UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

TESI DI LAUREA

QUANTIFICAZIONE E VALUTAZIONE DELL'IMPRONTA DI FOSFORO ATTRAVERSO LCA: UNO STUDIO SU QUATTRO PRODOTTI ALIMENTARI

Relatore: Chiar.mo PROF. Filippo Zuliani

Laureanda: Martina Urban

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

ABSTRACT

Il fosforo è un elemento fondamentale per la vita, è essenziale per gli ecosistemi naturali e la produzione agricola. Tuttavia, l'importanza di questo elemento per l'agricoltura e l'industria ha portato a un'intensificazione dell'estrazione e dell'utilizzo di questa risorsa, cambiandone profondamente il ciclo. Questo ha causato diverse problematiche ambientali come l'eutrofizzazione, caratterizzata da una proliferazione algale che impoverisce le acque di ossigeno, causando la morte di numerose specie acquatiche e la perdita di biodiversità. Inoltre, le riserve di fosfato sono limitate e non rinnovabili, sollevando preoccupazioni sulla sostenibilità a lungo termine dell'agricoltura e della produzione alimentare, infatti su scala globale, le stime del consumo futuro prevedono che i depositi di fosfato saranno esauriti entro uno o due secoli.

Il rilascio di fosforo nell'ambiente non è più sostenibile, come si può osservare nei *planetary boundaries* (articolo pubblicato dall'università di Stoccolma da Richardson et al. 2023 e Steffen et al. 2015). Questi sono dei limiti che indicano fino a che punto si possono sfruttare le risorse del pianeta senza compromettere la sua capacità di rigenerarsi. Diversi studi hanno affermato che il limite, con riferimento ai cicli biogeochimici di azoto e fosforo, è stato superato.

La quantificazione degli impatti ambientali derivanti dal ciclo risulta pertanto di importanza primaria; in particolare il presente lavoro si occupa di valutare e quantificare gli impatti ambientali riconducibili al ciclo del fosforo di quattro prodotti del settore alimentare attraverso un approccio LCA (Life Cycle Assessment). Quest'ultima metodologia analizza l'intero ciclo di vita di un prodotto, dall'ottenimento delle materie prime alla produzione, distribuzione, utilizzo e smaltimento del prodotto, permettendo di quantificare gli impatti ambientali associati ad ogni singola fase e viene utilizzata in questo lavoro come strumento base per la quantificazione degli impatti legati al ciclo del fosforo.

Il metodo utilizzato, nello specifico, è analogo a quanto proposto per il calcolo di Nitrogen Footprint da parte di Zuliani et al. (2023); esso tiene conto di tutte le emissioni di sostanze contenenti fosforo per calcolare l'*Indicatore di fosforo* PI (Phosphorus Indicator) che corrisponde proprio al Phosphorus Footoprint (PF)

inteso come metrica che indica i rilasci totali di Fosforo in ambiente attribuiti ad un particolare prodotto.

INDICE

INTRODUZIONE 7
1. FOSFORO NELL'AMBIENTE 9
1.1 Il paradosso del fosforo: fondamentale per la vita, limitato per il futuro 9
1.2 Il ciclo del fosforo antropizzato: conseguenze sull'ambiente 10
2. PHOSPHORUS FOOTPRINT E LIFE CYCLE ASESSMENT 17
2.1 Phosphorus Footprint 17
2.2 Metodologia Life Cycle Assessment 19
2.3 Calcolo PF con metodologia LCA 20
3. MATERIALI E METODI 22
3.1 Quadro metodologico 22
3.2 Determinazione dei Coefficienti di fosforo 24
3.3 Calcolo indicatore di fosforo (P_{out}) 28
4. RISULTATI E DISCUSSIONI 30
4.1 Applicazione del metodo 30
4.2 Risultati e discussioni 30
5. CONCLUSIONI 49
BIBLIOGRAFIA 50
SITOGRAFIA 52

INTRODUZIONE

Il fosforo è un elemento essenziale per la vita sulla terra ed è determinante per tutta la storia umana moderna. Dalla scoperta accidentale di Henning Brandt fino ai giorni nostri, il fosforo ha svolto un ruolo cruciale nell'alimentazione globale, nell'industria e, purtroppo, ha anche lasciato un'impronta significativa sull'ambiente.

Il fosforo è un elemento chiave per l'agricoltura moderna, tanto che gran parte della produzione mondiale di questo elemento viene utilizzata per la produzione di fertilizzanti sintetici, il che lo rende fondamentale per la sicurezza alimentare. Si trova in grande quantità nei mangimi per animali ed è utilizzato anche per la produzione di acciaio, additivi alimentari, batterie per auto elettriche, alcuni pesticidi e prodotti per la pulizia della casa.

L'importanza di questo elemento sia per l'agricoltura che per l'industria ha portato ad un'intensificazione dell'estrazione e dell'utilizzo di questa risorsa cambiandone profondamente il ciclo.

La principale fonte di fosforo è la roccia fosfatica, facilmente accessibile per la produzione di fertilizzanti sintetici e viene prodotta in grandi quantità fin dalla Seconda guerra mondiale. Il problema è che le riserve di fosforo sono limitate e non rinnovabili e le stime del consumo futuro di questo elemento prevedono che i depositi di fosfato saranno esauriti entro uno o due secoli.

Nel capitolo "Fosforo nell'ambiente" verrà esplorato in dettaglio il ciclo biogeochimico di questo elemento, le sue principali fonti di inquinamento e le conseguenze sull'ambiente.

Verrà presentata una panoramica delle problematiche ambientali legate all'elemento critico fosforo con particolare riguardo al ciclo di questo elemento e agli impatti di quest'ultimo nell'ambiente, come ad esempio l'eutrofizzazione delle acque e la perdita di biodiversità.

Risulta quindi di importanza primaria la quantificazione degli impatti ambientali riconducibili al fosforo.

Il presente lavoro si occupa di valutare e quantificare gli impatti ambientali riconducibili al ciclo del fosforo di quattro prodotti del settore alimentare attraverso

un approccio LCA (Life Cycle Assessment) che verrà descritto nel capitolo "Phosphorus Footprint e Life Cycle Assessment".

Questa metodologia è analoga a quanto proposto per il calcolo di Nitrogen Footprint da parte di Zuliani et al. (2023), i quali hanno proposto un metodo per quantificare la perturbazione globale del ciclo dell'azoto attribuibile a un sistema di prodotti secondo la tecnica LCA e gli strumenti correlati (software e database) e sulla base dei requisiti delle norme ISO 14040 e ISO 14044 (ISO 2020a, 2020b) relative all'LCA; il metodo conto di tutte le emissioni di sostanze contenenti azoto, al fine di calcolarne l'indicatore di azoto reattivo (NrI) che, a tutti gli effetti, corrisponde a ciò che attualmente è definito Nitrogen Footprint.

Il presente lavoro utilizza la metodologia sopra richiamata con riferimento al fosforo con lo scopo di calcolare l'impronta di fosforo (Phosphorus Footprint) di quattro prodotti di un'azienda italiana del settore alimentare per confrontarne le prestazioni dei prodotti in termini di emissioni di fosforo reattivo, al fine di identificare le fasi del ciclo di vita e le emissioni che contribuiscono in modo più significativo alla perturbazione del ciclo del fosforo.

Nel capitolo "Materiali e Metodi" verrà descritto il modello di quantificazione di impronta di fosforo. A partire dall'analisi di inventario di 4 sistemi di prodotto (riferiti a 4 prodotti del settore alimentare) selezionando esclusivamente le sostanze contenenti fosforo con il relativo calcolo dei coefficienti fosforo per ciascuna sostanza trovata, verrà calcolato l'indicatore di fosforo (PI) definito come il fosforo reattivo totale rilasciato da un sistema prodotto nei diversi comparti ambientali (acqua, aria, terreno) e che rappresenta il Phosphorus Footprint del sistema prodotto.

Nell'ultimo capitolo "Risultati e discussioni" verranno presentati e discussi i risultati ottenuti con particolare riferimento ai i valori di Phosphorus Footprint calcolati per i 4 prodotti alimentari oggetto dello studio.

1. FOSFORO NELL'AMBIENTE

1.1 Il paradosso del fosforo: fondamentale per la vita, limitato per il futuro

Il fosforo, undicesimo elemento più comune sulla Terra, è un pilastro fondamentale per ogni forma di vita. Questo elemento viene definito essenziale, ovvero un elemento necessario per la vita e la cui assenza provoca la morte. Il fosforo, come altri elementi come il sodio, magnesio, potassio, calcio e cloro sono spesso indicati come macrominerali perché forniscono ioni essenziali nei fluidi corporei e formano i principali componenti strutturali del corpo. È inoltre un costituente fondamentale sia del DNA che l'RNA: i mattoni genetici degli organismi viventi.

Il fosforo è un elemento indispensabile per la vita delle piante, svolgendo un ruolo cruciale nella loro crescita e sviluppo. Essendo un nutriente essenziale e insostituibile, il fosforo è fondamentale per garantire la produzione alimentare su scala globale. (Steen, 1998).

Insieme all'azoto e al potassio, il fosforo è uno dei principali componenti dei fertilizzanti, sostanze che consentono di aumentare la resa delle colture e di soddisfare il crescente fabbisogno alimentare della popolazione mondiale.

Secondo le stime, entro il 2050 la richiesta di questo elemento essenziale per l'agricoltura potrebbe raddoppiare, mettendo sotto pressione le risorse fosfatiche a livello globale. (Steen, 1998).

Il fosforo impiegato nei fertilizzanti proviene principalmente da rocce fosfatiche, una risorsa non rinnovabile formatasi in milioni di anni, queste riserve, pur essendo ancora significative, sono destinate ad esaurirsi entro pochi decenni, con stime che indicano un massimo di 50-100 anni di riserve note (Steen, 1998).

La produzione mondiale di fosforo dipende in modo critico da poche nazioni (Cina, Stati Uniti, Giordania e Sud Africa), con il Marocco che detiene la quota di mercato più significativa; questa concentrazione geografica, soprattutto nelle miniere del Sahara Occidentale, rende la fornitura globale di fosforo particolarmente vulnerabile a tensioni geopolitiche e instabilità regionali.

Il fosforo, quindi, viene utilizzato a livello globale e svolge un ruolo cruciale nel soddisfare il fabbisogno alimentare mondiale; se non si riusciranno a trovare soluzioni efficaci per gestire la scarsità di fosforo, si rischia di compromettere la

sicurezza alimentare globale e di innescare conflitti per il controllo di questa risorsa essenziale.

1.2 Il ciclo del fosforo antropizzato: conseguenze sull'ambiente

Il fosforo, come detto in precedenza, è un elemento essenziale per la vita, è coinvolto in un ciclo biogeochimico che regola la sua distribuzione nell'ambiente. Tuttavia, le attività antropiche hanno profondamente alterato questo ciclo naturale, con conseguenze significative sugli ecosistemi.

Il questo capitolo verrà esaminato il ciclo del fosforo e saranno analizzate le conseguenze delle alterazioni antropiche su tale processo, con particolare riferimento agli impatti ambientali.

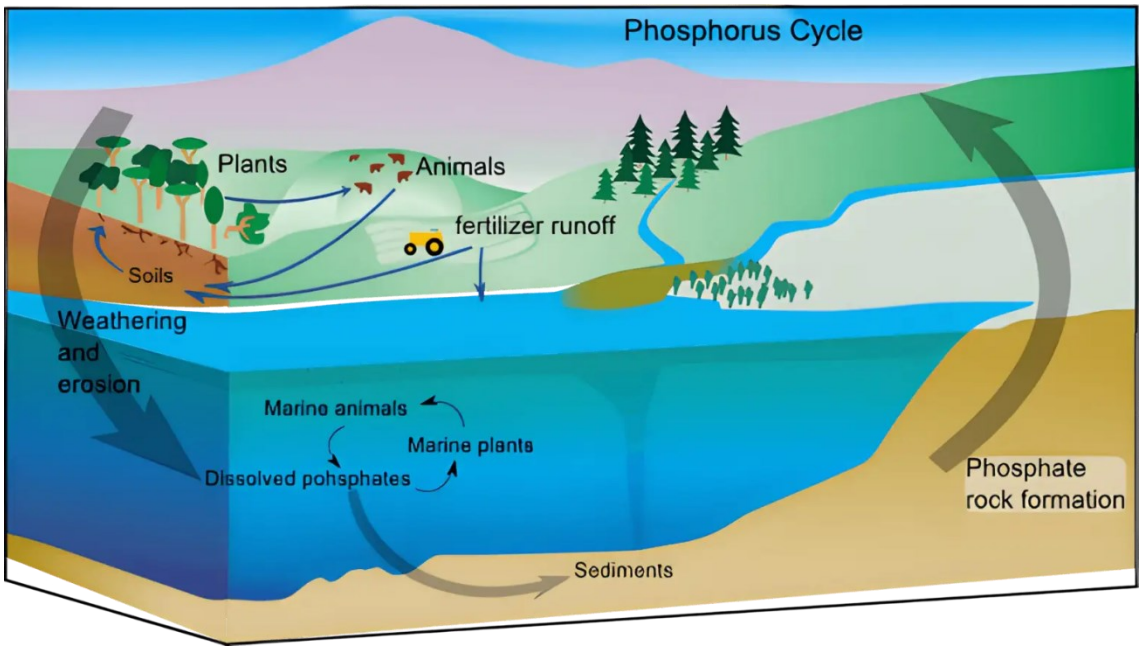

Figura 1: ciclo naturale del fosforo (Yuan, Z. et al., 2018)

Come si può osservare nella figura 1 riportata sopra, la principale fonte di fosforo si trova nelle rocce in forma inorganica e non è direttamente disponibile per gli organismi; infatti, a causa delle intemperie avviene il rilascio di ioni fosfato e altri minerali; il fosforo inorganico rilasciato dalle rocce viene trasportato dall'acqua tramite la pioggia e i fiumi fino al terreno.

