricerca presenta dei limiti legati alla natura stessa dell'innovazione. Il dataset analizzato permette un'analisi fino a maggio 2025 e inoltre non tiene in considerazione dei rapidi sviluppi tecnologici che stanno caratterizzando il settore. L'intelligenza artificiale generativa e nuove tecnologie come l'additive manufacturing potrebbero modificare i paradigmi descritti nel breve-medio periodo rendendo necessarie ulteriori ricerche sul tema della trasformazione digitale nel settore del food and beverage.

6.3 Prospettive per ricerche future

In considerazione dei risultati emersi, si delineano traiettorie di ricerca future. Appare prioritario approfondire l'impatto delle tecnologie riguardanti la privacy technology come i protocolli di crittografia e la cybersecurity all'interno delle filiere alimentari. In un contesto dove la condivisione dei dati è il presupposto per la tracciabilità, la protezione dei dati diventa una sfida ancora parzialmente inesplorata. Inoltre, sarebbe opportuno estendere l'indagine alle fasi di design di prodotto e di marketing digitale. Queste aree offrono un

potenziale enorme per l'analisi di come i dati possano guidare la creazione di alimenti personalizzati e di come la narrazione digitale sulla sostenibilità possa influenzare i comportamenti di consumo responsabile. Oltre a questi temi è possibile approfondire anche tematiche inerenti all'additive manufacturing nel settore del food and beverage andando ad esplorare come queste tecnologie possano influenzare la produzione e la nutrizione.

Bibliografia

A recommended blueprint for food waste transformation. (n.d.).

- Ahmadzadeh, S., Ajmal, T., Ramanathan, R., & Duan, Y. (2023). A Comprehensive Review on Food Waste Reduction Based on IoT and Big Data Technologies. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Number 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15043482>
- Dora, M., Kumar, M., Van Goubergen, D., Molnar, A., & Gellynck, X. (2013). Operational performance and critical success factors of lean manufacturing in European food processing SMEs. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 31, Number 2, pp. 156–164). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.03.002>
- Duong, L. N. K., Al-Fadhli, M., Jagtap, S., Bader, F., Martindale, W., Swainson, M., & Paoli, A. (2020). A review of robotics and autonomous systems in the food industry: From the supply chains perspective. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 106, pp. 355–364). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.028>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Mubarak, M. F., Mubarik, M., Rejeb, A., & Nilashi, M. (2022). Identifying industry 5.0 contributions to sustainable development: A strategy roadmap for delivering sustainability values. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 716–737. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.003>
- Guandalini, I. (2022). Sustainability through digital transformation: A systematic literature review for research guidance. *Journal of Business Research*, 148, 456–471. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.05.003>
- Hassoun, A., Ait-Kaddour, A., Abu-Mahfouz, A. M., Rathod, N. B., Bader, F., Barba, F. J., Biancolillo, A., Crobotova, J., Galanakis, C. M., Jambrak, A. R., Lorenzo, J. M., Måge, I., Ozogul, F., & Regenstein, J. (2023). The fourth industrial revolution in the food industry—Part I: Industry 4.0 technologies. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 63, Number 23, pp. 6547–6563). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2034735>
- Jurgilevich, A., Birge, T., Kentala-Lehtonen, J., Korhonen-Kurki, K., Pietikäinen, J., Saikku, L., & Schösler, H. (2016). Transition towards circular economy in the food system. *Sustainability (Switzerland)*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/su8010069>
- Kamilaris, A., Fonts, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2019). The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 91, pp. 640–652). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.034>
- Luning, P. A., & Marcelis, W. J. (2006). A techno-managerial approach in food quality management research. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 17, Number 7, pp. 378–385). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.01.012>
- The State of Food Security and Nutrition in the World 2025. (2025). In *The State of Food Security and Nutrition in the World 2025*. FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO; <https://doi.org/10.4060/cd6008en>
- Think Eat Save Tracking Progress to Halve Global Food Waste.* (2024). <https://www.unep.org/resources/publication/food-waste-index-report-2024>
- Yadav, S., Samadhiya, A., Kumar, A., Luthra, S., Kumar, V., Garza-Reyes, J. A., & Upadhyay, A. (2024). The interplay effects of digital technologies, green integration, and green innovation on food supply chain sustainable performance: An organizational information processing theory perspective. *Technology in Society*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102585>

