



Istituto Superiore di Sanità

Regione del Veneto

Direzione Prevenzione, Sicurezza
Alimentare, Veterinaria
Via Dorsoduro 3493
Venezia

ACCORDO DI COLLABORAZIONE ex art. 15 L. 241/90

**Rischio per la salute umana associato alla presenza di sostanze
perfluoroalchiliche nelle filiere agroalimentari: supporto ad azioni di
sorveglianza e di monitoraggio, valutazione dell'esposizione e
caratterizzazione, gestione e comunicazione del rischio**

(Fasc. ISS: CB29)

CUP: I83C22001360005

**Relazione ad interim contenente un primo esame delle evidenze relative alla
contaminazione da PFAS delle filiere zootecniche**

Responsabile scientifico ISS: Dr. Francesco Cubadda

INDICE

1. Introduzione	2
2. Metodologia	5
2.1. Disegno di studio	5
2.2. Monitoraggio del piano	6
2.3. Misurandi e metodi analitici.....	7
2.4. Elaborazione e valutazione dei dati.....	8
2.5. Confronto con i dati di letteratura	9
3. Risultati	10
3.1. Acqua di abbeveraggio	10
3.2. Alimenti	13
3.2.1. <i>Prodotti carnei</i>	13
3.2.2. <i>Uova</i>	18
3.2.3. <i>Latte</i>	18
3.3. Caso di azienda sottoposta a follow-up	25
4. Discussione	28
5. Conclusioni	34
6. Team di lavoro e ringraziamenti.....	36
7. Riferimenti bibliografici	38
Allegato A: Piano di sorveglianza di PFAS nei prodotti agroalimentari delle zone rossa e arancione: alimenti di origine animale - Disegno dello studio e piano di campionamento.....	45
Allegato B: Determinazione degli analiti nelle acque di abbeveraggio e negli alimenti	56
Allegato C: Confronto con i dati di letteratura	58

1. Introduzione

Nell'estate del 2013 è emersa, nel territorio di alcuni Comuni della provincia di Vicenza e delle province limitrofe, una diffusa contaminazione da sostanze perfluoroalchiliche (PFAS) delle acque sotterranee, superficiali e potabili la cui origine è stata ricondotta allo stabilimento della società Miteni a Trissino, dove si producevano PFAS fin dalla fine degli anni Sessanta. I PFAS sono contaminanti persistenti ai quali la popolazione generale è esposta in massima parte per via alimentare, attraverso il consumo di alimenti e acqua. La persistenza e l'assenza di metabolismo di queste molecole porta, a seguito di esposizione prolungata, ad un loro bioaccumulo nell'organismo che è associato a rischi per la salute (EFSA CONTAM Panel, 2020).

A seguito di un monitoraggio preliminare disposto dalla Regione del Veneto i cui risultati avevano evidenziato la necessità di approfondimenti, nel 2016-2017 il Dipartimento di Sicurezza Alimentare, Nutrizione e Sanità Pubblica Veterinaria dell'Istituto Superiore di Sanità (ISS), l'Istituto Zooprofilattico Sperimentale delle Venezie (IZSVE) e l'Agenzia Regionale per l'Ambiente del Veneto (ARPA Veneto) hanno svolto, su richiesta della Regione del Veneto, uno studio di monitoraggio degli alimenti prodotti nella zona a maggiore impatto ('area rossa', comprendente 23 comuni) nei territori delle province di Vicenza, Padova e Verona. Lo studio di monitoraggio ha previsto la ricerca di dodici PFAS in oltre 1200 campioni di alimenti, di cui circa la metà di origine animale, con una soglia di rilevabilità analitica pari a 0,1 ng/g (migliorativa rispetto al primo monitoraggio). Tale studio ha offerto una prima caratterizzazione del livello di contaminazione da PFAS delle principali produzioni agro-zootecniche dell'area rossa, evidenziando livelli di presenza superiori a quelli di rilevabilità analitica in alcune matrici alimentari, in particolare, per PFOA e PFOS, in matrici di origine animale (uova, muscolo suino, fegato suino, bovino e avicolo). Questi primi risultati hanno indicato la necessità di una specifica attenzione verso la potenziale esposizione ai PFAS attraverso le filiere zootecniche.

Sulla base dei dati ottenuti nello studio di monitoraggio, l'ISS ha eseguito uno studio per la valutazione dell'esposizione della popolazione locale a PFOA e PFOS mediante la dieta e per la caratterizzazione del rischio associato (Istituto Superiore di Sanità, 2019). Attraverso la stima di diversi scenari espositivi, lo studio ha confermato il consumo di acqua quale principale veicolo dell'esposizione della popolazione e l'abbattimento di quest'ultima a seguito dell'installazione dei filtri a carbone attivo per il trattamento delle acque distribuite dalla rete idrica. Lo studio ha parimenti mostrato il permanere di un'esposizione elevata negli abitanti della zona rossa che consumano acqua di pozzo non filtrata e alimenti di origine animale prodotti localmente in carenza di applicazione delle migliori pratiche zootecniche. Tali risultati, inclusa la specifica maggiore esposizione degli agricoltori dediti ad autoconsumo e utilizzo di acqua da impianti autonomi, sono confermati dagli studi di biomonitoraggio umano (Ingelido et al., 2018; Ingelido et al., 2020).

Sulla base delle risultanze dello studio di valutazione dell'esposizione a PFOA e PFOS, la Regione del Veneto ha adottato con la Deliberazione della Giunta Regionale (DGR) n. 1494 del 15 ottobre 2019 l'istituzione di un "Piano di sorveglianza dei PFAS nei prodotti agroalimentari delle zone rossa e arancione". Questo piano, insieme al complementare "Piano di monitoraggio regionale dei PFAS negli alimenti e nei materiali a contatto presenti sul mercato", intende fornire dati sui livelli

di presenza di quattordici PFAS, ovvero le dodici molecole (PFOA, PFOS e altri dieci PFAS)¹ già indagate nel precedente studio di monitoraggio degli alimenti prodotti nella zona a maggiore impatto ('area rossa'), integrate da altre due molecole di interesse – vale a dire GenX e cC6O4² – rispettivamente nei:

- (i) prodotti alimentari vegetali e animali provenienti dall'area soggetta alla contaminazione da PFAS, non più limitatamente alla sola zona rossa ("Piano di sorveglianza")
- (ii) prodotti alimentari e materiali a contatto con gli alimenti presenti sul mercato regionale, in particolare nel circuito della grande distribuzione ("Piano di monitoraggio regionale").

La disponibilità di questi dati consentirà di condurre una valutazione dell'esposizione aggiornata e più accurata di quella del 2019 (Istituto Superiore di Sanità, 2019), anche in ragione della maggiore sensibilità dei metodi analitici impiegati (ovvero, degli inferiori limiti di rilevabilità analitica).

In particolare, il "Piano di monitoraggio regionale" è indirizzato a fornire evidenze utili per la valutazione dell'esposizione di fondo della popolazione generale, mediante il campionamento e l'analisi di alimenti rinvenibili sul mercato che contribuiscono alla dieta della popolazione del Nord-Est per le diverse fasce d'età. Il "Piano di sorveglianza" (di seguito, 'piano') invece mira ad acquisire dati sui tenori dei quattordici PFAS in alimenti di origine animale e vegetale prodotti in territori delle province di Vicenza, Verona e Padova soggetti alla contaminazione da PFAS. Il primo obiettivo del piano è quello di ottenere un quadro aggiornato ed esauriente dell'impatto della contaminazione sulle produzioni agro-zootecniche, acquisendo dati sui livelli di PFAS nelle matrici agroalimentari in relazione alle pratiche produttive applicate. Queste evidenze sono esaminate per identificare le dinamiche di deposizione (e, laddove presente, di bioaccumulo) nelle diverse matrici animali e vegetali e, tramite analisi delle pratiche produttive, individuare (laddove possibile) pratiche efficaci per ridurre l'introduzione di PFAS nella catena alimentare. Il secondo obiettivo è utilizzare i dati di concentrazione misurati nei diversi alimenti prodotti localmente per disegnare degli scenari di esposizione legati al consumo di tali prodotti e valutare tali scenari in relazione all'esposizione di fondo della popolazione generale del Nord-Est per caratterizzare il rischio associato.

In questo contesto, l'Accordo di Collaborazione tra la Regione del Veneto e l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) assegna all'ISS il disegno dei piani suddetti e l'analisi dei loro risultati, in particolare, da un lato, per valutare l'esposizione e caratterizzare il rischio alla luce del TWI di gruppo per

¹ Le dodici molecole sono gli acidi perfluoroalchilici da 4 a 12 atomi di carbonio (acido perfluorobutanoico, PFBA; acido perfluoropentanoico PFPeA; acido perfluoroesanoico, PFHxA; acido perfluoroeptanoico, PFHpA; acido perfluorottanoico, PFOA; acido perfluorononanoico, PFNA; acido perfluorodecanoico, PFDA; acido perfluoroundecanoico, PFUnDA; acido perfluorododecanoico, PFDoDA) e tre acidi perfluoroalchilsolfonici a 4, 6 e 8 atomi di carbonio (acido perfluorobutansolfonico, PFBS; acido perfluoroesansolfonico, PFHxS; acido perfluorooctansolfonico, PFOS).