Le piante assorbono attivamente il fosforo inorganico dal suolo attraverso le radici, incorporandoli in biomolecole essenziali come gli acidi nucleici e l'ATP; attraverso poi la catena alimentare, il fosforo passa dagli organismi vegetali agli animali che si nutrono delle piante stesse.

Alla morte degli organismi, i decompositori come ad esempio batteri e funghi, decompongono la materia organica, rilasciando il fosforo in forma inorganica nel suolo attraverso il processo di mineralizzazione.

Il fosforo nel terreno può essere trasportato nei corpi idrici come fiumi, laghi e oceani e successivamente può depositarsi nei sedimenti sul fondo. Nel corso di milioni di anni, i sedimenti contenenti fosforo possono essere sollevati e formare nuove rocce, dando così inizio ad un nuovo ciclo. (Föllmi et al., 1995)

Il ciclo del fosforo rappresenta quindi un equilibrio delicato ed essenziale per la vita sulla Terra; tuttavia, l'intensificazione delle attività umane, in particolare l'agricoltura e l'industrializzazione, ha profondamente disturbato questo equilibrio. Le attività antropiche interferiscono con il ciclo del fosforo attraverso molteplici vie come, ad esempio, l'estrazione delle rocce fosfatiche per la produzione di fertilizzanti fosfatici, la coltivazione intensiva con l'applicazione di elevate dosi di fertilizzanti, l'allevamento di bestiame e la conseguente produzione di letame, nonché la gestione inadeguata dei reflui urbani e industriali. (Zengwei et al., 2018)

L'intervento umano nel ciclo del fosforo inizia quindi con l'estrazione intensiva delle rocce fosfatiche che è decollata a partire dagli anni '40 dell'Ottocento. Si è registrata una forte accelerazione nella seconda metà del Novecento fino agli anni '80, legata principalmente all'intensificazione delle pratiche agricole e alla conseguente domanda di fertilizzanti. Successivamente, il crollo dell'Unione Sovietica e la diminuzione della domanda nei paesi industrializzati causarono un breve calo dell'estrazione; poi dagli anni 2000 ci fu una crescente domanda di fertilizzanti nei paesi in via di sviluppo che ha spinto l'estrazione di fosforo a crescere annualmente del 4.2% (Zengwei et al., 2018).

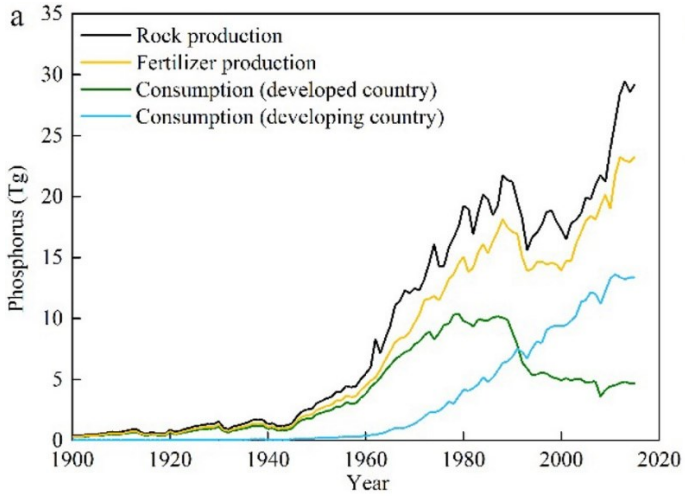

Figura 2: andamento storico della produzione di rocce fosfatiche e produzione di P (from Environmental Science and Technology)

Tuttavia, questo aumento nell'utilizzo dei fertilizzanti ha avuto conseguenze significative sull'ambiente come l'eccessivo apporto di fosforo nelle acque superficiali e sotterranee, principalmente attraverso lo scarico di fertilizzanti agricoli e delle acque reflue provocando un fenomeno noto come eutrofizzazione; la parola "eutrofico" deriva dal termine greco *eutrophos* che significa "ben nutrito" (Solomon et al, 2023).

Ci sono due tipi di eutrofizzazione: naturale e artificiale. La prima avviene quando il fosforo entra nell'acqua in modo lento e graduale e in quantità limitate, come avviene in natura; questo processo aiuta le piante a crescere e rende l'ecosistema più produttivo. La seconda, ovvero quella artificiale avviene quando l'uomo aggiunge troppo fosforo all'acqua, per esempio in conseguenza dell'eccessivo utilizzo di fertilizzanti nel settore agricolo.

Il problema è proprio il secondo tipo di eutrofizzazione, dato che la sovrabbondanza di nutrienti in acqua provoca un'eccessiva crescita algale; quando queste alghe muoiono vengono decomposte dai batteri consumando grandi quantità di ossigeno disciolto nell'acqua che porta ad uno stato di deossigenazione. La diminuzione dell'ossigeno disciolto rende l'ambiente acquatico inospitale per la maggior parte degli organismi viventi e questo provoca una diminuzione della biodiversità che potrebbe portare anche alla morte di interi ecosistemi.

Un'altra conseguenza dell'eutrofizzazione, oltre alla perdita di biodiversità è il degrado della qualità dell'acqua potabile; le acque contaminate da fosforo possono

rendere l'acqua non potabile, richiedendo di conseguenza trattamenti costosi per rendere queste acque sicure per il consumo umano.

Come già detto in precedenza, le attività antropiche come l'uso intensivo di fertilizzanti fosfatici, la bonifica dei terreni, il pascolo e la deforestazione, hanno profondamente alterato il ciclo naturale del fosforo. Non solo queste pratiche hanno incrementato l'apporto di fosforo nelle acque superficiali e sotterranee, causando fenomeni di eutrofizzazione, ma hanno anche aumentato la mobilizzazione del fosforo atmosferico. Studi recenti stimano che il contenuto di fosforo medio nei terreni coltivati sia cresciuto del 15% nell'ultimo secolo, con conseguenti incrementi nell'erosione eolica e nel trasporto di particelle di fosforo nell'atmosfera (Zhang, J et al., 2017).

Pertanto, le attività umane hanno esteso il ciclo del fosforo anche alla sfera atmosferica, complicando ulteriormente la gestione di questo elemento essenziale per gli ecosistemi.

Infatti, le attività antropiche hanno profondamente alterato i flussi biogeochimici del fosforo che non si trovano in un intervallo sicuro, ma a rischio (Rockström et al., 2009).

Come si può osservare il rilascio di fosforo non è più sostenibile come evidenziato nei *planetary bounadries*; questi ultimi sono nove limiti fissati per valutare il livello di sfruttamento delle risorse del pianeta al fine di determinare se la terra riesca a rigenerarsi in modo sostenibile.

Questi limiti sono stati fissati per la prima volta da Rockström et al. (2009), successivamente ripresi da Steffen et al. (2015) e infine aggiornati da Richardson et al., (2023); i *planetary boundaries* individuano i limiti planetari che delimitano una zona di sicurezza per lo sviluppo umano, al di là della quale si rischia di innescare cambiamenti ambientali irreversibili.

Per definire questi *planetary boundaries*, sono stati individuati nove processi chiave che regolano il funzionamento del nostro pianeta: *cambiamento climatico, tasso di perdita di biodiversità sia terrestre che marina, interferenza con i cicli dell'azoto e del fosforo, riduzione dell'ozono stratosferico, acidificazione degli oceani, uso globale di acqua dolce, cambiamento nella destinazione d'uso del suolo, inquinamento chimico e il carico di aerosol atmosferico* (Rockström et al. 2009).

Tra i nove limiti planetari proposti da Rockström et al. nel 2009, Steffen et al. ne individuarono tre che, se superati, potrebbero innescare un radicale cambiamento del sistema Terra, portandolo verso un nuovo stato di equilibrio, come mostrato nella Figura 3 (Steffen et al, 2015)

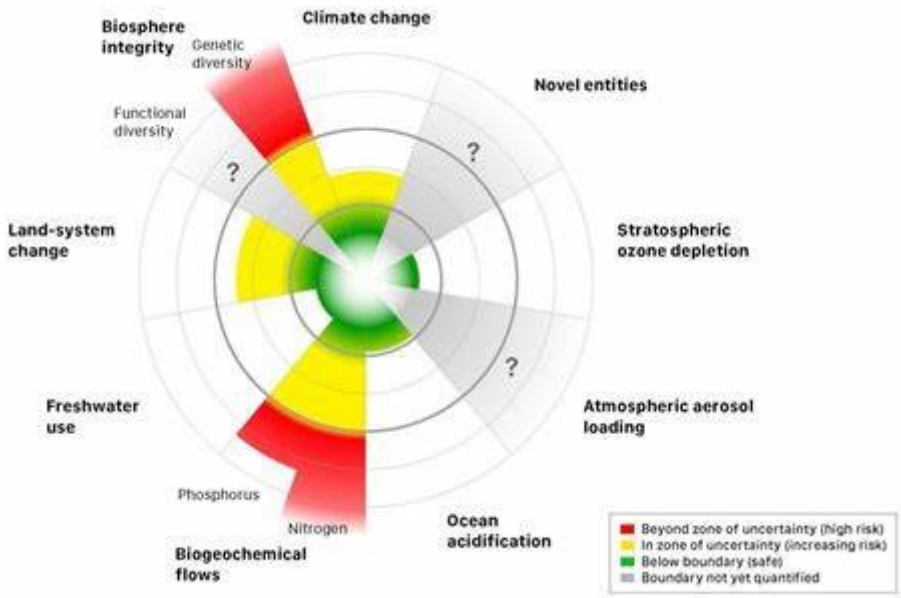

Figura 3: stato delle variabili di controllo per sette dei confini planetari (Steffen et al, 2015)

Nel settembre del 2023, un'analisi completa dei nove *Planetary Boundaries* ha rivelato che sei di essi sono già stati oltrepassati, come illustrato nella seguente figura 4, questo aggiornamento condotto da Richardson et al. fornisce una fotografia allarmante dello stato del pianeta Terra.

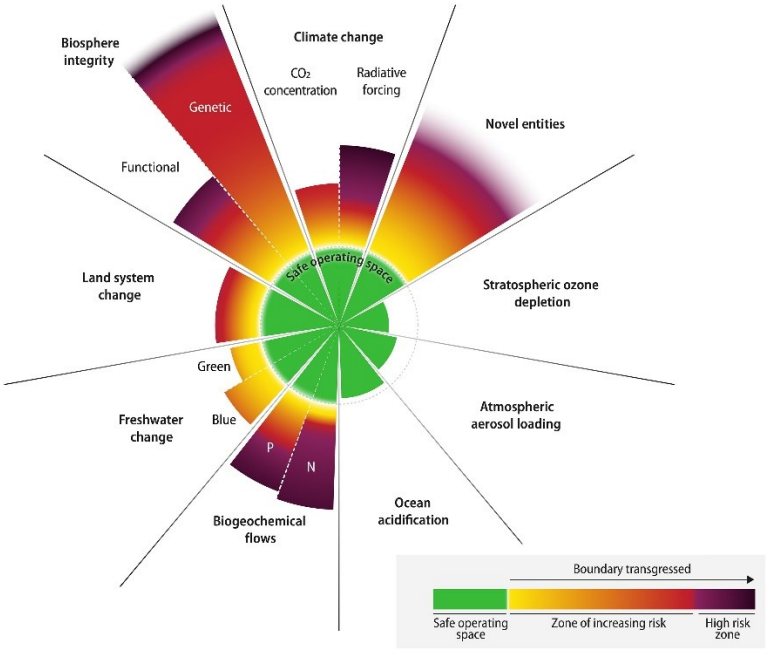

Figura 4: stato delle variabili di controllo per nove dei confini planetari (Richardson et al, 2023)

Come mostrato in figura 4, la colorazione verde indica una situazione di sicurezza, mentre le tonalità che vanno dal giallo all'arancione segnalano un crescente rischio di superamento dei limiti planetari. Il colore viola, infine, evidenzia una chiara violazione dei confini, con conseguenti rischi elevati per il sistema Terra. Per i confini già compromessi nel 2015 (cambiamento climatico, biodiversità e cicli biochimici del fosforo e dell'azoto), la situazione è ulteriormente peggiorata.

Le attività umane hanno un impatto globale sui cicli biogeochimici, alterando i flussi naturali di elementi essenziali come azoto e fosforo. Questi elementi, fondamentali per la vita, sono stati immessi nell'ambiente in quantità e forme che hanno sbilanciato gli equilibri naturali. Sebbene il ciclo del carbonio sia oggetto di studi specifici legati ai cambiamenti climatici, anche altri elementi, come azoto e fosforo, stanno subendo alterazioni significative a causa delle attività umane. L'eccesso di forme reattive di questi elementi negli ambienti terresti e acquatici sta provocando cambiamenti profondi nella composizione degli ecosistemi, con conseguenze che si manifestano su scale temporali diverse, da quelle brevi a quelle evolutive (Richardson et al., 2023).

Per quanto riguarda il fosforo, il limite stabilito dai *planetary boundaries* è di 11 Tg/anno di P riversato dagli ecosistemi d'acqua dolce verso gli oceani per prevenire

l’anossia su larga scala. Tuttavia, recenti studi hanno indicato un flusso attuale di circa 22 Tg di P all’anno, superando di conseguenza il limite stabilito.