		digital transformation digital transformation sme industrial internet_thing digital technology
3	Tracciabilità della supply chain e gestione della catena del valore	traceability food_supply_chain food_supply_chain traceability agri_food value_chain management food_supply_chain food traceability agri_food value_chain agri_food value_chain management food system quality food
4	Qualità e conservazione del cibo	food quality smart precision horticulture iot industrial refrigeration smart packaging industrial refrigeration system sensor system refrigeration dry fruit pesticide fruit
5	Capacità delle aziende agri-food di adottare sistemi cyber-fisici e nuove infrastrutture smart.	readiness agri_food company food manufacturing food manufacturing company agri_food company readiness agri_food food company smart system manufacturing company smart technology cyber_physical_system infrastructure
6	Strategie sostenibili per le piccole medie imprese	business model small enterprise

		select business model business incubation impact sustainability small enterprise sme circular_economy ecodesign sustainability sme business incubation
--	--	---

NUMERO TOPIC	TEMATICHE PRINCIPALI	KEYWORD
1	Ottimizzazione dei magazzini, riduzione dei consumi energetici e sostenibilità ambientale nelle PMI	digital_twin warehouse energy logistic small_medium_enterprise social environmental productivity lean reduction
2	Trasparenza, contratti intelligenti, sicurezza delle transazioni e abbattimento delle barriere di dati	blockchain traceability contract transparency safety transaction sharing barrier internet of things machine_learning
3	Monitoraggio avanzato tramite sensori e automazione della qualità	meat hyperspectral_imaging rfid inspection automatic meat_product

		seafood ripen food_supply_chain_management big_data_application
4	Gestione delle interruzioni della supply chain post-pandemia e sicurezza dei flussi logistici	pandemic supply_chain resilience internet_of_things covid disruption internet_thing supply_chain_security security covid_pandemic

NUMERO TOPIC	TEMATICHE PRINCIPALI	KEYWORD
1	Integrità dei dati, tracciabilità dell'origine e riduzione del rischio nelle consegne	blockchain traceability transparency blockchain_technology risk proof_of_delivery digital_twin cost algorithm origin
2	Riduzione delle emissioni, bioeconomia e green supply chain management	green logistic_management bioeconomic emission energy human gscm integrate_total_productive_maintenance ecological sustainable_development_goals

3	Strategie post-pandemiche per gestire interruzioni e l'effetto bullwhip	resilience disruption covid pandemic resilient risk human bullwhip integrated_facility_management micro_business
4	Gestione della supply chain focalizzata su PMI e sistemi di distribuzione locale	logistic food_supply_chain food_supply_chain_system supply_chain_management distribution_transportation_system short_food_supply_chain small_medium_enterprises food_value_supply_chain transparency inventory
5	Uso di digital twin e simulazioni per ottimizzare costi e logistica di magazzino	digital_twin simulation cost robotic scenario managerial automate internet_thing logistic warehousing
6	Startup, economia circolare e trasformazione degli scarti alimentari in valore	circular foodtech circular_economy circular_supply_chain startup circular_chain circular_circular_economy foodtechs transition_circular upcycle

7	Interoperabilità delle infrastrutture digitali per gli obiettivi di sviluppo sostenibile	ecosystem interoperability ecological digital_infrastructure_system digitainability transition sustainable_development_goal innovative_material_value diverse alignment
8	Sensori avanzati, spettroscopia e Machine Learning per la qualità non distruttiva	sensor machine_learning hyperspectral_imaging content non_conformance_report accuracy spectroscopy prediction microwave machine
9	Caratterizzazione microbica, processi termici e AI applicata ai bioreattori	artificial_intelligence thermal bioreactor characterization microbial artificial_intelligence_technique sterilization peel metabolomic heating
10	Fattori chiave per l'adozione dell'intelligenza artificiale e dell'internet of things nei processi di digitalizzazione	energy internet_of_thing key_success_factors digitalize simultaneously artificial_intelligence confirmatory agent digitization applicability

11	Ispezione automatizzata basata su visione artificiale e algoritmi di precisione	detection inspection machine_vision viscosity deep accuracy algorithm cycle_time feature measurement
12	Robotica autonoma, cobot e automazione	robotic robotic_automation artificial_intelligence machine automation autonomous_mobile_robot autonomous_robot programmable_logic_controller cobot robot

Ringraziamenti formali

"Questa tesi è realizzata nell'ambito del progetto NODES, finanziato dal MUR sui fondi M4C2 – Investimento 1.5 Avviso "Ecosistemi dell'Innovazione, nell'ambito del PNRR finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU (Grant agreement Cod. N.ECS00000036)."