² Acido 2,3,3,3-tetrafluor-2-(eptaffluorpropossi)-propanoico (GenX) e ammonio ((2,2,4,5-tetrafluoro-5-(trifluorometossi)-1,3-dirossolan-4-il)ossi) difluoro acetato (cC6O4).

PFOA, PFOS, PFNA e PFHxS³ identificato dall'Autorità Europea per la Sicurezza Alimentare (*European Food Safety Authority, EFSA*) nel 2020 (EFSA CONTAM Panel, 2020) e dall'altro, per acquisire elementi di conoscenza sui fattori che presiedono al trasferimento di queste quattro molecole e degli altri PFAS indagati lungo le filiere agro-zootecniche. L'ISS inoltre è incaricato di fornire supporto tecnico-scientifico per l'individuazione delle eventuali misure di gestione del rischio che dovessero rendersi necessarie sulla base dei risultati ottenuti, nonché per la comunicazione del rischio alla popolazione e ai portatori di interessi.

La citata DGR 1494/2019 definisce anche i ruoli dell'Istituto Zooprofilattico Sperimentale delle Venezie (IZSVe) e dell'Agenzia regionale per la protezione ambientale Veneto (ARPAV) nella realizzazione dei piani, vale a dire:

- l'IZSVe riesamina in termini geografici i risultati dei campionamenti precedenti e inserisce nel sistema informativo territoriale (GIS) le aziende che insistono sulle diverse aree: per quanto riguarda il piano di campionamento sugli alimenti di origine animale le indicazioni relative a tipologia ed indirizzo produttivo sono derivate dalla Banca Dati Nazionale dell'Anagrafe Zootecnica; inoltre è il laboratorio ufficiale per condurre le analisi sui campioni di alimenti e mangimi e foraggi prelevati per entrambi i piani;
- ARPAV è il laboratorio ufficiale per condurre le analisi sui campioni di acqua (per tutti gli usi) e sui MOCA (materiali ed oggetti a contatto con alimenti).

Nell'ambito del “Piano di sorveglianza”, in questa prima fase di attuazione dell'Accordo di Collaborazione, sono stati elaborati dall'ISS, in consultazione con l'IZSVe e la Regione del Veneto, i disegni di due studi, rispettivamente rivolti a (i) gli alimenti di origine animale e (ii) gli alimenti di origine vegetale, volti a descrivere nello specifico le metodiche di campionamento, le numerosità sito-specifiche e le tipologie di matrici da considerare, nonché il flusso dati lungo la filiera: laboratori di analisi → Regione (Direzione Prevenzione, Sicurezza Alimentare, Veterinaria) → ISS. I due piani sono stati pubblicati e resi operativi con le DGR 706/2022 e DGR 1676/2023 adottate dalla Regione del Veneto. Queste delibere includono anche i verbali di prelievo che accompagnano i campioni.

La presente relazione attiene ai risultati del piano di sorveglianza sugli alimenti di origine animale. L'obiettivo è fornire un'analisi delle evidenze relative alla contaminazione da PFAS delle filiere zootecniche ed esaminare le dinamiche di deposizione molecola-specifiche nelle diverse matrici oggetto di indagine. La relazione non ha per oggetto la valutazione dell'esposizione umana in quanto i dati necessari saranno disponibili solo dopo il completamento sia del “Piano di sorveglianza” sia del “Piano di monitoraggio regionale”.

³ Il TWI è pari a 4,4 ng/kg p.c. per settimana per la somma di quattro molecole: PFOA, PFOS, PFNA e PFHxS.

2. Metodologia

2.1. Disegno di studio

In base ai *termini di riferimento*, vale a dire al mandato che l'ISS ha ricevuto dalla Regione del Veneto, i piani sono stati disegnati prioritariamente per valutare la produzione agro-zootecnica destinata al consumo generale e quindi finalizzata all'immissione sul mercato, escludendo le aziende le cui produzioni o allevamenti sono destinate all'esclusivo autoconsumo.

Le otto matrici animali incluse nel piano in virtù (i) della loro produzione sul territorio, (ii) del potenziale di bioaccumulo di PFAS e (iii) dei livelli di consumo sono, come dettagliato nell'Allegato A:

- carne (muscolo e fegato) di:
 - bovini
 - suini
 - pollame
- uova
- latte di vacca.

Il piano di campionamento è stato strutturato sulla base dei dati preesistenti sui livelli di PFAS negli alimenti prodotti localmente e la loro distribuzione geografica. L'elaborazione di tali dati ha portato all'identificazione di tre zone clusterizzate (Allegato A, Figura 1). Nella *zona ad "alta intensità"* (maggiore densità di aziende vicine tra loro con alti valori di PFAS, ubicate nell'*Area rossa A*), ricadente nella provincia di Vicenza e, in piccola parte, in quella di Verona, è stato pianificato il campionamento della totalità delle aziende presenti sul territorio che producono le otto matrici alimentari oggetto di studio. Nella *zona a "media intensità"* (estesa più a nord per tener conto dell'inquinamento della falda e contenente l'*Area Arancione*) è stato pianificato il campionamento del 50% delle aziende con produzioni pertinenti (cioè comprendenti le otto matrici). Nella *zona a "bassa intensità"* (collocata nel territorio dell'*Area rossa A* e dell'*Area rossa B*) è stato pianificato il campionamento del 10% delle aziende con produzioni pertinenti. Queste percentuali non si applicano alle produzioni di uova e di latte, in quanto in tutte le tre zone è stato previsto il campionamento della totalità di aziende presenti di galline ovaiole e di bovini ad orientamento produttivo misto.

La numerosità dei campioni di carne da prelevare in ciascuna unità campionaria selezionata è stata fissata in funzione della dimensione dell'allevamento ($N=3$ per allevamenti piccoli, $N=5$ per allevamenti medi, $N=7$ per allevamenti grandi)⁴ (Allegato A). I campioni individuali prelevati in ciascuna azienda sono definiti '*campioni elementari*'. Al fine di rendere sostenibile il carico analitico per i laboratori, i campioni elementari della stessa tipologia da ogni singolo insediamento produttivo sono stati combinati in un unico campione pool ('*campione analitico*'). È stata tuttavia prevista cautelativamente l'analisi dei singoli campioni elementari nei casi in cui il pool evidenziava valori di PFAS normati prossimi al tenore massimo, nonché la conservazione di tutti i campioni elementari per approfondimenti, in caso questi si rendano opportuni.

⁴ Per latte e uova gli specifici criteri di campionamento sono riportati nell'Allegato A.

Maggiori dettagli sul piano di campionamento sono riportati nell'Allegato A, al quale si rimanda per approfondimenti.

Il prelievo simultaneo di campioni di acqua di abbeveraggio nelle aziende oggetto della sorveglianza permette di appaiare le concentrazioni dei livelli di PFAS rilevate negli alimenti a quelle rilevate nell'acqua di approvvigionamento, la cui origine deve essere documentata nei verbali di prelievo (es. acqua sotterranea da pozzi, acqua da acquedotto, raccolta di acque meteoriche o di sorgente al pascolo).

Inoltre, all'atto del campionamento è stata prevista la raccolta di numerosi dati sulle pratiche agricole e zootecniche (di seguito 'metadati') finalizzata a favorire l'interpretazione dei dati ottenuti sui livelli di presenza di PFAS e consentire la valutazione di eventuali fattori che possono incidere su tali livelli, anche non direttamente connessi all'acqua impiegata nei processi produttivi.

La raccolta dei dati relativi ai siti di campionamento, con le specifiche dell'azienda selezionata e le matrici campionate, corredati da tutti i metadati necessari, è stata organizzata mediante verbali di accompagnamento che seguono il campione. Questo, dopo il prelievo, è stato trasferito dal personale AULSS deputato al campionamento all'IZSve o all'ARPAV per le determinazioni analitiche (su alimenti ed acque, rispettivamente). I risultati dei rapporti di prova sono stati quindi inseriti in un database gestito dalla Regione del Veneto. Copia dei rapporti di prova delle matrici analizzate sono state inviate periodicamente (circa ogni tre mesi) dall'IZSve all'ISS. Il database di raccolta dati, in capo alla Regione del Veneto, è stato gestito in continuo coordinamento con l'ISS, con confronti mensili finalizzati al controllo e pulizia dei dati e ad attività di data mining (v. *'Monitoraggio del piano'*).

2.2. Monitoraggio del piano

L'ISS ha fornito supporto, su richiesta della Regione del Veneto, su ogni aspetto inerente all'applicazione del piano nonché nella gestione di qualsivoglia problematica operativa riscontrata dalle AULSS durante i campionamenti.

Inoltre, come già menzionato, l'ISS ha preso visione periodicamente dei dati parziali ed in accordo con la Regione del Veneto ha raffinato i criteri per la validazione del database in modo da favorire la costituzione di un database finale idoneo alle successive elaborazioni.