Il limite regionale di 6.2 Tg/anno per evitare l’eutrofizzazione è già ampiamente superato, con un valore attuale di 17.5 Tg/anno, attribuibile all’uso eccessivo di fertilizzanti fosfatici in agricoltura; la situazione è ulteriormente aggravata dalla proiezione di un consumo che potrebbe raggiungere i 32.5 Tg/anno (Lucht et al., 2023).

In conclusione, i dati presentati sopra con riferimento anche alla Figura 4, evidenziano come il superamento dei limiti planetari (*planetary boundaries*) relativo ai flussi biogeochimici di fosforo (e azoto) rappresenti una grave minaccia per gli ecosistemi a livello globale.

2. PHOSPHORUS FOOTPRINT E LIFE CYCLE ASESSMENT

2.1 Phosphorus Footprint

Come visto nel capitolo precedente, l'eccessivo apporto di fosforo negli ecosistemi rappresenta una grave minaccia per l'ambiente e la sostenibilità. Per affrontare efficacemente questa problematica, è fondamentale quantificare con precisione l'impatto delle attività umane sul ciclo del fosforo.

In questo contesto, gli strumenti di valutazione ambientale, come le footprint ambientali, consentono di associare a un prodotto, a un servizio o a una attività un determinato carico ambientale, esprimendolo in termini di consumo di risorse e di produzione di rifiuti.

Il concetto di impronta ambientale fu introdotto da Rees nel 1992 per misurare l'area terreste necessaria a sostenere lo stile di vita della popolazione che si è evoluto negli anni. Oggi, secondo gli autori come Hoekstra e Wiedmann et al., 2016, questo termine indica più in generale la pressione esercitata dalle attività umane sull'ambiente (Matustik, Koci, 2021). Le impronte ambientali offrono una lente d'ingrandimento per osservare e misurare le attività produttive e di consumo antropiche, sono quindi degli indicatori che quantificano lo sfruttamento umano delle risorse naturali del pianeta e inoltre, quantificano la pressione delle attività umane sull'ambiente durante l'intero ciclo di vita di un prodotto o servizio, dalla produzione al consumo, fino alla gestione dei rifiuti (Matustik, Koci et al., 2021)

Sia la valutazione dell'impronta ambientale (EFA) che l'analisi del ciclo di vita (LCA) si fondano sul concetto di ciclo di vita, ma hanno differenti obiettivo e approccio. L'EFA misura la pressione che le attività umane esercitano sulle risorse naturali, mentre l'LCA valuta le conseguenze di queste pressioni sull'ambiente, ovvero tratta gli impatti ambientali.

Esistono numerose tipologie di impronte ambientali, tra cui l'impronta di carbonio, quella idrica, ecologica e anche relativa all'azoto (Linxiu et al, 2021).

Quindi, per monitorare e quantificare gli impatti ambientali delle attività umane, sono stati sviluppati numerosi strumenti; tra questi, spiccano le valutazioni di impronta, come l'impronta ecologica, quella di carbonio, idrica, di azoto e di fosforo. Ognuna di queste valutazioni fornisce una misura specifica dell'impronta

che le attività umane lasciano nell'ambiente. Parallelamente, l'analisi del ciclo di vita (LCA) offre un quadro più completo, considerando tutti i flussi di materia ed energia associati a un prodotto o processo, dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento finale (Patterson et al., 2017).

Nel presente lavoro ci si focalizzerà in particolare sull'impronta di fosforo PF (Phosphorus Footprint), la quale sta guadagnando sempre più rilevanza nel dibattito ambientale, nonostante fino al giorno d'oggi abbia ricevuto poca attenzione. L'impronta di fosforo è un indicatore che quantifica la quantità di fosforo utilizzata per nutrire una popolazione in un anno (Lott et al., 2009). La Phosphorus Footprint (PF) include sia il consumo diretto di fosforo come, ad esempio, attraverso i fertilizzanti sia quello indiretto, legato alla produzione alimentare (Gunther et al., 2017).

Come già detto in precedenza, la quantificazione dell'impronta di fosforo nel settore alimentare è diventata una priorità a livello globale, alla luce dei crescenti impatti ambientali legati allo sfruttamento eccessivo di questo elemento. Nonostante la sua rilevanza, il Phosphorus Footprint è stato finora oggetto di scarso interesse. Nella letteratura scientifica, gli studi si concentrano principalmente su tre aspetti: emissioni di fosforo nell'ambiente, impronte di uso di P nella produzione alimentare (Metson et al., 2020) e analisi del ciclo di vita P (LCA-P) (Papangelou et al., 2021).

Le ricerche sulle emissioni di fosforo nell'ambiente si focalizzano sulla quantificazione delle perdite di questo nutriente lungo le catene produttive, proponendo modelli per stimarle (Metson et al., 2020). Le impronte di uso del fosforo quantificano la quantità di fosforo utilizzata per produrre il cibo consumato in una determinata regione (Metson et al., 2012). Infine, le analisi del ciclo di vita (LCA) specifiche per il fosforo considerano l'intero percorso di un prodotto, dalla produzione delle materie prime fino allo smaltimento finale, valutando tutti gli input, le perdite e le emissioni di fosforo lungo l'intera catena di approvvigionamento (Papangelou et al., 2021). Questo è proprio l'approccio adottato nel presente studio, che quantifica le emissioni di fosforo durante l'intero ciclo di vita del prodotto.

I vari studi sull'impronta di fosforo si focalizzano principalmente sui prodotti alimentari, poiché l'agricoltura è il settore che consuma la maggior parte del fosforo attraverso l'utilizzo di fertilizzanti. I flussi di fosforo sono quindi strettamente legati alla produzione agricola e alla catena alimentare.

In conclusione, le moderne pratiche agricole intensive, le diete ricche di proteine animali e la crescita della popolazione hanno accentuato la pressione sul ciclo del fosforo, rendendo ancora più urgente la quantificazione del suo impatto sull'ambiente (Metson et al., 2012).

2.2 Metodologia Life Cycle Assessment

L'analisi del ciclo di vita (LCA) è diventata uno strumento indispensabile per chi si occupa di ambiente. Questa analisi, basata su dati precisi, permette di misurare in modo scientifico l'impatto ambientale di un prodotto, dalla produzione allo smaltimento. Grazie a questi numeri, si possono prendere decisioni più consapevoli, sia in azienda, sia nelle istituzioni o nelle associazioni ambientaliste. Per esempio, l'LCA aiuta a scegliere gli indicatori ambientali giusti, a creare etichette ecologiche affidabili e a comunicare in modo trasparente l'impatto ambientale dei prodotti (Toniolo et al., 2021).

La valutazione del ciclo di vita (LCA) è uno strumento scientifico che permette di misurare l'impatto ambientale di un prodotto o servizio, dalla culla alla tomba, secondo le linee guida ISO 14040, un'LCA si compone di quattro fasi principali come si può osservare in figura 5:

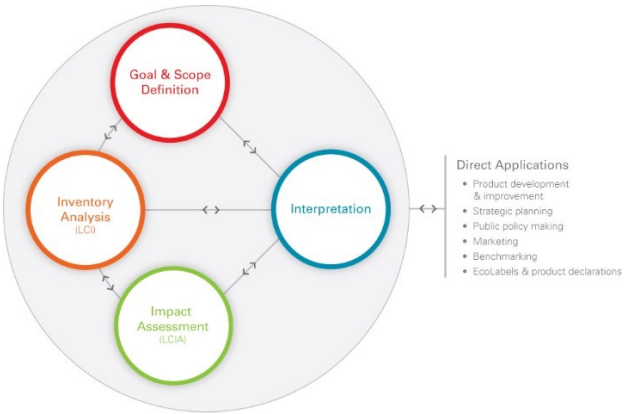

Figura 5: Fasi studio LCA (from Life Cycle Association of New Zeland)

1. Definizione degli obiettivi:

   Si stabilisce lo scopo dello studio, i confini del sistema da analizzare e l'unità di misura che rappresenta il prodotto o servizio;
2. Inventario del ciclo di vita:

   Si quantificano tutte le risorse utilizzate e le emissioni generate durante il ciclo di vita del prodotto, dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento finale;
3. Valutazione degli impatti:

   Si classificano e si valutano gli impatti ambientali identificati nella fase precedente, come il riscaldamento globale, l'inquinamento dell'aria e dell'acqua, e il consumo di risorse naturali;
4. Interpretazione dei risultati:

   Si analizzano i risultati ottenuti per trarre conclusioni e fornire raccomandazioni per migliorare le prestazioni ambientali del prodotto o servizio.

In conclusione, l'analisi del ciclo di vita (LCA) si presenta come un approccio metodologico rigoroso e completo per valutare l'impatto ambientale di un prodotto, processo o servizio lungo l'intero ciclo di vita. LCA, infatti, consente di tracciare e quantificare tutti i flussi di materiale generati. Il carattere iterativo della tecnica LCA, con le sue fasi interconnesse, garantisce un'analisi approfondita e consente di affinare i risultati, migliorando l'accuratezza della valutazione.

2.3 Calcolo PF con metodologia LCA

Considerando l'importanza e la diffusione della tecnica LCA e le questioni ambientali legate ai flussi di fosforo, come già descritto nel capitolo 1, si propone un metodo per quantificare la perturbazione complessiva del ciclo del fosforo attribuibile ad un sistema prodotto. Questo metodo si basa sull'approccio LCA in linea con le norme ISO 14040 e ISO 14044.

Zuliani et al. (2023) ha proposto un metodo innovativo per quantificare la perturbazione del ciclo dell'azoto. Nel presente lavoro si utilizzerà un approccio analogo, ma con riferimento al fosforo per quantificare la Phosphorus Footprint (PF), ovvero l'impronta di fosforo di un sistema prodotto.

Il metodo proposto è riconducibile, dal punto di vista operativo, ai procedimenti di calcoli relativi all'azoto reattivo: nel caso del fosforo l'applicazione tiene conto di tutte le emissioni di sostanze contenenti fosforo lungo l'intero ciclo di vita del prodotto.

In questo modo, è possibile calcolare un indicatore relativo alle emissioni di fosforo (P_{out}) che quantifica l'impatto complessivo del prodotto sul ciclo biogeochimico del fosforo.

Va sottolineato che, in questo studio, si utilizza la formulazione "indicatore di fosforo" (P_{out}) in analogia all'indicatore di azoto reattivo (N_rI) proposto da Zuliani et al. (2023).

Il modello di calcolo della PF (Phosphorus Footprint), ispirato al modello proposto per l'azoto da Zuliani et al., (2023), è rappresentato schematicamente in Figura 6 e rappresenta la metodologia per il calcolo dell'indicatore di fosforo P_{out}:

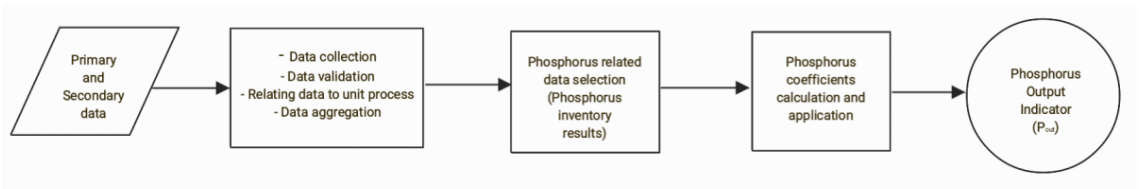

Figura 6: metodologia per calcolo dell'indicatore di fosforo (P_{out})

Inizialmente vengono raccolti e validati i dati relativi al sistema di prodotto, con particolare attenzione ai flussi di fosforo. Successivamente, questi dati vengono associati ai singoli processi produttivi e all'unità funzionale del prodotto. In seguito, si procede all'inventario del fosforo, identificando tutti i flussi di fosforo associati al sistema. Poi vengono calcolati i coefficienti di fosforo per ogni sostanza individuata nell'inventario contenente fosforo e infine viene calcolato l'indicatore di fosforo (P_{out}) che sintetizza l'impatto complessivo del sistema sul ciclo del fosforo.

Questo modello consente quindi di valutare la Phosphorus Footprint di un qualsiasi sistema prodotto, partendo dai risultati di un'analisi dell'inventario di ciclo di vita.

Nel prossimo capitolo, verrà descritta in modo dettagliato la metodologia per il calcolo dell'indicatore di fosforo (P_{out}), che corrisponde proprio alla Phosphorus Footprint (PF).

3. MATERIALI E METODI

3.1 Quadro metodologico

Il metodo proposto si basa sul calcolo dell'indicatore di fosforo, adattando un approccio LCA sviluppato per l'azoto (Zuliani et al., 2023); quantificando le emissioni di composti contenenti fosforo lungo l'intero ciclo di vita di un prodotto, questo metodo offre una valutazione completa dell'impronta ambientale legata al fosforo.

Nel presente studio, è stata applicata l'analisi del ciclo di vita (LCA) per calcolare l'impronta di fosforo PF (Phosphorus Footprint) per quattro prodotti alimentari. In particolare, è stata quantificata la quantità totale di fosforo in kg rilasciato nell'ambiente durante l'intero ciclo di vita di ciascun prodotto.

Il metodo prevede tre fasi principali:

1. La prima fase consiste nell'analisi di inventario del sistema prodotto per identificare tutti i flussi di sostanza contenenti fosforo;
2. Poi si procede con il calcolo dei *Coefficienti di fosforo* associati a ciascuna sostanza identificata nella prima fase; il calcolo dei coefficienti è una fase preliminare: vengono calcolati a priori per tutte le possibili sostanze contenenti fosforo presenti in un inventario;
3. Infine, si utilizzano i *Coefficienti di fosforo* per ottenere il calcolo dell'indicatore di fosforo, ovvero proprio la PF (Phosphorus Footprint).