Il monitoraggio continuo dei dati puntuali che hanno popolato il database è stato finalizzato a:

- 1) valutare la congruità (o meno) dei metadati inseriti e verificare eventuali deviazioni, anche mediante consultazione delle fonti ufficiali (BDN)⁵;
- 2) colmare l'assenza di eventuali valori mancanti, dovuti ad errori sistematici del compilatore;
- 3) monitorare le attività di campionamento in modo che si attenessero al piano prestabilito, come pubblicato nella DGR, valutando anche eventuali criticità sito-specifiche e cercando soluzioni;
- 4) monitorare eventuali valori analitici che suggerivano approfondimenti.

⁵ Banca Dati Nazionale dell'Anagrafe Zootecnica.

Le criticità menzionate al punto 3 sono già prefigurate nel piano di campionamento, ove è prevista la sostituzione della matrice e/o azienda in caso di assenza di una delle due (cambio produzione o chiusura azienda). Infatti, i dati su cui sono stati fissati i criteri di selezione degli insediamenti produttivi possono non riflettere integralmente e in tempo reale l'effettiva situazione riscontrata dai campionatori sul campo. Poiché la corrispondenza di tali dati con la realtà produttiva corrente è stata di difficile valutazione al momento della stesura del piano di campionamento, è stata prevista una lista di aziende di riserva da campionare. Le liste di aziende da campionare e di "aziende di riserva" sono state costituite dall'IZSVE mediante mappatura delle realtà sul territorio ricadenti nelle aree oggetto di sorveglianza, secondo criteri fissati in accordo con l'ISS (Allegato A).

2.3. Misurandi e metodi analitici

I quattordici PFAS oggetto di studio sono elencati in Tabella 1. Per PFOA e PFOS il misurando è dato dalla somma degli isomeri lineari e ramificati.

Tabella 1 – PFAS oggetto di studio.

Sostanze perfluoroalchiliche	Acronimo	Catena ^a	N atomi carbonio	Formula molecolare	Numero CAS
Acidi perfluoroalchilici carbossilici (PFCA)					
1 Acido perfluorobutanoico	PFBA	C	4	C ₄ HF ₇ O ₂	375-22-4
2 Acido perfluoropentanoico	PFPeA	C	5	C ₅ HF ₉ O ₂	2706-90-3
3 Acido perfluoroesanoico	PFHxA	C	6	C ₆ HF ₁₁ O ₂	307-24-4
4 Acido perfluoroeptanoico	PFHpA	L	7	C ₇ HF ₁₃ O ₂	375-85-9
5 Acido perfluoroottanoico	PFOA	L	8	C ₈ HF ₁₅ O ₂	335-67-1
6 Acido perfluorononanoico	PFNA	L	9	C ₉ HF ₁₇ O ₂	375-95-1
7 Acido perfluorodecanoico	PFDeA	L	10	C ₁₀ HF ₁₉ O ₂	335-76-2
8 Acido perfluoroundecanoico	PFUnA	L	11	C ₁₁ HF ₂₁ O ₂	2058-94-8
9 Acido perfluorododecanoico	PFDoA	L	12	C ₁₂ HF ₂₃ O ₂	307-55-1
Acidi perfluorosolfonici (PFSA)					
10 Acido perfluorobutansolfonico	PFBS	C	4	C ₄ HF ₉ O ₃ S	375-73-5
11 Acido perfluoroesansolfonico	PFHxS	L	6	C ₆ HF ₁₃ O ₃ S	355-46-4
12 Acido perfluoroottansolfonico	PFOS	L	8	C ₈ HF ₁₇ O ₃ S	1763-23-1
Composti a base di per- e polifluoro alchil eteri (PFPE)					
13 Acido 2,3,3,3-tetrafluoro-2-(eptafuoroprossi)-propanoico	GenX ^b	L	6	C ₆ HF ₁₁ O ₃	13252-13-6
14 Ammonio ((2,2,4,5-tetrafluoro-5-(trifluorometossi)-1,3-diossolan-4-il)ossi) difluoro acetato	cC6O4	L	6	C ₆ H ₄ F ₉ NO ₆	1190931-27-1

^a C: corta; L: lunga. ^b Forma acida. Nelle determinazioni analitiche è stato impiegato il propanoato di ammonio.

La determinazione analitica è stata svolta presso i laboratori di ARPAV (acque di abbeveraggio) e dell'IZSVE (alimenti) mediante LC-MS/MS. Per le acque di abbeveraggio è stato impiegato un

metodo per iniezione diretta (Rapporti ISTISAN 2019/7, pag. 151, ISS.CBA.052) previa aggiunta di standard interni marcati. Le analisi sono state svolte con un HPLC Shimadzu LD-40 X e uno spettrometro Triplo Quadrupolo Sciex 7500. La ionizzazione del campione è stata ottenuta per elettrospray negativa, ESI(-), e la rivelazione svolta in modalità Multiple Reaction Monitoring (MRM). Il limite di quantificazione (LoQ) è risultato pari a 2-5 ng/L per tutti gli analiti salvo C6O4, per il quale il LoQ è stato di 10-40 ng/L.

Negli alimenti (latte, muscolo, tessuto epatico e uova) è stato impiegato un metodo accreditato che prevede, dopo aggiunta di standard interni marcati, un'estrazione mediante Quechers e una purificazione mediante dispersive SPE. L'estratto purificato è stato analizzato mediante un HPLC Sciex Exion abbinato a uno spettrometro Triplo Quadrupolo Sciex 6500. La ionizzazione del campione è stata per ESI (-) e la rivelazione in modalità MRM. Il LoQ è risultato pari a 0,05 ng/g per tutti gli analiti salvo GenX e C6O4, per i quali il LoQ è stato di 0,10 ng/g. Per la determinazione di PFOA, PFNA, PFHxS e PFOS nella matrice latte è stata effettuata una seconda analisi dell'estratto utilizzando uno spettrometro MS/MS Sciex 7500 quale rivelatore di massa, nella quale è stato raggiunto un LoQ pari a 0,01 ng/g.

Per maggiori dettagli sui metodi analitici impiegati si veda l'Allegato B.

2.4. Elaborazione e valutazione dei dati

Nella presente relazione i dati sono espressi come valori medi delle concentrazioni rilevate per ciascuna delle 14 molecole PFAS oggetto di indagine. Le concentrazioni nell'acqua di abbeverata sono espresse in ng/L mentre nelle matrici alimentari sono espresse in ng/g ($\mu\text{g/kg}$). Poiché per tutte le molecole e tutti i raggruppamenti di dati (per matrice e/o zona di intensità) sono stati ottenuti valori *left-censored*, vale a dire una frazione delle concentrazioni misurate sono risultate inferiori al limite di quantificazione analitico (LoQ), in conformità alle metodologie correnti in valutazione del rischio (EFSA, 2010) si è proceduto a calcolare tre tipi di medie. La prima è la media in *Lower Bound* (LB) dove i valori inferiori al LoQ sono stati considerati uguali a 0, la seconda è la media in *Medium Bound* (MB) dove i valori inferiori al LoQ sono stati considerati pari a $\text{LoQ}/2$, la terza è la media in *Upper Bound* (UB) dove i valori inferiori al LoQ sono stati considerati pari al LoQ.

Questa metodologia di presentazione dei dati rende immediatamente chiaro il grado di incertezza associato alla tendenza centrale dei dati a causa della presenza di dati *left-censored*. Se i dati inferiori al LoQ sono numerosi, le stime in LB, MB, e UB divergono (maggiore è la frazione di dati *left-censored*, più la stima in LB tende a 0 e la stima in UB tende al LoQ). Se i dati inferiori al LoQ non sono numerosi, le tre stime tendono a convergere e in questo caso la media in MB è una buona indicazione della tendenza centrale dei dati.

Nei dati relativi all'azienda oggetto di follow-up, per ogni molecola con concentrazioni $>\text{LoQ}$, i valori riportati sono medie delle misure sui singoli campioni elementari e le barre di errore rappresentano l'incertezza estesa (U) con fattore di copertura $k=2$ calcolata dall'incertezza combinata per singola data di prelievo e derivata dalle singole incertezze di misura.

Le correlazioni tra concentrazioni di PFAS nell'acqua da abbeveraggio e concentrazioni di PFAS nelle matrici alimentari sono state valutate calcolando il rho di Spearman considerato significativo se $p < 0,05$ (due code).

Dati e grafici sono stati elaborati con Microsoft Excel (Microsoft Office 365) e RStudio v.4.4.3 (<https://www.r-project.org/>).

2.5. Confronto con i dati di letteratura

È stata effettuata una revisione della letteratura per confrontare i risultati ottenuti dal piano di sorveglianza con i dati provenienti da altri studi, in relazione sia alle concentrazioni misurate sia ai fattori che presiedono al trasferimento dei PFAS lungo le filiere zootecniche e alle dinamiche di deposizione molecola-specifiche. La ricerca è stata condotta utilizzando i motori di ricerca Scopus e Web of Science, impiegando le seguenti parole chiave: "*PFAS*", "*perfluorinated compounds*", "*perfluoroalkyl substances*", "*risk assessment*", "*eggs*", "*milk*", "*livestock meat*", "*food*", "*animal*", "*diet*". Sono stati considerati 67 articoli pubblicati tra il 2010 e il 2025. Fra gli studi censiti, 5 sono stati esclusi per la limitata qualità scientifica o per la non sovrapponibilità degli indici statistici o delle matrici analizzate rispetto a quelli del presente studio. Sono inoltre state esaminate le pertinenti revisioni della letteratura (Domingo e Nadal, 2017; Death et al. 2021; Bonato et al., 2025).

La rappresentazione delle concentrazioni di PFAS è stata realizzata per gli studi primari censiti riferiti a zone con valori di fondo. Sono state considerate zone di fondo tutte le aree oggetto di studio prive di fonti dichiarate di rilascio di PFAS o centri fluorochimici nelle vicinanze. I dati sono stati rappresentati mediante grafici raffiguranti i valori medi e i valori massimi misurati; in corrispondenza di ciascuno studio è annotata la numerosità campionaria (*n*). Le concentrazioni medie sono state espresse in LB, MB e UB secondo la metodologia sopra descritta.

I dati rappresentati nei grafici sono integrati da tabelle riassuntive più estese che includono tutti gli studi raccolti, compresi (i) quelli relativi ad aree aventi fonti dichiarate di rilascio di PFAS o centri fluorochimici nelle vicinanze e quelli (ii) non rappresentabili graficamente a causa di informazioni incomplete e/o caratteristiche specifiche della matrice analizzata.

L'analisi descrittiva di confronto con la letteratura è stata svolta per le combinazioni matrice-molecola che hanno mostrato valori quantificati. Tutte le concentrazioni riportate sono espresse in ng/g peso fresco. I dati ricavati dalla letteratura e i grafici sono stati elaborati mediante Microsoft Excel (Microsoft Office 365) e RStudio v.4.4.3.

3. Risultati

Il piano di sorveglianza ha portato alla raccolta di campioni da un totale di 156 aziende nelle tre zone di interesse classificate come ad alta, media e bassa intensità. La ripartizione delle aziende in queste tre aree, secondo la tipologia di campioni raccolti, vale a dire muscolo e fegato di (i) bovini, (ii) suini, (iii) avicoli (broiler, tacchini, faraone), (iv) uova e (v) latte, è riassunta nella **Tabella 2**. Come dettagliato nella sezione Metodologia ('Disegno di studio'), il numero di aziende campionate è funzione del numero di aziende presenti sul territorio con produzioni oggetto di studio (l'assenza di aziende produttrici motiva quindi la mancanza di campioni raccolti nella zona specifica). Complessivamente sono state oggetto di campionamento 38 aziende nella zona ad alta intensità, 57 in quella a media intensità e 61 in quella a bassa intensità.

Tabella 2 – Distribuzione delle aziende campionate per tipologia alimentare nelle tre zone di intensità.

	Bovino (muscolo/fegato)	Suino (muscolo/fegato)	Avicoli (muscolo/fegato)	Uova	Latte
Alta	15	4	8	4	7
Media	20	4	25	2	6
Bassa	25	3	21	12	0

Il numero di campioni elementari prelevati (N) da ciascuna azienda, fissato proporzionalmente alla consistenza dell'azienda stessa come dettagliato nella sezione Metodologia ('Disegno di studio'), è riportato per ciascuna tipologia alimentare nella Tabella 3. Per i bovini il numero dei capi prelevati è stato tracciato da marca auricolare, mentre per suini e avicoli il numero dei campioni elementari non è tracciabile ma stimato in base alla consistenza effettiva rilevata in azienda al momento del prelievo. Nella Tabella 3 è riportato anche il numero dei campioni analitici (n) ottenuti come pool dei campioni elementari per ciascuna specie e area di intensità. In totale il piano di sorveglianza ha portato al prelevamento di 703 campioni elementari, che sono stati combinati in 347 campioni analitici.

3.1. Acqua di abbeveraggio

In Tabella 4 è riportata l'analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei 162 campioni di acqua di abbeveraggio⁶ prelevati nelle aziende delle zone ad alta, media e bassa intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato, con indicazione della frazione percentuale di campioni aventi concentrazione <LoQ. Le concentrazioni dei PFCA a catena più lunga (9-12 atomi di carbonio) non sono generalmente quantificabili: risultano <LoQ il 98% dei campioni di PFNA, il 99% dei campioni di PFDeA e la totalità dei campioni di PFUnA e PFDoA. Risulta <LoQ il 99% dei campioni di cC6O4, la cui determinazione tuttavia è affetta da LoQ più elevati rispetto agli altri PFAS. Appartiene al gruppo dei raramente quantificati anche il GenX, che è risultato >LoQ solo nel 2% dei campioni.

⁶ In poche delle 156 aziende sono stati raccolti due campioni di acqua di abbeveraggio.

Tabella 3 – Campioni elementari (*N*) ed analitici (*n*) campionati ed analizzati per specie/matrice e area di intensità.

Specie/Matrice	Area di intensità	<i>N</i>	<i>n</i>
Bovino (muscolo, fegato)	alta	44	43
	media	110	58
	bassa	110	64
	<i>totale</i>	<i>264</i>	<i>165</i>
Suino (muscolo, fegato)	alta	26*	22
	media	12*	8
	bassa	6*	6
	<i>totale</i>	<i>44</i>	<i>36</i>
Avicoli (broiler, tacchino, faraona/muscolo, fegato)	alta	29*	17
	media	80*	54
	bassa	66*	44
	<i>totale</i>	<i>175</i>	<i>115</i>
Uova	alta	39	4
	media	24	2
	bassa	144	12
	<i>totale</i>	<i>207</i>	<i>18</i>
Latte	alta	7	7
	media	6	6
	bassa	0	0
	<i>totale</i>	<i>13</i>	<i>13</i>

*valore stimato sulla base della consistenza effettiva dell'azienda

Vi è poi un gruppo di PFAS con percentuali di campioni non quantificate fra l'83% e l'89% (sull'insieme delle tre zone di intensità), che include PFHpA, PFOS e PFHxS. Nella zona ad alta intensità questi PFAS sono stati quantificati nel 34-39% dei campioni di acqua di abbeveraggio. Infine, c'è il gruppo del PFOA e dei PFAS a catena corta (PFBA, PFBS, PFPeA, PFPHxA) che risultano <LoQ nel 67%-77% dei campioni e che, nella zona ad alta intensità, sono stati quantificati in circa la metà dei campioni analizzati.

Per questi due gruppi di PFAS, che annoverano 8 composti, fra i quali PFOA, PFOS e PFHxS (tutti ricompresi nel TWI di gruppo stabilito dall'EFSA), la Tabella 5 evidenzia che nella zona ad alta intensità la media in MB è un buon descrittore della tendenza centrale dei dati in quanto le stime in LB, MB e UB sono numericamente molto vicine. Laddove non altrimenti specificato, di seguito si farà pertanto riferimento ai valori MB.

Nella zona ad alta intensità, il PFOA è - come atteso - il composto con le concentrazioni più elevate nell'acqua di abbeveraggio (284 ng/L), seguito da PFBA (84 ng/L), PFBS (51 ng/L), PFPeA (47 ng/L) e PFHxA (42 ng/L) (Tabella 5). Tre composti sono nell'ordine di pochi ng/L: oltre al PFHpA (12 ng/L), il PFOS – presenza rilevante per la tendenza al bioaccumulo nei tessuti animali – (7 ng/L) e il PFHxS (5 ng/L).

Tabella 4 – Analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei 162 campioni di acqua di abbeveraggio (*n*) prelevati nelle aziende delle zone ad alta, media e bassa intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato: frazione dei campioni con concentrazione inferiore al LoQ (*left-censored*).

PFAS	Campioni <LoQ (%)*	LoQ (ng/L)	ZONA DI INTENSITA'			Totale	% campioni <LoQ sul totale per zona di intensità		
			alta (<i>n</i> =41)	media (<i>n</i> =58)	bassa (<i>n</i> =63)				
PFBA	109 (67)	5	19	37	53	109	46	64	84
PFBS	117 (72)	5	14	26	41	81	54	67	89
		2	8	13	15	36			
PFPeA	124 (77)	5	22	44	58	124	54	76	92
PFHxA	118 (73)	5	13	29	42	84	51	71	89
		2	8	12	14	34			
PFHxS	144 (89)	5	16	38	45	99	66	93	100
		2	11	16	18	45			
PFHpA	135 (83)	5	16	36	44	96	61	84	97
		2	9	13	17	39			
PFOA	114 (70)	5	15	26	40	81	54	66	86
		2	7	12	14	33			
PFOS	138 (85)	5	16	34	44	94	66	84	98
		2	11	15	18	44			
PFNA	159 (98)	5	20	39	45	104	98	98	98
		2	20	18	17	55			
PFDeA	160 (99)	5	20	38	45	103	100	98	98
		2	21	19	17	57			
PFUnA	162 (100)	5	20	39	45	104	100	100	100
		2	21	19	18	58			
PFDoA	162 (100)	5	20	39	45	104	100	100	100
		2	21	19	18	58			
C6O4**	159 (99)	40	21	35	45	101	100	98	100
		10	20	21	17	58			
GenX	159 (98)	5	33	38	30	101	93	100	98
		2	5	20	32	57			

*Laddove il LoQ è diminuito nel corso dello studio per miglioramenti del metodo analitico compaiono due valori di LoQ. ** Il totale dei campioni analizzati per questa molecola risulta pari a 160.