Tutti i passaggi riportati sopra verranno spiegati nel corso del capitolo con le rispettive formule di calcolo.

Per la raccolta e l'analisi dei dati relativi alle emissioni è stato utilizzato il software SimaPro, uno strumento di riferimento nel settore dell'analisi del ciclo di vita (LCA) (Prè Sustainability, 2022). Viene utilizzato in oltre 80 paesi da aziende, consulenti e università, SimaPro consente di raccogliere dati dettagliati sulle diverse fasi del ciclo di vita di un prodotto o servizio, permettendo così di valutarne l'impatto ambientale in modo preciso e completo. Per l'analisi di inventario propedeutica al calcolo della Phosphorus Footprint, tra i numerosi database, sono

stati utilizzati Ecoinvent v3.6 (Wernet et al., 2016), Agri-footprint version 5 (van Paassen et al., 2019 e World Food LCA Database 3.5 (Nemecek et al., 2019).

Nel presente studio l'analisi si è focalizzata su quattro prodotti del settore alimentare, dato che quest'ultimo è il settore che contribuisce maggiormente all'alterazione del ciclo biogeochimico del fosforo. Questa scelta è stata fatta in linea con lo studio svolto da Zuliani et al. (2024) per il calcolo dell'impronta di azoto applicata ai medesimi quattro prodotti del settore alimentare.

I prodotti analizzati in questo studio sono quattro, il prodotto A (gelato) fatto di burro e latte, il prodotto B (gelato) non utilizza alcun prodotto lattiero-caseario per formare la parte di gelato, il prodotto C (pasticceria) vegano e infine il prodotto D (pasticceria) tradizionale. Per facilitare il confronto e l'interpretazione dei risultati è stato scelto 1kg di prodotto come unità funzionale e le caratteristiche dettagliate di ciascun prodotto, incluso il sistema di prodotto considerato, sono riportate in Tabella 1. Per motivi legali, non è possibile divulgare il nome dell'azienda produttrice dei quattro prodotti alimentari.

Product reference	Product description	Functional unit
Product A (ice cream)	Commercialized in single bucket, produced for the large-scale distribution (LSD) in plant n. 1	1 kg of "Product A" (0,5 kg/pz), every piece has a cap and a bucket made of coated paper as a primary packaging; distributed on the national market and consumed by the end user
Product B (ice cream)	Commercialized in both 4 pieces pack for the LSD and 18 pieces pack for Horeca channel, prduced in plant n. 1	1 kg of "Product B" (0,0559 kg/pz); every piece is wrapped with polypropylene as a primary packaging. Distributed on the national market with different secondary packaging depending on their final destination (Large-scale distribution or Horeca) and consumed by the end user.
Product C (pastry)	Commercialized in selling unit of 50 pieces for Horeca channel, produced in plant n. 2	1 kg of "Product C" (0,0823 kg/pz) sold within plastic bags of 50 pieces as a primary packaging; distributed, through the channel Horeca, on the national market and consumed by the end user
Product D (pastry)	Commercialized in selling unit of 6 pieces for Horeca channel, produced in plant n. 2	1 kg of ""Product D" (0,0817 kg/pz) sold within plastic bags of 50 pieces as a primary packaging; distributed, through the channel Horeca, on the national market and consumed by the end user

Tabella 1: descrizione quattro prodotti (Zuliani et al., 2024)

3.2 Determinazione dei Coefficienti di fosforo

Il punto di partenza del presente studio è stato l'analisi dei vasi database citati precedentemente, ovvero Ecoinvent v3.6 (Wernet et al., 2016), Agri-footprint version 5 (van Paassen et al., 2019) e World Food LCA Database 3.5 che comprendono oltre 3000 flussi di materiale. Tra questi, sono stati selezionati solo i flussi specificatamente associati al fosforo e ai suoi composti, dei quali ne sono risultati circa 40. Questi database forniscono informazioni su ciascun flusso, indicando il compartimento ambientale in cui viene rilasciato (aria, acqua, suolo) e il suo input, ovvero la sua origine (materia prima). Questa indicazione è stata fondamentale per i successivi calcoli del coefficiente di fosforo.

Per ciascuna sostanza, quindi, sono stati calcolati i *Coefficienti di fosforo* (Pc_i) secondo la formula seguente:

$$Coefficiente\ di\ Fosforo\ (Pc_i) = \frac{massa\ molare\ del\ P\ contenuto\ nella\ sostanza/compoto\ i-esimo}{massa\ molare\ della\ ostanza/compoto\ i-esimo} \quad (1)$$

La tabella 2 riportata di seguito indica i *Coefficienti di fosforo* calcolati con la formula 1 delle sostanze e composti contenenti fosforo a partire dai database della banca dati Ecoinvent v3.6, Agri-footprint version 5 e World Food LCA Database 3.5.

SUBSTANCE/ COMPOUND	MOLAR MASS [g/mol]	PHOSPHORUS N. atoms	PHOSPHORUS CONTENT [g/mol]	PHOSPHORUS COEFFICIENT
Acephate C4H10NO3PS	183.170	1	30.974	0.169
Azinphos-methyl C10H12N3O3PS2	317.300	1	30.974	0.098
Chlorethoxyfos C6H11Cl4O3PS	336.000	1	30.974	0.092
Chlorfenvinphos C12H14Cl3O4P	356.6	1	30.974	0.087
Chlorfenvinphos C12H14Cl3O4P	359.600	1	30.974	0.086
Chlorpyrifos C9H11Cl3NO3PS	350.600	1	30.974	0.088
Chlorpyrifos methyl C7H7Cl3NO3PS	322.500	1	30.974	0.096
Dialifor C14H17ClNO4PS2	393.800	1	30.974	0.079

SUBSTANCE/ COMPOUND	MOLAR MASS [g/mol]	PHOSPHORUS N. atoms	PHOSPHORUS CONTENT [g/mol]	PHOSPHORUS COEFFICIENT
Diazinon C12H21N2O3PS	304.350	1	30.974	0.102
Dichlorvos C4H7Cl2O4P	220.970	1	30.974	0.140
Dicrotophos C8H16NO5P	237.190	1	30.974	0.131
Dimethoate C5H12NO3PS2	229.3	1	30.974	0.135
Dimethoxon C5H12NO4PS	213.19	1	30.794	0.144
Dissolved Solids	n.a.	n.a.	n.a.	0.390
Ethephon C2H6ClO3P	144.490	1	30.974	0.214
Ethoprop C8H19O2PS2	242.300	1	30.974	0.128
Fenamiphos C13H22NO3PS	303.360	1	30.974	0.102
Fenitrothion C9H12NO5PS	277.240	1	30.974	0.112
Fonofos C10H15OPS2	246.3	1	30.974	0.126
Fosetyl C2H6O3P	109.040	1	30.974	0.284
Fosetyl-aluminium C6H15AlO9P3	351.08	3	92.922	0.265
Glufosinate C5H12NO4P	181.13	1	30.974	0.171
Glufosinate ammonium C5H15N2O4P	198.160	1	30.974	0.156
Glyphosate C3H8NO5P	169.070	1	30.974	0.183
Heptenophos C9H12ClO4P	250.610	1	30.974	0.124
Herbicides, unspecified	n.a.	n.a.	n.a.	0.000
Insecticeds, unspecified	n.a.	n.a.	n.a.	0.014
Malathion C10H19O6PS2	330.4	1	30.974	0.094
Methidathion C6H11N2O4PS3	302.3	1	30.974	0.102
Methyl parathion C8H10NO5PS	263.210	1	30.974	0.118

SUBSTANCE/ COMPOUND	MOLAR MASS [g/mol]	PHOSPHORUS N. atoms	PHOSPHORUS CONTENT [g/mol]	PHOSPHORUS COEFFICIENT
Monocrotophos C7H14NO5P	223.160	1	30.974	0.139
Oxydemeton-methyl C6H15O4PS2	246.300	1	30.974	0.126
Parathion C10H14NO5PS	291.260	1	30.974	0.106
Particulates, < 2.5 µm	n.a.	n.a.	n.a.	0.000
Particulates, > 10 µm	n.a.	n.a.	n.a.	0.000
Particulates, > 2.5 µm	n.a.	n.a.	n.a.	0.000
Pesticides, unspecified	n.a.	n.a.	n.a.	0.014
Phorate C7H17O2PS3	260.399	1	30.974	0.119
Phosalone C12H15ClNO4PS2	367.800	1	30.974	0.084
Phosmet C11H12NO4PS2	317.300	1	30.974	0.098
Phosphamidon C10H19ClNO5P	299.690	1	30.974	0.103
Phosphate O4P	94.971	1	30.974	0.326
Phosphate ore O4P	94.971	1	30.974	0.326
Phosphine H3P	33.998	1	30.974	0.911
Phosphoric acid H3PO4	97.995	1	30.974	0.316
Phosphorus P	30.974	1	30.974	1.000
Phosphorus, XX P	30.975	1	30.974	1.000
Phosphorus oxychloride Cl3OP	153.330	1	30.974	0.202
Phosphorus pentachloride Cl5P	208.200	1	30.974	0.149
Phosphorus trichloride Cl3P	137.330	1	30.974	0.226
Pirimiphos methyl C11H20N3O3PS	305.340	1	30.974	0.101

SUBSTANCE/ COMPOUND	MOLAR MASS [g/mol]	PHOSPHORUS N. atoms	PHOSPHORUS CONTENT [g/mol]	PHOSPHORUS COEFFICIENT
Profenofos C11H15BrClO3PS	373.630	1	30.974	0.083
Pyrazophos C14H20N3O5PS	373.400	1	30.974	0.083
Quinalphos C12H15N2O3PS	298.300	1	30.974	0.104
Sulfosate C6H16NO5PS	245.240	1	30.974	0.126
Suspended solids	n.a.	n.a.	n.a.	0.000
Tebupirimfos C13H23N2O3PS	318.370	1	30.974	0.097
Terbufos C9H21O2PS3	288.400	1	30.974	0.107
Tribufos C12H27OPS3	314.5	1	30.974	0.098
Trichlorfon C4H8Cl3O4P	257.430	1	30.974	0.120
Trisodium phosphate Na3O4P	163.941	1	30.974	0.189
Vamidothion C8H18NO4PS2	287.300	1	30.974	0.108

Tabella 2: calcolo dei coefficienti di fosforo (Pc)

Sono state formulate delle assunzioni sui flussi di dati all'interno del database (Prisco et al., 2023), al fine di calcolare i coefficienti di fosforo. In particolare, queste assunzioni sono le seguenti:

- Le emissioni di fosforo disciolto (DP) sono state considerate trascurabili nella presente analisi a causa delle basse concentrazioni di fosforo inorganico disciolto tipicamente riscontrate nelle acque dolci. Inoltre, le forme organiche predominanti di DP, come ortofosfato e monoestere e fosfato, sono state ritenute trascurabili (Claude et al., 2015);
- Per semplificare l'analisi delle emissioni di pesticidi e insetticidi, sono state prese in considerazione le sostanze più comuni come Diazinon, Melathion, Parathion e Methyl parathion. Per stimare il contenuto di fosforo di questi composti ci si è basati sui dati storici del National Water Summary (1984)

([1]), relativi alle concentrazioni di pesticidi nelle acque superficiali degli Stati Uniti. Moltiplicando queste concentrazioni per ii rispettivi coefficienti di fosforo, si è ottenuto un valore medio di Pc_i pari a 0.014, indicando un contributo trascurabile di fosforo proveniente da pesticidi e insetticidi.

I *Coefficienti di fosforo* calcolati sono utilizzati come fattori di ponderazione per aggregare i dati dell'inventario in un unico valore, ovvero l'indicatore di fosforo (P_{out}). In questo modo, si ottiene una misura complessiva dell'impatto ambientale legato al ciclo del fosforo.

3.3 Calcolo indicatore di fosforo (P_{out})

Utilizzando i *Coefficienti di fosforo* (Pc_i) calcolati con la formula (1), si è determinato l'indicatore di fosforo che rappresenta la quantità totale di fosforo rilasciato da un sistema produttivo nei diversi comparti ambientali. Il calcolo è stato effettuato utilizzando la seguente formula:

$$\text{Phosphorus Indicator } (P_{out}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} s_{i,j} \cdot Pc_i \quad (2)$$

Dove:

- P_{out} è l'indicatore di fosforo calcolato per i sistemi prodotto;
- i è l'indice di identificazione della sostanza/composto specifico;
- j è l'indice di identificazione del compartimento delle sostanze di emissione;
- n è il numero totale di sostanze e composti contenenti fosforo per il sistema prodotto;
- m è il numero totale dei compartimenti di emissione (per il presente studio m=3, in quanto i compartimenti considerati sono aria, acqua e suolo);
- $s_{i,j}$ è l'emissione della sostanza i nel compartimento j come da risultato dall'analisi di inventario;
- Pc_i è il *Coefficiente di fosforo* per la sostanza/composto i-esimo.

Quindi, moltiplicando l'emissione di ciascuna sostanza contenente fosforo per il relativo *Coefficiente di fosforo*, si ottiene la quantità di fosforo effettivamente

rilasciata nell'ambiente durante il ciclo di vita del prodotto. Sommando queste quantità si ottiene il totale di fosforo rilasciato. Questo valore rappresenta un indicatore chiave dell'impatto ambientale del prodotto (P_{out}), in quanto permette di quantificare il fosforo immesso nell'ambiente.