Per gli otto PFAS quantificati in un buon numero di campioni di acqua di abbeveraggio, è evidente la tendenza crescente delle concentrazioni dalla zona a bassa, a quella a media e infine a quella ad alta intensità (Tabella 5). Esemplificativo il caso del PFOA, con concentrazioni che passano da 8 ng/L, a 117 ng/l e a 284 ng/L, rispettivamente. Le concentrazioni di questi otto PFAS sono 2-3 volte più alte nella zona ad alta intensità rispetto a quella a media intensità, con la sola eccezione del PFOS che presenta concentrazioni analoghe fra le due zone (intorno a 7 ng/L).

Tabella 5 – Concentrazioni (ng/L) in Lower bound (LB), Medium bound (MB) e Upper bound (UB) di PFAS rilevate nei 162 campioni di acqua di abbeveraggio campionati nelle aziende delle zone ad alta, media e bassa intensità.

PFAS	ZONA DI INTENSITA'								
	alta			media			bassa		
	LB	MB	UB	LB	MB	UB	LB	MB	UB
PFBA	82,90	84,06	85,22	30,31	31,91	33,50	6,05	8,15	10,25
PFBS	49,90	50,95	52,00	12,91	14,26	15,60	2,76	4,63	6,49
PFPeA	45,98	47,32	48,66	15,07	16,97	18,86	1,14	3,44	5,75
PFHxA	41,32	42,30	43,29	17,69	19,15	20,60	1,57	3,46	5,35
PFHpA	10,73	11,93	13,12	3,64	5,41	7,19	0,40	2,41	4,43
PFHxS	3,73	4,98	6,22	0,57	2,48	4,40	0,00	2,07	4,14
PFOA	283,22	284,30	285,39	115,67	117,00	118,33	6,51	8,32	10,13
PFOS	6,24	7,49	8,73	4,95	6,67	8,40	0,14	2,17	4,21
PFNA	0,05	1,76	3,46	0,00	2,03	4,05	0,38	2,44	4,49
PFDeA	0,00	1,73	3,46	0,16	2,12	4,09	0,24	2,29	4,35
PFUnA	0,00	1,73	3,46	0,00	2,01	4,02	0,00	2,07	4,14
PFDoA	0,00	1,73	3,46	0,00	2,01	4,02	0,00	2,07	4,14
C6O4	0,00	13,63	27,25	1,02	15,93	30,84	0,00	14,52	29,05
GenX	0,15	2,37	4,59	0,05	2,04	4,03	0,41	2,05	3,68

Le marcate variazioni dei livelli degli otto PFAS critici fra le tre aree sono legate alla frazione di acque di abbeverata che proviene da falde sotterranee emunte tramite impianti autonomi (pozzi), associata a concentrazioni di PFAS più elevate rispetto al caso dell'acqua di acquedotto e crescenti passando dalla zona a bassa, a media e infine ad alta intensità.

3.2. Alimenti

Le Tabelle 6-22 presentano l'analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei campioni dei diversi prodotti alimentari oggetto di studio.

3.2.1. Prodotti carnei

I bovini sono la specie più intensamente allevata e pertanto campionata. Nel muscolo bovino il PFOS è la molecola quantificata nel maggior numero dei campioni (24% dei campioni analitici con concentrazioni >LoQ) (Tabella 6). Segue il PFOA, le cui concentrazioni tuttavia sono >LoQ solo nel 7% dei campioni totali. Le altre 12 molecole non sono quantificabili nella totalità dei campioni.

I livelli medi di PFOS in MB nella zona a media intensità sono di 0,098 ng/g, appena inferiori a quelli della zona ad alta intensità pari a 0,105 ng/g (Tabella 7). Il dato è influenzato dai valori di PFOS elevati registrati in alcune aziende nella prima area (valore massimo 0,690 ng/g vs. valore massimo nelle aziende della zona ad alta intensità pari a 0,370 ng/g). Il caso di una specifica di queste aziende sottoposta a una sorveglianza protratta nel tempo (follow-up) è descritto nel dettaglio più avanti in una sezione dedicata.

Tabella 6 – Analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei campioni analitici (*n*) di **muscolo di bovino** delle aziende nelle tre zone di intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato: frazione dei campioni con concentrazione inferiore al LoQ (*left-censored*).

PFAS	N campioni <LoQ (%)	LoQ (ng/g)	zona di intensità			% campioni <LoQ sul totale di zona di intensità		
			alta (n=22)	media (n=29)	bassa (n=32)			
			N campioni <LoQ					
PFBA	83 (100)	0,05	22	29	32	100	100	100
PFBS	83 (100)	0,05	22	29	32	100	100	100
PFPeA	83 (100)	0,05	22	29	32	100	100	100
PFHxA	83 (100)	0,05	22	29	32	100	100	100
PFHxS	83 (100)	0,05	22	29	32	100	100	100
PFHpA	83 (100)	0,05	22	29	32	100	100	100
PFOA	77 (93)	0,05	19	26	32	86	90	100
PFOS	63 (76)	0,05	10	22	31	45	76	97
PFNA	83 (100)	0,05	22	29	32	100	100	100
PFDeA	83 (100)	0,05	22	29	32	100	100	100
PFUnA	83 (100)	0,05	22	29	32	100	100	100
PFDaA	83 (100)	0,05	22	29	32	100	100	100
C6O4	83 (100)	0,10	22	29	32	100	100	100
GenX	83 (100)	0,10	22	29	32	100	100	100

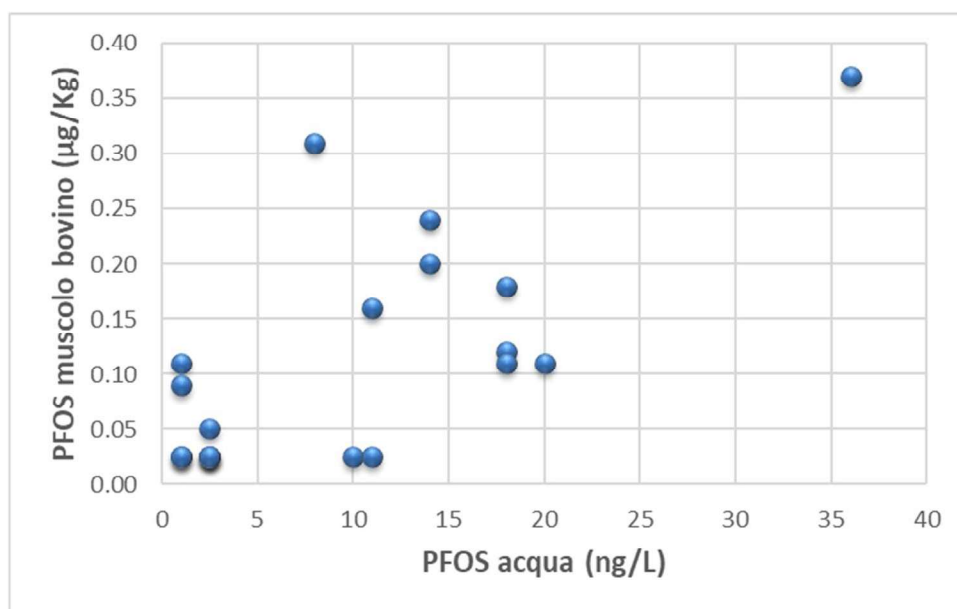
Tabella 7 – Concentrazioni (ng/g) in Lower bound (LB), Medium bound (MB), Upper bound (UB) e valore massimo rilevato (Max) di PFAS nei campioni di muscolo di bovino delle aziende nelle tre zone di intensità.

PFAS	zona alta intensità				zona media intensità				zona bassa intensità			
	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max
PFBA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFBS	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFPeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHpA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxS	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOA	0,009	0,031	0,052	0,080	0,010	0,033	0,055	0,130	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOS	0,093	0,105	0,116	0,370	0,079	0,098	0,117	0,690	0,002	0,026	0,050	0,050
PFNA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFUnA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDaA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
C6O4	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ
GenX	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ

Nella zona ad alta intensità i livelli di PFOS nel muscolo bovino sono correlati positivamente con le concentrazioni del composto nell'acqua di abbeveraggio ($\rho=0,63$, $p<0,001$) evidenziando come la contaminazione dell'acqua sia un driver importante dell'aumento dei livelli tissutali in questa specie (Figura 1).

Il fegato è un organo bersaglio per la deposizione e il bioaccumulo di PFAS e nei bovini la quasi totalità dei campioni di fegato è risultata avere concentrazioni di PFOS quantificabili (Tabella 8). Inoltre, in questa matrice il PFDeA ha mostrato concentrazioni >LoQ nell'87% dei campioni e il PFNA nel 52%. Gli altri composti sono risultati quantificabili in misura molto meno elevata: il PFOA è stato quantificato nel 15% dei campioni, il PFHxS e il PFUnA nel 7% dei campioni e altri 4 composti (PFBA, PFBS, PFDoA, PFHxA) in proporzioni assai limitate (tra il 4% e l'1% dei campioni). La concentrazione massima di PFOS determinata nel fegato bovino è pari a 12,5 ng/g (valore rilevato in uno dei già menzionati casi di aziende con tenori estremi⁷), mentre i valori medi in MB nelle zone ad alta e media intensità sono di 1,59 ng/g e 1,65 ng/g, rispetto al tenore medio di 0,22 ng/g nella zona a bassa intensità (Tabella 9). In media i livelli di PFOS presenti nel fegato sono 16-21 volte superiori a quelli misurati nel muscolo (intervallo di valori per le zone ad alta e media intensità). Anche per il fegato bovino nella zona ad alta intensità esiste correlazione positiva ($\rho=0,68$) statisticamente significativa ($p<0,001$) tra i livelli tissutali di PFOS e le concentrazioni di PFOS nell'acqua di abbeveraggio (Figura 2).

Figura 1 – Diagramma a dispersione sui valori PFOS rilevati in acqua e muscolo di bovino nella zona ad alta intensità.



⁷ Uno di questi casi sottoposto a follow-up è di seguito discusso in dettaglio.

Tabella 8 – Analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei campioni analitici (*n*) di **fegato di bovino** delle aziende nelle tre zone di intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato: frazione dei campioni con concentrazione inferiore al LoQ (*left-censored*).

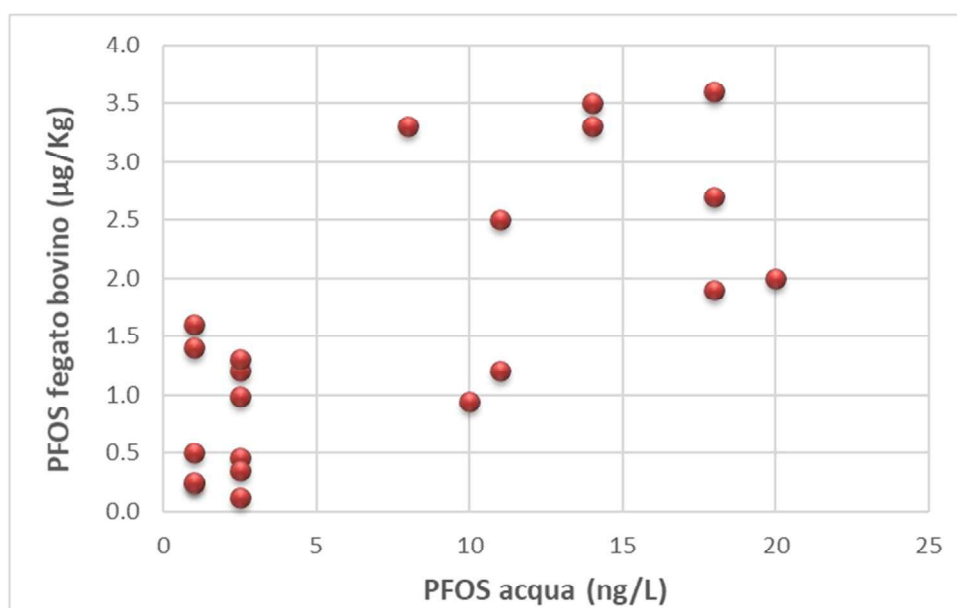
PFAS	N campioni <LoQ (%)	LoQ (ng/g)	zona di intensità			% campioni <LoQ sul totale di zona di intensità		
			alta	media	bassa			
			(n=21)	(n=29)	(n=32)			
			N campioni <LoQ					
PFBA	79 (96)	0,05	19	29	31	90	100	97
PFBS	79 (96)	0,05	20	27	32	95	93	100
PFPeA	82 (100)	0,05	21	29	32	100	100	100
PFHxA	81 (99)	0,05	20	29	32	95	100	100
PFHxS	76 (93)	0,05	19	25	32	90	86	100
PFHpA	82 (100)	0,05	21	29	32	100	100	100
PFOA	70 (85)	0,05	16	24	30	76	83	94
PFOS	1(1)	0,05	0	0	1*	0	0	3
PFNA	39 (48)	0,05	6	14	19	29	48	59
PFDeA	11 (13)	0,05	1	4	6	5	14	19
PFUnA	76 (93)	0,05	17	27	32	81	93	100
PFDaA	80 (98)	0,05	19	29	32	90	100	100
C6O4	82 (100)	0,10	21	29	32	100	100	100
GenX	82 (100)	0,10	21	29	32	100	100	100

*La concentrazione di PFOS per un campione risulta esplicitata nel rapporto di prova come uguale a 0,02 ng/g, dunque inferiore al LoQ e conteggiata come tale.

Tabella 9 – Concentrazioni (ng/g) in Lower bound (LB), Medium bound (MB), Upper bound (UB) e valore massimo rilevato (Max) di PFAS nei campioni di fegato di bovino delle aziende nelle tre zone di intensità.

PFAS	zona alta intensità				zona media intensità				zona bassa intensità			
	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max
PFBA	0,006	0,029	0,051	0,070	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,003	0,027	0,051	0,080
PFBS	0,028	0,052	0,076	0,590	0,003	0,027	0,050	0,050	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFPeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxA	0,010	0,030	0,060	0,180	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHpA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxS	0,006	0,029	0,051	0,070	0,011	0,032	0,054	0,090	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOA	0,049	0,068	0,087	0,450	0,066	0,087	0,108	0,690	0,004	0,028	0,051	0,080
PFOS	1,588	1,588	1,588	3,600	1,649	1,649	1,649	12,50	0,216	0,217	0,217	0,730
PFNA	0,064	0,071	0,079	0,290	0,042	0,054	0,067	0,160	0,024	0,039	0,054	0,090
PFDeA	0,209	0,210	0,211	0,530	0,213	0,217	0,220	1,200	0,064	0,068	0,073	0,180
PFUnA	0,016	0,036	0,056	0,110	0,008	0,032	0,055	0,180	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDaA	0,007	0,029	0,052	0,080	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
C6O4	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ
GenX	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ

Figura 2 – Diagramma a dispersione sui valori PFOS rilevati in acqua e fegato di bovino nella zona ad alta intensità.



Nel muscolo suino (Tabella 10), il PFBA è il composto col maggiore numero di campioni >LoQ (83%), seguito da PFOA (61%), PFOS e PFBS (11%). Gli altri analiti sono sempre non quantificabili. Le concentrazioni di PFBA nel muscolo suino (Tabella 11) non correlano con il marcato arricchimento misurato nelle acque di abbeveraggio per questa molecola, con valori MB per l'acqua di abbeveraggio nella zona ad alta intensità di un ordine di grandezza superiori a quelli nella zona a bassa intensità e valori intermedi per la zona a media intensità (Tabella 5). Nel muscolo suino le concentrazioni più elevate di PFBA (valore medio 0,18 ng/g, con un massimo di 0,23 ng/g) sono state misurate nei campioni della zona a bassa intensità (sebbene la numerosità di questi ultimi sia limitata) (Tabella 11). Questo segnala che l'acqua di abbeveraggio non è un fattore che determina la deposizione di questo composto nel muscolo suino e indica che altre fonti, verosimilmente legate all'alimentazione animale, sono responsabili degli andamenti osservati nei livelli tissutali. Nel caso del PFOA i livelli osservati sono invece compatibili con un ruolo dell'acqua di abbeveraggio, con valori MB nella zona ad alta intensità pari a 0,29 ng/g (valore massimo 0,66 ng/g), sebbene in assenza di un'associazione significativa con la concentrazione di PFOA nell'acqua.⁸

Nel fegato suino (Tabella 12) gli andamenti osservati nel muscolo sono confermati, ma emerge in aggiunta una deposizione marcata di PFOS e di altri PFAS a catena lunga non riscontrata nel muscolo. Le percentuali di campioni quantificati sono pari al 100% per il PFOS, 94% per il PFBA, 83% per il PFOA, 61% per PFNA e PFDeA, 50% per il PFHxS, 44% per il PFBS, 17% per il PFDoA, 6% per il PFHpA. Il PFOS e il PFOA sono i composti con le concentrazioni più elevate e mostrano tenori simili, con i valori medi più elevati registrati nella zona ad alta intensità (2,73 ng/g

⁸ L'assenza di significatività potrebbe derivare da un ruolo non esclusivo di questo fattore o essere dovuta alla limitata numerosità campionaria. Come spiegato nella "Discussione", l'influenza dell'acqua di abbeverata verrà valutata con altri approcci.

per il PFOS, 2,08 ng/g per il PFOA) (Tabella 13). Il terzo composto più abbondante è il PFBA, che raggiunge concentrazioni medie analoghe nelle zone ad elevata e a bassa intensità (rispettivamente 0,315 ng/g e 0,290 ng/g). Delle tre molecole, il PFOS è quella soggetta a maggiore arricchimento nel fegato rispetto alle concentrazioni nel muscolo (fattore medio di circa 90 nella zona ad elevata intensità) seguita dal PFOA (fattore medio di circa 7 nella zona ad elevata intensità), mentre il PFBA mostra concentrazioni nel fegato appena superiori a quelle misurate nel muscolo.

Nel muscolo di broiler (Tabella 14) il PFBA è l'unico composto quantificato, peraltro in soli due campioni nella zona a media intensità, nella quale pertanto le concentrazioni medie di PFBA in LB, MB e UB risultano essere pari rispettivamente a 0,007 ng/g, 0,030 ng/g e 0,052 ng/g (valore massimo 0,100 ng/g). Tutti gli altri PFAS sono presenti con concentrazioni <LoQ.