A differenza dell'azoto, che è considerato abbondante in natura e quindi non soggetto a preoccupazioni legate all'esaurimento delle risorse, il fosforo è considerato una risorsa "scarsa". Pertanto, nelle banche dati utilizzate per l'analisi di inventario, sono presenti sia i flussi relativi al fosforo rilasciato nell'ambiente sia i flussi relativi alla quantità di fosforo prelevata dalle risorse naturali.

Nell'analisi condotta da Zuliani et al., 2024 si è scelto di focalizzare l'attenzione sui flussi in uscita di azoto, non considerando i flussi di entrata. La scelta è stata motivata dal fatto che, nelle banche dati, i flussi in input dell'azoto non sono riportati o sono riportati in modo non completo in quanto l'azoto non è considerata una risorsa "scarsa" e, in una prospettiva LCA, i potenziali impatti riconducibili al suo consumo non vengono calcolati (Zuliani et al., 2023).

Al contrario, nel presente studio, ci si propone di valutare anche i flussi in entrata di fosforo, identificate nell'inventario come "materie prime", al fine di quantificare l'impronta del prodotto anche in termini di prelievo di questa risorsa limitata. Questa scelta permetterà di ottenere un quadro più completo dell'impatto ambientale del prodotto e di individuare le fasi del ciclo di vita in cui si verificano le maggiori perdite di fosforo.

Nel capitolo seguente verranno presentati i calcoli svolti per l'indicatore di fosforo dei quattro prodotti del settore alimentare presentati in Tabella 1 riportata a inizio capitolo.

4. RISULTATI E DISCUSSIONI

4.1 Applicazione del metodo

La metodologia innovativa per il calcolo del Phosphorus Footprint proposta è stata applicata a quattro prodotti alimentari (prodotto A-gelato, prodotto B-gelato, prodotto C-pasticceria e prodotto D-pasticceria) precedentemente analizzati da Zuliani et al., (2024) in termini di Nitrogen Footprint. Per questa valutazione sono stati utilizzati i dati provenienti dalle banche dati Ecoinvent, Agri-footprint version5 e World Food LCA Database 3.5.

Riprendendo i dati della Tabella 1 del Capitolo 3, è possibile delineare un quadro dettagliato dei quattro prodotti analizzati in questo studio.

Sulla base dei dati di inventario, è stato sviluppato un algoritmo in Excel per quantificare l'Indicatore di fosforo (P_{out}). L'algoritmo opera selezionando i flussi di sostanze contenenti fosforo, applicando i *Coefficienti di fosforo* predefiniti e sommando i flussi di emissioni di fosforo così ottenuti per determinare il valore complessivo dell'indicatore per il sistema prodotto. L'utilizzo di un algoritmo è stato reso necessario dalla complessità intrinseca della gestione di un inventario costituito da oltre 3000 flussi, la cui elaborazione manuale risulterebbe inefficiente e soggetta ad errori.

4.2 Risultati e discussioni

Sono stati analizzati quattro prodotti del settore alimentare presentati nella Tabella 1 del paragrafo precedente, presenti nei database Ecoinvent, Agri-footprint version5 e World Food LCA Database 3.5, utilizzando un metodo specifico spiegato nel capitolo precedente per calcolare la Phosphorus Footprint (PF). È stata quantificata la quantità di fosforo rilasciato (P_{out}) nell'ambiente durante il ciclo di vita di ogni prodotto, ottenendo così un indicatore che permette di confrontare l'impatto di ciascun prodotto. Utilizzando i coefficienti di fosforo è stato calcolato l'indicatore di fosforo (P_{out}), che rappresenta la quantità di fosforo rilasciata nell'ambiente per ogni chilogrammo di prodotto (1kg).

Per ciascuno dei quattro prodotti (A, B, C e D), è stata elaborata una tabella dettagliata che riporta tutti i flussi di fosforo rilasciati nell'ambiente, suddivisi per

compartimento ambientale (acqua, terreno e aria). Questi dati sono stati calcolati considerando una quantità unitaria di prodotto, pari a 1 kg, al fine di facilitare il confronto tra i diversi prodotti.

❖ Prodotto A

SUBSTANCE	COMPARTMENT	COEFFICIENT P	PRODUCT A [kg]	PRODUCT A [%]
Phosphate	Acqua	0.326	2.980E-04	78.122
Phosphorus	Acqua	1.000	5.833E-05	15.289
Glyphosate	Terreno	0.183	8.936E-06	2.342
Chlorpyrifos	Terreno	0.088	3.305E-06	0.866
Phosphorus, BR	Acqua	1.000	2.582E-06	0.677
Phosphorus	Terreno	1.000	1.851E-06	0.485
Phosphorus, FR	Acqua	1.000	1.172E-06	0.307
Glyphosate	Aria	0.183	6.010E-07	0.158
Phosphorus, ES	Acqua	1.000	5.411E-07	0.142
Phosphorus, IT	Acqua	1.000	5.118E-07	0.134
Phosphorus, DE	Acqua	1.000	4.735E-07	0.124
Phosphorus, PL	Acqua	1.000	4.455E-07	0.117
Phosphorus, US	Acqua	1.000	4.329E-07	0.113
Glufosinate	Terreno	0.171	3.704E-07	0.097
[…]	[…]	[…]	[…]	[…]
	totale P(out)		**3.815E-04**	100.000

Tabella 4: principali output phosphorus Footprint (P_{out}) del prodotto A

Compartimento	Product A [kg]	Product A [%]
Acqua	3.648E-04	95.6
Terreno	1.528E-05	4.0
Aria	1.377E-06	0.4
Totale	3.815E-04	100.0

Tabella 5: calcolo emissioni di P in kg e in %

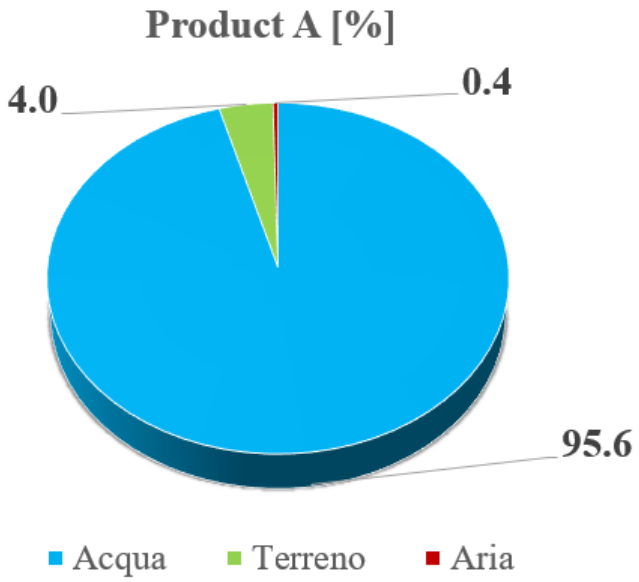

Figura 7: grafico suddivisione compartimenti per il prodotto A

La tabella 4 illustra i principali flussi in uscita di fosforo (P_{out}) associati alla produzione di 1 kg del prodotto A. In totale, vengono rilasciati 3.815E-04 kg di fosforo.

I composti principali ritrovati nei flussi in uscita sono il fosfato (78.1%), il fosforo elementare (15.3%) e il glifosato (2.3%).

Le due immagini riportate sopra (Tabella 5 e Figura 7) visualizzano la distribuzione percentuale di questi flussi nei tre compartimenti ambientali: acqua, aria e terreno. È evidente che la maggioranza del fosforo viene rilasciata nell'acqua (95.6%), mentre solo una piccola percentuale nel terreno (4.0%) e una quantità ancora minore nell'aria (0.4%).

I risultati ottenuti per il prodotto A presentano una forte somiglianza con quelli dei prodotti B, C e D che verranno presentati di seguito con i relativi commenti.

❖ Prodotto B

SUBSTANCE	COMPARTMENT	COEFFICIENT P	PRODUCT B [kg]	PRODUCT B [%]
Phosphate	Acqua	0.326	3.543E-05	78.230
Glyphosate	Terreno	0.183	4.667E-06	10.305
Phosphorus	Acqua	1.000	3.974E-06	8.775
Fosetyl-aluminium	Terreno	0.265	4.722E-07	1.043
Phosphorus	Terreno	1.000	2.236E-07	0.494
Chlorpyrifos	Terreno	0.088	1.053E-07	0.232
Glufosinate	Terreno	0.171	7.623E-08	0.168
Phosphorus	Aria	1.000	6.189E-08	0.137
Phosphate	Terreno	0.326	5.639E-08	0.125
Sulfosate	Terreno	0.126	4.651E-08	0.103
Malathion	Terreno	0.094	3.931E-08	0.087
Phosphorus, TH	Acqua	1.000	3.489E-08	0.077
Phosmet	Terreno	0.098	3.330E-08	0.074
Glyphosate	Aria	0.183	1.571E-08	0.035
[…]	[…]	[…]	[…]	[…]
	totale Pout		**4.529E-05**	100.000

Tabella 7: phosphorus Footprint (P_{out}) del prodotto B

Compartiemento	Product B [kg]	Product B [%]
Acqua	3.944E-05	87.1
Terreno	5.757E-06	12.7
Aria	9.026E-08	0.2
Totale	4.529E-05	100.0

Tabella 8: calcolo emissioni P in kg e in %

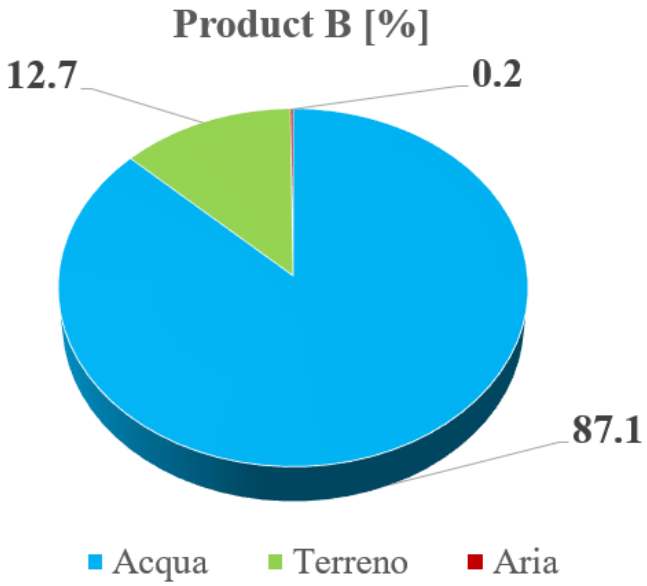

Figura 8: grafico suddivisione compartimenti per il prodotto B

La tabella 7 riporta i flussi in uscita di fosforo (P_{out}) associati alla produzione di 1 kg del prodotto B. In totale, vengono rilasciati 4.529E-05 kg di fosforo.

I composti principali ritrovati nei flussi in uscita sono gli stessi del prodotto A, ma in quantità diverse, ovvero il fosfato (78.2%), il glifosato (10.3%) e il fosforo elementare (8.8%); in più c'è anche una piccolissima percentuale di fosetil alluminio che è un pesticida (1.0%).

Le due immagini riportate sopra (Tabella 8 e Figura 8) visualizzano la distribuzione percentuale di questi flussi nei tre compartimenti ambientali: acqua, aria e terreno. Come anche nel prodotto A, descritto precedentemente, la maggioranza del fosforo viene rilasciata in acqua (87.1%), mentre solo una piccola percentuale nel terreno (12.7%) e una quantità molto minore nell'aria (0.2%).

❖ Prodotto C

SUBSTANCE	COMPARTMENT	COEFFICIENT P	PRODUCT C [kg]	PRODUCT C [%]
Phosphorus	Acqua	1.000	3.477E-04	70.921
Phosphate	Acqua	0.326	1.387E-04	28.289
Glyphosate	Terreno	0.183	1.325E-06	0.270
Phosphorus	Terreno	1.000	8.474E-07	0.173
Phosphorus, BR	Acqua	1.000	3.873E-07	0.079
Phosphorus, FR	Acqua	1.000	1.759E-07	0.036
Phosphorus	Aria	1.000	1.568E-07	0.032
Chlorpyrifos	Terreno	0.088	1.521E-07	0.031
Phosphorus, ES	Acqua	1.000	8.118E-08	0.017
Phosphorus, IT	Acqua	1.000	7.679E-08	0.016
Phosphorus, DE	Acqua	1.000	7.105E-08	0.014
Phosphorus, PL	Acqua	1.000	6.684E-08	0.014
Phosphorus, US	Acqua	1.000	6.495E-08	0.013
Phosphorus, RO	Acqua	1.000	4.389E-08	0.009
Phosphorus, HU	Acqua	1.000	3.365E-08	0.007
Glyphosate	Aria	0.183	3.256E-08	0.007
Phosphorus, AR	Acqua	1.000	3.199E-08	0.007
Phosphorus, UA	Acqua	1.000	2.990E-08	0.006
[…]	[…]	[…]	[…]	[…]
totale Pout			**4.902E-04**	100.000

Tabella 9: phosphorus Footprint (P_{out}) del prodotto C

Compartimento	Product C [kg]	Product C [%]
Acqua	4.876E-04	99.47
Terreno	2.402E-06	0.49
Aria	2.093E-07	0.04
Totale	4.902E-04	100.0

Tabella 10: calcolo emissioni di P in kg e in %

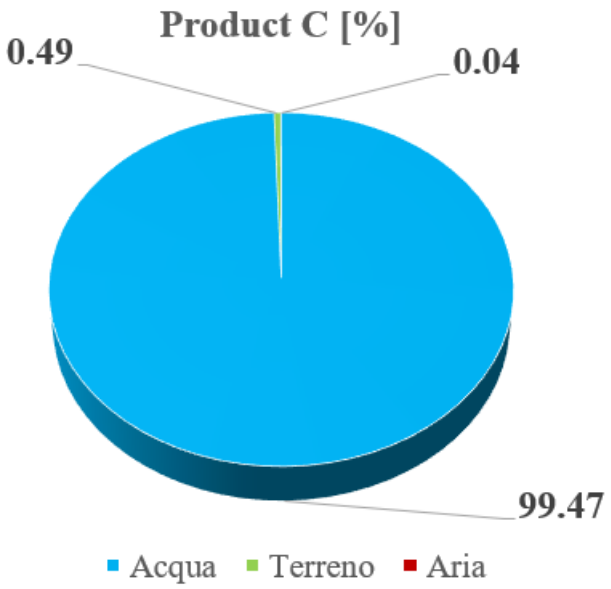

Figura 9: grafico suddivisione compartimenti per il prodotto C

La tabella 9 riporta i flussi in uscita di fosforo (P_{out}) associati alla produzione di 1 kg del prodotto C. In totale, vengono rilasciati 4.902E-04 kg di fosforo.

I composti principali ritrovati nei flussi in uscita sono gli stessi del prodotto A e B, ovvero il fosforo elementare (70.9%), il fosfato (28.3%) e una piccola percentuale di glifosato (0.3%).

Le due immagini riportate sopra (Tabella 9 e Figura 9) visualizzano la distribuzione percentuale di questi flussi nei tre compartimenti ambientali: acqua, aria e terreno. Come anche nel prodotto A e B, descritto precedentemente, la maggioranza del fosforo viene rilasciata nell'acqua con una percentuale altissima (99.47%), mentre solo una piccola percentuale nel terreno (0.49%) e una quantità ancora minore nell'aria, quasi trascurabile (0.04%).

❖ Prodotto D

SUBSTANCE	COMPARTMENT	COEFFICIENT P	PRODUCT D [kg]	PRODUCT D [%]
Phosphorus	Acqua	1.000	2.558E-04	69.848
Phosphate	Acqua	0.326	1.082E-04	29.538
Glyphosate	Terreno	0.183	1.067E-06	0.291
Phosphorus	Terreno	1.000	8.979E-07	0.245
Phosphorus	Aria	1.000	1.194E-07	0.033
Chlorpyrifos	Terreno	0.088	4.254E-08	0.012
Phosphate	Terreno	0.326	3.912E-08	0.011
Glufosinate	Terreno	0.171	1.851E-08	0.005
Phosphorus, DE	Acqua	1.000	1.658E-08	0.005
Sulfosate	Terreno	0.126	1.361E-08	0.004
Glyphosate	Aria	0.183	7.155E-09	0.002
Chlorpyrifos	Aria	0.088	4.104E-09	0.001
Parathion	Terreno	0.106	4.023E-09	0.001
Malathion	Terreno	0.094	3.838E-09	0.001
Acephate	Terreno	0.169	2.369E-09	0.001
[…]	[…]	[…]	[…]	[…]
totale Pout			**3.662E-04**	100.000

Tabella 11: phosphorus Footprint (P_{out}) del prodotto D

Compartimento	Product D [kg]	Product D [%]
Acqua	3.640E-04	99.39
Terreno	2.097E-06	0.57
Aria	1.318E-07	0.04
Totale	3.662E-04	100

Tabella 12: calcolo emissioni di P in kg e in %

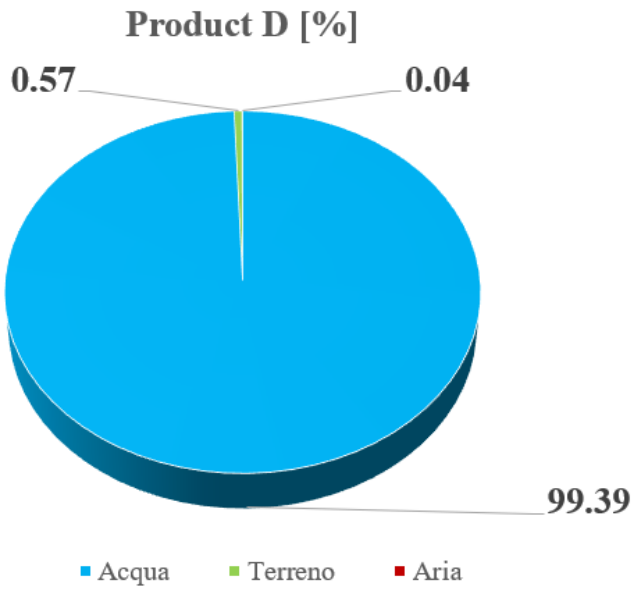

Figura 10: grafico suddivisione compartimenti per il prodotto D

La tabella 11 riporta i flussi in uscita di fosforo (P_{out}) associati alla produzione di 1 kg del prodotto D. In totale, vengono rilasciati 3.662E-04 kg di fosforo.

I composti principali ritrovati nei flussi in uscita sono gli stessi del prodotto A, B e C ovvero il fosforo elementare (69.8%), il fosfato (29.5%) e una piccola percentuale di glifosato (0.3%).

Le due immagini riportate sopra (Tabella 12 e Figura 10) visualizzano la distribuzione percentuale di questi flussi nei tre compartimenti ambientali: acqua, aria e terreno. Come anche nel prodotto A, B e C descritti precedentemente, la maggioranza del fosforo viene rilasciata nell'acqua con una percentuale altissima, leggermente minore del prodotto C (99.39%), mentre solo una piccola percentuale nel terreno (0.57%) e una quantità ancora minore nell'aria, quasi trascurabile (0.04%), come per il prodotto C.

L'analisi dei flussi in uscita ha evidenziato che i quattro prodotti (A, B, C e D) presentano in comune significative quantità di fosforo, fosfato e glifosato, indicando questi ultimi come i principali componenti individuati, come si può osservare nella tabella (tab. 13) e grafico (fig. 11) riportati di seguito.

prodotto	fosfato (acqua) [%]	fosforo (acqua) [%]	glifosato (terreno) [%]	altri [%]
A	78.122	15.289	2.342	4.247
B	78.230	8.775	10.305	2.691
C	28.289	70.921	0.270	0.520
D	29.538	69.848	0.291	0.323

Tabella 13: flussi principali in %

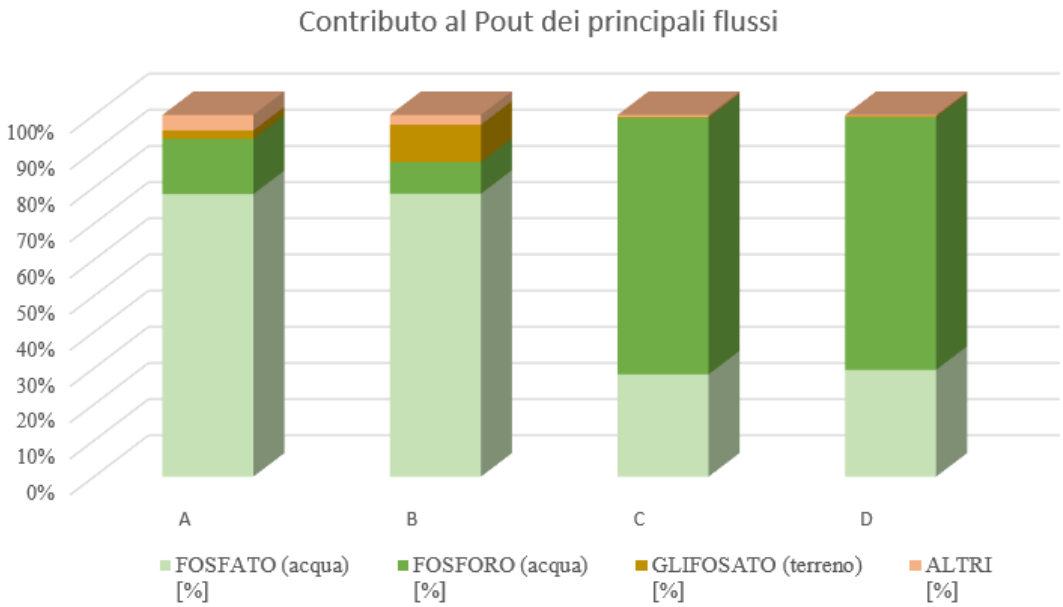

Figura 11: rappresentazione flussi principali per il calcolo di P_{out})

Il grafico riportato sopra (fig. 11) mostra la composizione dei flussi che contribuiscono maggiormente al calcolo dell'impronta di fosforo (P_{out}) per i quattro prodotti analizzati. È evidente che tre elementi predominano, come anche già affermato precedentemente, i quali sono: fosfato, fosforo elementare e glifosato. Questi tre componenti rappresentano la quota più significativa dei flussi totali, superando di gran lunga la categoria "altri" che è la somma dei contributi di tutti gli altri flussi, ovvero la somma di tutte le altre sostanze che non siano fosforo, fosfato e glifosato. Ciò indica che la maggior parte dell'impronta di fosforo è attribuibile principalmente a questi tre elementi.

L'esame dei flussi rivela una correlazione tra la categoria del prodotto e la composizione dell'impronta di fosforo. I gelati (A e B), caratterizzati da una maggiore presenza di ingredienti a base di latte, mostrano un'incidenza più elevata di fosfato. Al contrario, i prodotti di pasticceria (C e D), con formulazioni più

variegate, presentano una maggiore presenza di fosforo elementare, che potrebbe essere attribuito all'utilizzo di diversi tipi di grassi e additivi.

Probabilmente le diverse banche dati utilizzate denominano le emissioni di composti di fosforo in acqua in un caso come fosforo e nell'altro come fosfato, in questo caso possono essere considerati come la stessa tipologia di emissione.

Risulta inoltre evidente dai grafici precedenti, che per tutti e quattro i prodotti, la maggioranza di emissioni di fosforo finisce nell'acqua e in misura minore, nel terreno. Le emissioni in aria sono trascurabili, rappresentando appena lo 0.09%. Di seguito viene riportato un grafico (Figura 12) con la suddivisione delle emissioni nei vari compartimenti (acqua, aria e terreno) per tutti e quattro i prodotti.

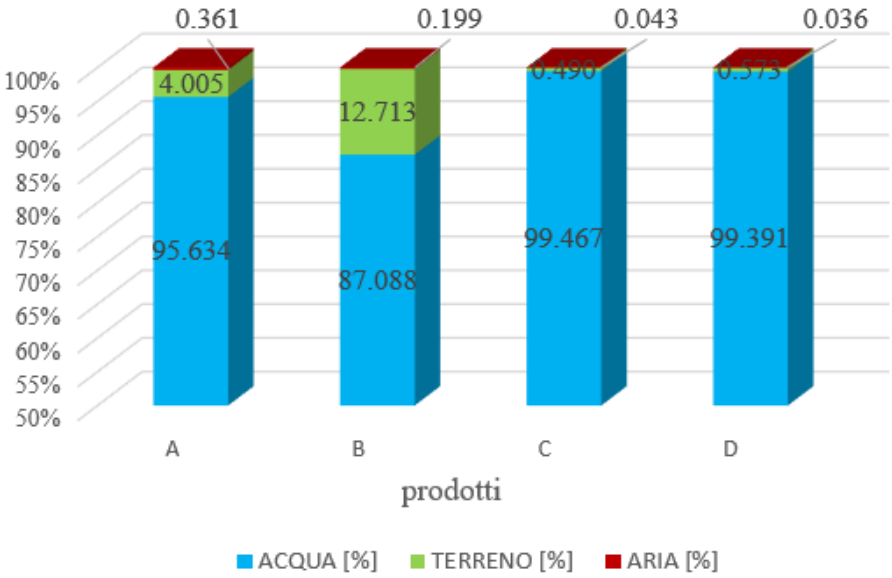

Figura 12: emissioni di fosforo in % suddivise nei vari compartimenti

Il grafico a barre riportato sopra presenta la distribuzione percentuale dei flussi di emissione di fosforo nei tre compartimenti ambientali: acqua, terreno e aria per i quattro prodotti studiati. Si osserva che, per tutti i prodotti analizzati, la componente idrica rappresenta di gran lunga la quota maggiore delle emissioni totali. Probabilmente perché l'agricoltura stessa è un grande utilizzatore di fertilizzanti fosfatici. Le piogge e l'irrigazione trascinano una parte di questi fertilizzanti nei fiumi, laghi e oceani, come anche spiegato nei capitoli precedenti.