Nel fegato di broiler (Tabella 15), i composti con concentrazioni >LoQ sono PFBA (26% dei campioni), PFOA (20% dei campioni), PFOS (15% dei campioni), PFHxS (7% dei campioni), PFBS (4% dei campioni). Il composto più abbondante è il PFOA (valore medio nella zona ad alta intensità 0,196 ng/g), seguito dal PFOS (valore medio nella zona ad alta intensità 0,113 ng/g) e dal PFBA (valore medio nella zona ad alta intensità 0,085 ng/g) (Tabella 16).

Negli 11 campioni analitici di muscolo di tacchino (5 nella zona ad alta intensità, 5 nella zona a media intensità, 1 nella zona a bassa intensità) tutti i composti hanno concentrazioni <LoQ. Nei campioni di fegato di tacchino (Tabella 17) sono risultati quantificabili solo 2 campioni per il PFOS, 2 per il PFOA e 1 per PFHxS e PFNA. Le concentrazioni misurate sono piuttosto contenute, fatta eccezione per un campione con un tenore di PFOA pari a 0,150 ng/g nella zona a media intensità (Tabella 18). Sempre fra gli avicoli è analizzato un solo campione analitico di fegato e muscolo di faraona; entrambi sono risultati avere concentrazioni inferiori al LoQ per tutti i PFAS.

3.2.2. Uova

Per quanto riguarda le uova, il PFBA è stato quantificato nell'89% dei campioni, PFOA e PFOS nel 17%, PFNA e PFDeA nel 6% (Tabella 19). Il composto con le concentrazioni più elevate è il PFOS, con tenori medi in MB nelle zone a media ed alta intensità di 0,198 ng/g e di 0,165 ng/g, rispettivamente, e un valore massimo pari a 0,490 ng/g nella zona ad alta intensità (Tabella 20). Segue il PFOA, con tenori medi nelle zone a media ed alta intensità di 0,158 ng/g e di 0,113 ng/g, rispettivamente, e un valore massimo pari a 0,290 ng/g nella zona ad alta intensità. Il PFBA è presente in concentrazioni inferiori, con un valore massimo pari a 0,190 ng/g nella zona ad alta intensità.

3.2.3. Latte

Nei 13 campioni analitici di latte raccolti nelle zone ad alta e media intensità, il PFOS è stato quantificato nel 46% dei campioni, il PFOA nel 15% dei campioni, il PFBA nell'8% dei campioni (Tabella 21). I tenori medio (in MB) e massimo di PFOS misurati nella zona ad alta intensità sono risultati pari a 0,026 ng/g e 0,070 ng/g (Tabella 22). Il tenore massimo di PFOA misurato (nella zona ad alta intensità) è stato di 0,050 ng/g.

Tabella 10 – Analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei campioni analitici (*n*) di muscolo di suino delle aziende nelle tre zone di intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato: frazione dei campioni con concentrazione inferiore al LoQ (*left-censored*).

PFAS	N campioni <LoQ (%)	LoQ (ng/g)	zona di intensità			% campioni <LoQ sul totale di zona di intensità		
			alta	media	bassa			
			(n=11)	(n=4)	(n=3)			
			N campioni <LoQ					
PFBA	3 (17)	0,05	0	3	0	0	75	0
PFBS	16 (89)	0,05	9	4	3	82	100	100
PFPeA	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
PFHxA	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
PFHxS	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
PFHpA	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
PFOA	7 (39)	0,05	2	2	3	18	50	100
PFOS	16 (89)	0,05	9	4	3	82	100	100
PFNA	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
PFDeA	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
PFUnA	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
PFDaA	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
C6O4	18 (100)	0,10	11	4	3	100	100	100
GenX	18 (100)	0,10	11	4	3	100	100	100

Tabella 11 – Concentrazioni (ng/g) in Lower bound (LB), Medium bound (MB), Upper bound (UB) e valore massimo rilevato (Max) di PFAS nei campioni di muscolo di suino delle aziende nelle tre zone di intensità.

PFAS	zona alta intensità				zona media intensità				zona bassa intensità			
	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max
PFBA	0,107	0,107	0,107	0,170	0,013	0,031	0,050	0,050	0,180	0,180	0,180	0,230
PFBS	0,014	0,034	0,055	0,080	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFPeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHpA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxS	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOA	0,286	0,291	0,295	0,660	0,053	0,065	0,078	0,120	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOS	0,010	0,030	0,051	0,060	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFNA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFUnA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDaA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
C6O4	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ
GenX	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ

Tabella 12 – Analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei campioni analitici (*n*) di **fegato di suino** delle aziende nelle tre zone di intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato: frazione dei campioni con concentrazione inferiore al LoQ (*left-censored*).

PFAS	N campioni <LoQ (%)	LoQ (ng/g)	zona di intensità			% campioni <LoQ sul totale di zona di intensità		
			alta	media	bassa			
			(n=11)	(n=4)	(n=3)			
			N campioni <LoQ					
PFBA	1 (6)	0,05	0	1	0	0	25	0
PFBS	10 (56)	0,05	5	2	3	45	50	100
PFPeA	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
PFHxA	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
PFHxS	9 (50)	0,05	4	2	3	36	50	100
PFHpA	17 (94)	0,05	10	4	3	91	100	100
PFOA	3 (17)	0,05	0	2	1	0	50	33
PFOS	0	0,05	0	0	0	0	0	0
PFNA	7 (39)	0,05	3	2	2	27	50	67
PFDeA	7 (39)	0,05	1	3	3	9	75	100
PFUnA	18 (100)	0,05	11	4	3	100	100	100
PFDaA	15 (83)	0,05	8	4	3	73	100	100
C6O4	18 (100)	0,10	11	4	3	100	100	100
GenX	18 (100)	0,10	11	4	3	100	100	100

Tabella 13 – Concentrazioni (ng/g) in Lower bound (LB), Medium bound (MB), Upper bound (UB) e valore massimo rilevato (Max) di PFAS nei campioni di fegato di suino delle aziende nelle tre zone di intensità.

PFAS	zona alta intensità				zona media intensità				zona bassa intensità			
	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max
PFBA	0,315	0,315	0,315	1,140	0,080	0,086	0,093	0,170	0,290	0,290	0,290	0,360
PFBS	0,186	0,198	0,209	0,730	0,068	0,080	0,093	0,210	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFPeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHpA	0,005	0,028	0,051	0,060	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxS	0,085	0,094	0,103	0,190	0,088	0,100	0,113	0,180	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOA	2,082	2,082	2,082	4,800	0,460	0,473	0,485	1,190	0,077	0,085	0,093	0,160
PFOS	2,731	2,731	2,731	8,400	0,728	0,728	0,728	1,410	0,190	0,190	0,190	0,270
PFNA	0,074	0,080	0,087	0,150	0,040	0,053	0,065	0,080	0,020	0,037	0,053	0,060
PFDeA	0,128	0,130	0,133	0,240	0,013	0,031	0,050	0,050	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFUnA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDaA	0,016	0,035	0,053	0,060	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
C6O4	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ
GenX	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ

Tabella 14 – Analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei campioni analitici (*n*) di **muscolo di broiler** delle aziende nelle tre zone di intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato: frazione dei campioni con concentrazione inferiore al LoQ (*left-censored*).

PFAS	N campioni <LoQ (%)	LoQ (ng/g)	zona di intensità			% campioni <LoQ sul totale di zona di intensità		
			alta	media	bassa			
			(n=4)	(n=21)	(n=21)			
			N campioni <LoQ					
PFBA	44 (96)	0,05	4	19	21	100	90	100
PFBS	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFPeA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFHxA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFHxS	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFHpA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFOA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFOS	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFNA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFDeA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFUnA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFDaA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
C6O4	46 (100)	0,10	4	21	21	100	100	100
GenX	46 (100)	0,10	4	21	21	100	100	100

Tabella 15 – Analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei campioni analitici (*n*) di **fegato di broiler** delle aziende nelle tre zone di intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato: frazione dei campioni con concentrazione inferiore al LoQ (*left-censored*).

PFAS	N campioni <LoQ (%)	LoQ (ng/g)	zona di intensità			% campioni <LoQ sul totale di zona di intensità		
			alta (n=4)	media (n=21)	bassa (n=21)			
			N campioni <LoQ					
PFBA	34 (74)	0,05	2	15	17	50	71	81
PFBS	44 (96)	0,05	3	20	21	75	95	100
PFPeA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFHxA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFHxS	43 (93)	0,05	2	20	21	50	95	100
PFHpA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFOA	37 (80)	0,05	1	15	21	25	71	100
PFOS	39 (85)	0,05	0	18	21	0	86	100
PFNA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFDeA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFUnA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
PFDaA	46 (100)	0,05	4	21	21	100	100	100
C6O4	46 (100)	0,10	4	21	21	100	100	100
GenX	46 (100)	0,10	4	21	21	100	100	100

Tabella 16 – Concentrazioni (ng/g) in Lower bound (LB), Medium bound (MB), Upper bound (UB) e valore massimo rilevato (Max) di PFAS nei campioni di fegato di broiler delle aziende nelle tre zone di intensità.