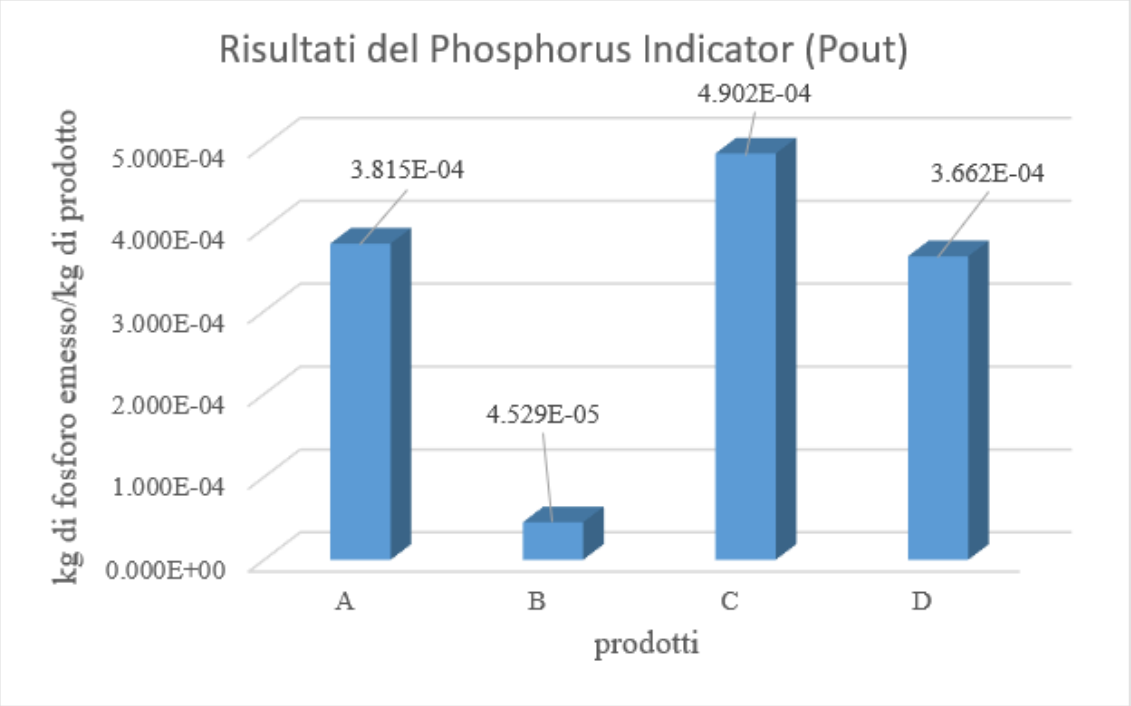

Figura 11: Risultati di P_{out} in kg per1 kg di prodotto

La Figura 11 illustra i risultati dell'analisi dell'impronta di fosforo, calcolata tramite l'Indicatore di fosforo (P_{out}), per i quattro prodotti alimentari oggetto di studio. I dati riportati rappresentano la quantità di fosforo rilasciata nell'ambiente, in chilogrammi per chilogrammo di prodotto, durante il ciclo di vita dei prodotti stessi. I risultati ottenuti sono molto simili per tutti e quattro i prodotti come si può vedere dal grafico a barre riportato sopra (fig. 11).

Si osserva che il prodotto C rappresenta il valore più elevato di P_{out} (4.902E-04 kg), indicando un maggiore impatto ambientale in termini di rilascio di fosforo; invece, il prodotto con il minor valore di emissioni di P è il prodotto B (4.529E-05 kg).

Il presente studio, pur avendo approfondito l'analisi delle emissioni di fosforo (P_{out}), si propone di fornire un quadro ancora più completo dell'impatto ambientale del prodotto. A tal fine, si è proceduto alla quantificazione dei flussi in entrata di fosforo, ovvero delle materie prime contenenti questo elemento. Tale scelta si giustifica con la crescente consapevolezza dell'impronta di fosforo come risorsa limitata e indispensabile per la produzione alimentare e per la salute degli ecosistemi, come anche già affermato nei capitoli precedenti.

La tabella 14 presenta i flussi in entrata di fosforo risultati dall'analisi di inventario dalle banche dati Ecoinvent, Agri-footprint version5 e World Food LCA Database 3.5. Queste sostanze sono fondamentali per la valutazione dell'impronta di ambientale dei prodotti alimentari analizzati. Le materie prime, elencate nella prima colonna, rappresentano le fonti di fosforo introdotte nel processo produttivo. Il coefficiente P, moltiplicato per la quantità di materia prima utilizzata, permette di calcolare la quantità effettiva di fosforo introdotta nel sistema. Le colonne successive riportano i risultati di questi calcoli per ciascun prodotto, quantificando l'apporto di fosforo proveniente dalle materie prime, con l'utilizzo della formula (2) per il calcolo del fosforo in kg.

SUBSTANCE	COEFFICIENT P	PRODUCT A [kg]	PRODUCT B [kg]	PRODUCT C [kg]	PRODUCT D [kg]
Phosphate ore	0.33	1.04E-03	5.84E-04	3.63E-05	2.18E-04
Phosphorus	1.00	2.82E-03	1.46E-04	4.37E-04	5.29E-04
Phosphorus, 18% in apatite, 4% in crude ore	1.00	5.59E-06	2.73E-06	1.94E-07	1.20E-06
totale		**3.87E-03**	**7.32E-04**	**4.74E-04**	**7.48E-04**

Tabella 14: flussi di P in ingresso al processo produttivo (input)

Il grafico riportato di seguito illustra il confronto tra i flussi in entrata (materie prime) e in uscita (emissioni) di fosforo per la produzione dei quattro prodotti alimentari (A, B, C e D).

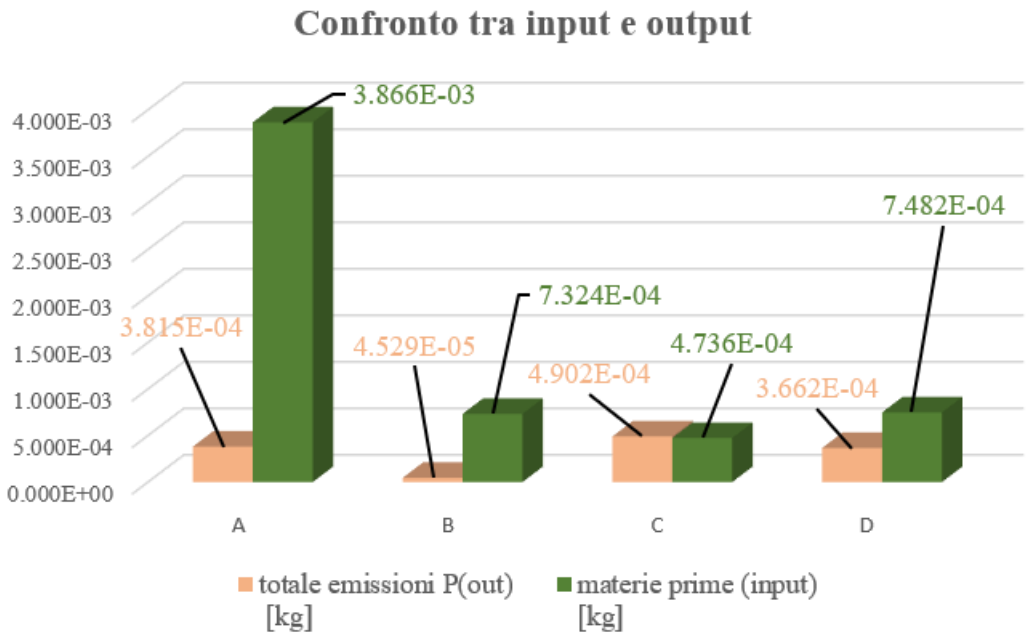

Figura 12: confronto tra input e output

Il grafico presentato sopra (fig. 12) offre una panoramica comparativa dei flussi di fosforo associati alla produzione dei quattro prodotti alimentari (A, B, C e D), focalizzandosi sia sull'input (materie prime) che sull'output (emissioni P_{out}). Questa analisi estesa, che considera anche i flussi in entrata di fosforo, permette di quantificare l'impronta ambientale del prodotto non solo in termini di emissioni, ma anche in termini di prelievo di questa risorsa limitata.

Il prodotto A si conferma come quello con il maggior impatto ambientale, sia in termini di materie prime utilizzate che di emissioni generate. L'elevato valore delle materie prime indica un significativo prelievo di fosforo dalle risorse naturali, sottolineando l'importanza di valutare l'intero ciclo di vita del prodotto per comprendere in modo completo il suo impatto.

Il prodotto B, pur presentando un quantitativo di materie prime simile al prodotto D, si distingue per emissioni significative inferiori.

Il prodotto D presenta un profilo equilibrato tra utilizzo di materie prime ed emissioni. Tuttavia, anche in questo caso sarebbe utile un'analisi più dettagliata per individuare eventuali elementi di approfondimento in relazione ai dati utilizzati.

Il prodotto C presenta un'anomalia, con emissioni di fosforo (4.902E-04 kg) superiori alle materie prime (4.74E-04 kg), questo caso richiede ulteriori approfondimenti che non verranno presentati nel presente studio; questa anomalia potrebbe essere causata dall'utilizzo di banche dati differenti che hanno probabilmente portato a problemi di incoerenza.

L'analisi dei flussi di fosforo, condotta considerando sia le materie prime in ingresso che le emissioni di uscita, offre una visione approfondita dell'impronta ambientale dei prodotti alimentari. In particolare, l'esame dei flussi in entrata sottolinea l'importanza del fosforo come risorsa non rinnovabile e limitata. Come anche già affermato nei capitoli precedenti, l'agricoltura intensiva e l'aumento della popolazione mondiale esercitano una pressione crescente su questa risorsa fondamentale per la produzione alimentare (Nemery et al., 2019).

È pertanto urgente adottare strategie mirate per ottimizzare l'utilizzo di questa risorsa, ridurre le perdite lungo la catena alimentare e promuovere pratiche agricole sostenibili che limitino il dilavamento e l'erosione dei suoli, principali cause di perdita di fosforo nell'ambiente. Solo attraverso una gestione integrata sarà possibile conciliare la sicurezza alimentare con una tutela delle risorse naturali e la mitigazione degli impatti ambientali.

Come già affermato nei capitoli precedenti, l'analisi dell'impronta ambientale dei prodotti alimentari è fondamentale per valutare l'impatto delle attività umane sugli ecosistemi. In questo studio è stato ritenuto opportuno confrontare i risultati ottenuti nella valutazione dell'impronta di fosforo con quelli ottenuti da Zuliani et al., 2024 sull'impronta di azoto e calcolata per i medesimi quattro prodotti alimentari (A, B, C e D) a partire dagli stessi risultati dell'analisi di inventario del ciclo di vita. Di seguito vengono riportati il grafico rispettivamente delle emissioni di fosforo e azoto (Zuliani et al., 2024).

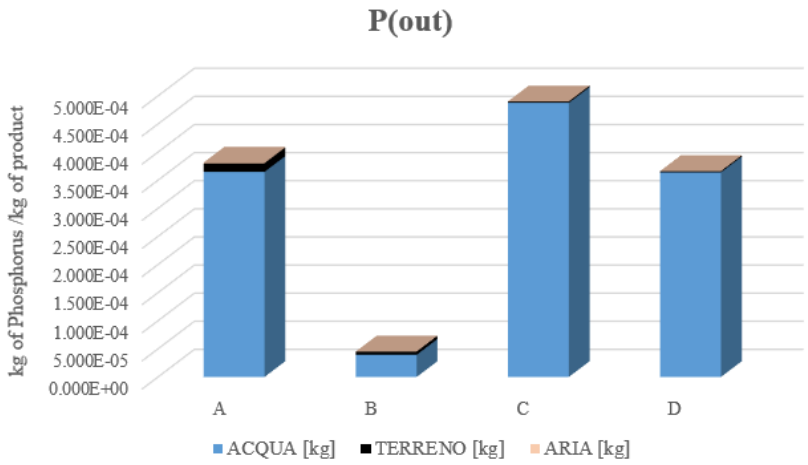

Figura 13: emissioni di P (P_{out}) in kg/kg di prodotto

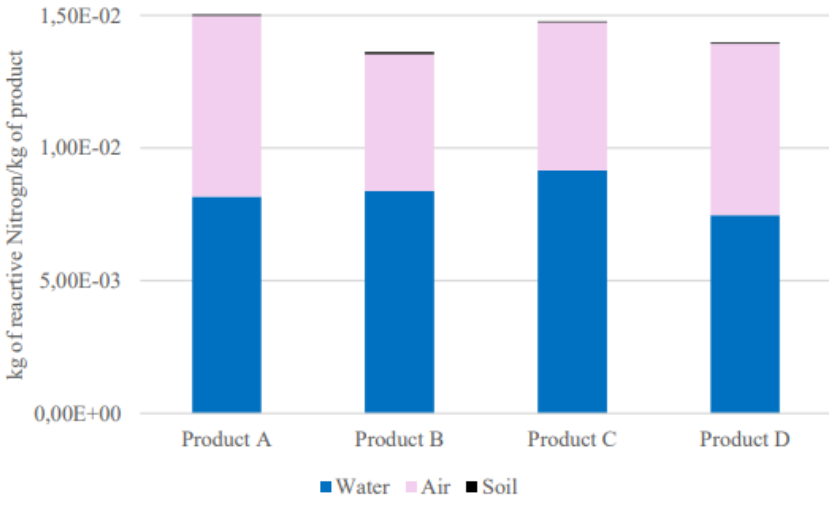

Figura 14: emissioni di N (N_rI) in kg/kg di prodotto, Zuliani (2024)

Entrambi i grafici presentati mostrano l'impronta ambientale del rispettivo elemento (fosforo o azoto) dei quattro prodotti studiati, suddivisa nei tre principali compartimenti, ovvero acqua, aria e terreno.

Entrambe le analisi evidenziano il compartimento idrico come quello maggiormente interessato dalle emissioni, sia nel caso del fosforo che dell'azoto. Questo risultato sottolinea l'importanza delle pratiche agricole e industriali nella gestione delle acque reflue e nella prevenzione dell'inquinamento dei corpi idrici.

Tuttavia, emergono differenze significative nell'importanza relativa degli altri due compartimenti. Mentre l'impronta di azoto nell'aria risulta essere considerevole, a causa delle emissioni di ossidi di azoto derivanti dalla combustione di combustibili fossili e dai processi agricoli, l'impronta di fosforo nell'aria è generalmente contenuta; infatti, come si può osservare dal grafico (fig. 13) le emissioni in aria sono quasi trascurabili. Al contrario, l'impronta di fosforo nel terreno risulta essere più rilevante rispetto a quella dell'azoto, indicando che una parte significativa del fosforo applicato ai suoli agricoli può essere presa per lisciviazione o erosione.

Tra i prodotti analizzati, il prodotto A presenta le emissioni di azoto più elevate (1.50E-02 kg), mentre il prodotto C è quello che emette la maggiore quantità di fosforo (4.90E-04 kg). Al contrario, il prodotto B si distingue per le emissioni più contenute di entrambi gli elementi. È importante sottolineare che, in termini assoluti, le emissioni di azoto risultano significativamente superiori a quelle di fosforo, come evidenziato dalla differenza di un ordine di grandezza.

Il confronto tra l'impronta di fosforo e azoto ha evidenziato sia similitudini che differenze. Entrambe le sostanze nutrienti esercitano un impatto significativo sull'ambiente, in particolare sui corpi idrici. Tuttavia, i meccanismi attraverso cui queste sostanze si diffondono nell'ambiente e i compartimenti maggiormente interessati dalle emissioni sono differenti.

Un'analisi più approfondita potrebbe rivelarsi utile per individuare gli specifici ingredienti all'interno dei prodotti A, B, C e D che contribuiscono maggiormente alle emissioni di fosforo. Il latte, con le sue proteine (caseina) e zuccheri (lattosio) ricchi di fosforo, rappresenterebbe un primo elemento, in particolare per i prodotti A e D (2). Tuttavia, anche gli altri ingredienti, come le uova (soprattutto il tuorlo,

ricco di fosfolipidi), potrebbe giocare un ruolo importante. Un' analisi dettagliata di tutti gli ingredienti contenenti fosforo potrebbe fornire indicazioni più precise sulle fonti di emissione e aprire nuove prospettive per future ricerche in questo ambito. Sebbene tale analisi non rientri negli obiettivi del presente studio, questa costituisce un interessante punto di partenza per approfondimenti successivi.

Questi risultati sottolineano l'importanza di adottare misure mirate per ridurre le emissioni di fosforo e azoto, sia nell'agricoltura che in altri settori. In particolare, è necessario promuovere pratiche agricole sostenibili che per esempio minimizzino le perdite di nutrienti nei suoli e nelle acque, nonché lo sviluppo di tecnologie innovative per il recupero e il riciclo di queste risorse.

Come già affrontato nei capitoli precedenti, il fosforo è un elemento essenziale per la vita e l'agricoltura, è inoltre una risorsa limitata e non rinnovabile, principalmente estratta da rocce fosfatiche. L'esaurimento progressivo di queste riserve, unito alla crescente domanda di cibo a livello globale, rende indispensabile ricercare nuove strategie per una gestione più sostenibile del fosforo (Zengwei et al., 2018).

Parallelamente, il rilascio eccessivo di fosforo negli ecosistemi acquatici, derivante principalmente dagli scarichi degli impianti di trattamento delle acque reflue WWTP (Wastewater treatment plan), provoca gravi problemi di eutrofizzazione. In quest'ottica, gli WWTP assumono un ruolo cruciale nella gestione del ciclo del fosforo, l'opportunità di recuperare questo prezioso nutriente e di ridurre l'impatto ambientale delle attività umane (Di Capua et al., 2022), questa può essere una delle pratiche di recupero di fosforo.

La rimozione e il recupero del fosforo dagli WWTP rappresentano un'area di ricerca molto attiva, con l'obiettivo di sviluppare tecnologie sempre più efficienti ed economicamente sostenibili. Numerosi studi si sono concentrati sullo sviluppo di nuovi processi biologici e chimici per migliorare l'efficienza di rimozione del fosforo dalle acque reflue e dai fanghi di depurazione. Inoltre, sono state proposte diverse strategie per il recupero del fosforo sotto forma di prodotti a valore aggiunto, come fertilizzanti (Di Capua et al., 2022). Alla luce di queste considerazioni, la rimozione e il recupero del fosforo dagli WWTP rappresentano

una sfida cruciale per garantire la sostenibilità a lungo termine dei sistemi agricoli e acquatici.

Pertanto, la ricerca futura dovrà concentrarsi sullo sviluppo di nuove tecnologie per recuperare il fosforo in modo più efficiente ed economico. Questo permetterà di riutilizzare il fosforo in modo più efficiente ed economico. Inoltre, è importante creare delle regole comuni per i prodotti a base di fosforo riciclato e trovare nuovi modi per far funzionare bene questo mercato. Il recupero del fosforo rappresenta una sfida complessa, ma necessaria per garantire la sostenibilità a lungo termine dei sistemi agricoli e acquatici (Cheng et al., 2023).

5. CONCLUSIONI

Lo studio ha quantificato l'impronta di fosforo associata alla produzione di quattro prodotti del settore alimentare (A, B, C e D), evidenziando l'impatto del rilascio di questo elemento nell'ambiente. Adottando un approccio LCA e utilizzando la metodologia proposta da Zuliani et al., 2023 per il calcolo dell'impronta di azoto, è stata stimata l'impronta di fosforo lungo l'intero ciclo di vita dei prodotti analizzati. I risultati ottenuti hanno mostrato che una parte considerevole del fosforo introdotto nei sistemi di produzione viene rilasciato nell'ambiente, contribuendo all'eutrofizzazione degli ecosistemi acquatici e all'esaurimento di questa risorsa "scarsa". Essendo il fosforo una risorsa limitata e non rinnovabile, l'analisi ha considerato gli impatti legati al suo potenziale consumo, considerando il confronto tra input (materia prima) e output (flussi in uscita di fosforo). In particolare, l'analisi comparativa tra questi flussi di input e output ha evidenziato discrepanze per il prodotto C, suggerendo la necessità di ulteriori approfondimenti.

Quindi, lo studio condotto ha evidenziato l'importanza cruciale della quantificazione dell'impronta di fosforo nella produzione alimentare. I risultati ottenuti sottolineano la necessità di una gestione più sostenibile di questa risorsa finita e non rinnovabile. Il fosforo, elemento essenziale per la vita, è spesso sottovalutato rispetto ad altri elementi come, ad esempio, il carbonio; tuttavia, il suo ruolo fondamentale nei cicli biogeochimici e la sua crescente scarsità rendono indispensabile approfondire le conoscenze sulla dinamica negli ecosistemi.

I risultati di questa ricerca rappresentano un primo passo verso una valutazione più completa dell'impatto ambientale legato all'utilizzo del fosforo nell'agricoltura. Ulteriori studi sono necessari per sviluppare strategie efficaci per ridurre le perdite di fosforo nell'ambiente e promuovere pratiche agricole sostenibili.

In conclusione, la quantificazione dell'impronta di fosforo è uno strumento fondamentale per informare le politiche ambientali e guidare l'innovazione tecnologica verso sistemi alimentari più sostenibili e resilienti.

BIBLIOGRAFIA

Arjen Y. Hoekstra, Thomaso o. Wiedmann « Humanity's unsustainable environmental footprint.» *Science,* 2014

Claude E. Boyd, Ph.D. «Water composition: Dissolved inorganic. » 2015

Dana Cordell, Jan-Olof Drangert, Stuart White «The story of phosphorus: Global food security and food for thought » *Global Environmental Change, 2009 ("Peak Phosphor – Wikipedia")*

Föllmi, K. B. (1995). «The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits. » *Earth-Science Reviews 40 55-124 ("The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits ...")*

Francesco Di Capua, Simona de Sario, Alberto Ferraro, Andrea Petrella, Marco Race, Francesco Pirozzi, Umberto Fratino, Danilo Spasiano «Phosphorus removal and recovery from urban wastewater: Current practices and new directions » *Science of the total environment*, 2022

https://lcanz.org.nz/lca-guidance/lca-intro/ (Life Cycle Association of New Zeland)

https://play.google.com/books/reader?id=7zKNp57JLz8C&pg=GBS.PA89&hl=it (1)

J.N.A. Lott, M.Borjarski, J. Kolasa, G.D. Batten, L.C. Cambell «A review of phosphorus content of dry cereal and legume crops of the world » *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology,* 2009

James J Elser «Phosphorus: a limiting nutrient for humanity? » *ScienceDirect*

Jan Matustik, Vladimir Koci. «What is a footprint? A conceptual analysis of environmental footprint indicators.» *ScienceDirect*

K.Ashley, D.Cordell, D: Mavinic. «Abrief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse.» ("A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient ...") *ScienceDirect*

Katherine Richardson, Will Steffen, Wolfgang Lucht, Jorgen Bendtsen, Sarah E. Cornell, Jonathan F. Donges, Markus Druke, Ingo Fetzer, Govindasamy Bala, Warner Von Bloh, Georg Feulner, Stephanie Fiedler, Dieter Gerten, Tom Gleeson, Matthias Hofmann, Willmen Hiuskamp, Matti Kummu, Chinchu Mohan, David Nougues-bBravo, Stefan Petri, Mina Porkka, Stefan Rahmstorf, Sibyll Shaphoff, Kirsten Thonicke, Arne Tobian, Vili Virkki, Lan Wang-Erlandsson, Lisa Weber, Johan Rockstrom. «Earth beyond six of nine planetary bounadaries.» *ScienceAdvances,* 2023

Linxiu Wu, Kai Huang, Bradley G. Ridoutt, Yajuan Yu, Ying Chen. «A planetary boundaries-based environmental footprint family: From impacts to boundaries » *Science of The Total Environment*

Metson Geneviève S, Bennett Elena M., Elser James J. «The role of diet in phosphorus demand.» Enviromental Research , 2012.

Metson Geneviève S, MacDonald Graham K., Leach Allison M., Compton Jana E., Harrison John A., Galloway James N. «The U.S. consumer phosphorus footprint: where do nitrogen and phosphorus diverge?» Enviromental Research, 2020.

Ming Cheng, Chen Shi, Liting Hao, Xiangyang Wang, Xiaoyuan; Rabin Liu, Xiaodi Hao «Sustainable development of phosphorus recovery: From a product perspective». *Sustainable Production and Consumption*, 2023

Nemecek, T., Bengoa, X., Lansche, J., Roesch, A., Faist-Emmenegger, M., Rossi, V., ... & Riedener, E. (2019). "World Food LCA Database. Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products, 3"

Nemery Julien. «Phosphorus and Eutrophication». *Encyclopedia of the Environment, 2019* CICLO DEL FOSFORO

Papangelou Anastasia, Towa Edgar,Achten Wouter M J.,Mathijs Erik. «A resource-based phosphorus footprint for urban diets.» Enviromental Research, 2021.

Patterson Murray, Garry McDonald, Hardy Derrylea. «Is there more in common than we think? Convergence of ecological footprinting, emergy analysis, life cycle assessment and other methods of environmental accounting.» *Ecologiacal Modelling,* 2017.

Prè Sustainbility, 2022. SimaPro

Renée Cho «Phosphorus: Essential to Life – are we running out?» *State of planet, Columbia Climate School, 2013*

Prisco Ilaria «Metodologia innovative per il calcolo di Phosphorus Footprint con approccio LCA: analisi critica e applicazione*» University of Padua,*2023

Richardson, Steffen and Rockström. «Planetary bounderies*». Stockolm Resilience Centre, 2023*

Sara Toniolo, Lorenzo Borsoi, Daniele Camana «Life cycle assessment: methods, limitations, and illustrations » *Methods in Sustainability Science*

Steen I. «Phosphorus availability in the 21st Century: management of a non-renewable resource.» ("Realising the circular phosphorus economy delivers for sustainable ...") *Global Environmental Change*

U. Joshua, F. Victor Bekun «The path to achieving environmental sustainability in South Africa: the role of coal consumption, economic expansion, pollutant emission and total natural resources rent»

Van Paassen, M., Braconi, N., Kuling, L., Durlinger, B., & Gual, P. (2019). "Agri-footprint 5.0". Blonk Consultants: Gouda, The Netherlands, 134.

W.E. Rees « Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out » *Environment and Urbanization,*1992

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology". The International Journal of Life Cycle Assessment, 21, 1218-1230.
Yi Liu, Gara Villalba, Robert U. Ayres, and Hans Schroder. «Global Phosphorus Flows and Environmental Impacts from a Consumption Perspective.» ("Global Phosphorus Flows and Environmental Impacts from a Consumption Perspective") *Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University*

Yuan, Z., Jiang, S., Sheng, H., Liu, X., Hua, H., Liu, X., & Zhang, Y. « Human Perturbation of the Global Phosphorus Cycle: Changes and Consequences.» *Environmental Science and Technology,* 2018

Zengwei Yuan, Songyan Jiang, Hu Sheng, Xin Liu, Hui Hua, Xuewei Liu, You Zhang «Human Perturbation of the Global Phosphorus Cycle: Changes and Consequences» *Environmental Science & Technology*

Zhang, J.; Beusen, A. H. W.; Van Apeldoorn, D. F.; Mogollón, J. M.; Yu, C. «Spatiotemporal dynamics of soil phosphorus and crop uptake in global cropland during the 20th century.» *Biogeosciences*

Zuliani F., Manzardo A., Marson A., Fedele A. (2023). "A life cycle assessment approach for nitrogen footprint quantification: the reactive nitrogen indicator". SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT vol.882. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163578.

Zuliani, F. Manzardo, A. Marson, A., Fedele, A. «Nitrogen footprint calculation for product systems: an application in the food sector.» *XXXII Congresso Nazionale di Scienze Merceologiche settembre 2024*

SITOGRAFIA

https://nutrizionenaturale.jimdoweb.com/alimentazione/composizione-chimica-del-latte/ (2)

https://lcanz.org.nz/lca-guidance/lca-intro/ (Life Cycle Association of New Zeland)

https://play.google.com/books/reader?id=7zKNp57JLz8C&pg=GBS.PA89&hl=it (1)