PFAS	zona alta intensità				zona media intensità				zona bassa intensità			
	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max
PFBA	0,073	0,085	0,098	0,150	0,021	0,039	0,057	0,120	0,013	0,034	0,054	0,110
PFBS	0,020	0,039	0,058	0,080	0,002	0,026	0,050	0,050	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFPeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHpA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxS	0,033	0,045	0,058	0,070	0,002	0,026	0,050	0,050	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOA	0,190	0,196	0,203	0,390	0,057	0,075	0,093	0,450	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOS	0,113	0,113	0,113	0,160	0,011	0,032	0,054	0,110	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFNA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFUnA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDaA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
C6O4	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ
GenX	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ

Tabella 17 – Analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei campioni analitici (*n*) di **fegato** di **tacchino** delle aziende nelle tre zone di intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato: frazione dei campioni con concentrazione inferiore al LoQ (*left-censored*).

PFAS	N campioni <LoQ (%)	LoQ (ng/g)	zona di intensità			% campioni <LoQ sul totale di zona di intensità		
			alta (n=4)	media (n=5)	bassa (n=1)			
			N campioni <LoQ					
PFBA	10 (100)	0,05	4	5	1	100	100	100
PFBS	10 (100)	0,05	4	5	1	100	100	100
PFPeA	10 (100)	0,05	4	5	1	100	100	100
PFHxA	10 (100)	0,05	4	5	1	100	100	100
PFHxS	9 (90)	0,05	4	4	1	100	80	100
PFHpA	10 (100)	0,05	4	5	1	100	100	100
PFOA	8 (80)	0,05	3	4	1	75	80	100
PFOS	8 (80)	0,05	2	5*	1	50	100	100
PFNA	9 (90)	0,05	4	4	1	100	80	100
PFDeA	10 (100)	0,05	4	5	1	100	100	100
PFUnA	10 (100)	0,05	4	5	1	100	100	100
PFDaA	10 (100)	0,05	4	5	1	100	100	100
C6O4	10 (100)	0,10	4	5	1	100	100	100
GenX	10 (100)	0,10	4	5	1	100	100	100

*La concentrazione di PFOS per un campione risulta esplicitata nel rapporto di prova come uguale a 0,02 ng/g, dunque inferiore al LoQ e conteggiata come tale.

Tabella 18 – Concentrazioni (ng/g) in Lower bound (LB), Medium bound (MB), Upper bound (UB) e valore massimo rilevato (Max) di PFAS nei campioni di fegato di tacchino delle aziende nelle tre zone di intensità.

PFAS	zona alta intensità				zona media intensità				zona bassa intensità			
	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max
PFBA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFBS	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFPeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHpA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxS	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,016	0,036	0,056	0,080	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOA	0,020	0,039	0,058	0,080	0,030	0,050	0,070	0,150	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOS	0,033	0,045	0,058	0,070	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFNA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,012	0,032	0,052	0,060	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFUnA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDaA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
C6O4	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ
GenX	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ

Tabella 19 – Analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei campioni analitici (*n*) di uova delle aziende nelle tre zone di intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato: frazione dei campioni con concentrazione inferiore al LoQ (*left-censored*).

PFAS	N campioni <LoQ (%)	LoQ (ng/g)	zona di intensità			% campioni <LoQ sul totale di zona di intensità		
			alta	media	bassa			
			(n=4)	(n=2)	(n=12)			
			N campioni <LoQ					
PFBA	2 (11)	0,05	2	0	0	50	0	0
PFBS	18 (100)	0,05	4	2	12	100	100	100
PFPeA	18 (100)	0,05	4	2	12	100	100	100
PFHxA	18 (100)	0,05	4	2	12	100	100	100
PFHxS	18 (100)	0,05	4	2	12	100	100	100
PFHpA	18 (100)	0,05	4	2	12	100	100	100
PFOA	15 (83)	0,05	2	1	12	50	50	100
PFOS	15 (83)	0,05	2	1	12	50	50	100
PFNA	17 (94)	0,05	4	1	12	100	50	100
PFDeA	17 (94)	0,05	3	2	12	75	100	100
PFUnA	18 (100)	0,05	4	2	12	100	100	100
PFDaA	18 (100)	0,05	4	2	12	100	100	100
C6O4	18 (100)	0,10	4	2	12	100	100	100
GenX	18 (100)	0,10	4	2	12	100	100	100

Tabella 20 – Concentrazioni (ng/g) in Lower bound (LB), Medium bound (MB), Upper bound (UB) e valore massimo rilevato (Max) di PFAS nei campioni di uova delle aziende nelle tre zone di intensità.

PFAS	zona alta intensità				zona media intensità				zona bassa intensità			
	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max
PFBA	0,073	0,085	0,098	0,190	0,085	0,085	0,085	0,110	0,083	0,083	0,083	0,120
PFBS	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFPeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHpA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFHxS	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOA	0,100	0,113	0,125	0,290	0,145	0,158	0,170	0,290	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFOS	0,153	0,165	0,178	0,490	0,185	0,198	0,210	0,370	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFNA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,025	0,038	0,050	0,050	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDeA	0,018	0,036	0,055	0,070	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFUnA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
PFDaA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ
C6O4	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ
GenX	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ

Tabella 21 – Analisi descrittiva dei dati di concentrazione rilevati nei campioni analitici (*n*) di latte delle aziende nelle tre zone di intensità in relazione al LoQ del metodo analitico impiegato: frazione dei campioni con concentrazione inferiore al LoQ (*left-censored*).

PFAS	N campioni <LoQ (%)	LoQ (ng/g)	zona di intensità			% campioni <LoQ sul totale di zona di intensità		
			alta	media	bassa			
			(n=7)	(n=6)	(n=0)			
			N campioni <LoQ					
PFBA	12 (92)	0,05	6	6	0	86	100	-
PFBS	13 (100)	0,05	7	6	0	100	100	-
PFPeA	13 (100)	0,05	7	6	0	100	100	-
PFHxA	13 (100)	0,05	7	6	0	100	100	-
PFHxS	13 (100)	0,01	7	6	0	100	100	-
PFHpA	13 (100)	0,05	7	6	0	100	100	-
PFOA	11 (85)	0,01	6	5	0	86	83	-
PFOS	7 (54)	0,01	2	5	0	29	83	-
PFNA	13 (100)	0,01	7	6	0	100	100	-
PFDeA	13 (100)	0,05	7	6	0	100	100	-
PFUnA	13 (100)	0,05	7	6	0	100	100	-
PFDaA	13 (100)	0,05	7	6	0	100	100	-
C6O4	13 (100)	0,10	7	6	0	100	100	-
GenX	13 (100)	0,10	7	6	0	100	100	-

Tabella 22 – Concentrazioni (ng/g) in Lower bound (LB), Medium bound (MB), Upper bound (UB) e valore massimo rilevato (Max) di PFAS nei campioni di latte delle aziende nelle tre zone di intensità.

PFAS	zona alta intensità				zona media intensità				zona bassa intensità			
	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max	LB	MB	UB	Max
PFBA	0,010	0,025	0,050	0,050	0,000	0,025	0,050	<LoQ	-	-	-	-
PFBS	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	-	-	-	-
PFPeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	-	-	-	-
PFHxA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	-	-	-	-
PFHpA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	-	-	-	-
PFHxS	0,000	0,005	0,010	<LoQ	0,000	0,005	0,010	<LoQ	-	-	-	-
PFOA	0,007	0,008	0,016	0,050	0,007	0,011	0,015	0,040	-	-	-	-
PFOS	0,024	0,026	0,027	0,070	0,005	0,009	0,013	0,030	-	-	-	-
PFNA	0,000	0,005	0,010	<LoQ	0,000	0,005	0,010	<LoQ	-	-	-	-
PFDeA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	-	-	-	-
PFUnA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	-	-	-	-
PFDoA	0,000	0,025	0,050	<LoQ	0,000	0,025	0,050	<LoQ	-	-	-	-
C6O4	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	-	-	-	-
GenX	0,000	0,050	0,100	<LoQ	0,000	0,050	0,100	<LoQ	-	-	-	-

3.3. Caso di azienda sottoposta a follow-up

Nel corso dei campionamenti nella zona a media intensità, in data 01/08/2023 sono stati prelevati dall'azienda sottoposta a follow-up tre campioni di muscolo e fegato bovino, contestualmente all'associato campione di acqua di abbeveraggio (acqua sotterranea di pozzo). I tre bovini avevano un'età di 16-18 mesi ed erano stati alimentati con foraggi e mangimi.

Le concentrazioni dei PFAS con valori misurati >LoQ nelle matrici carnee sono riassunte in Tabella 23 dove è mostrata anche la concentrazione determinata nella rispettiva acqua di abbeveraggio.

I valori misurati nell'acqua di abbeveraggio segnalano per le cinque molecole arricchimenti rispetto ai valori medi misurati nelle acque di abbeveraggio sia nelle zone a media che ad alta intensità. La contaminazione da PFOS è particolarmente importante, con un fattore di arricchimento rispetto al valore medio misurato nelle acque della zona ad alta intensità e a media intensità di 14 e di 16 volte, rispettivamente.

Nei bovini, la concentrazione di PFOS misurata è risultata superiore al tenore massimo previsto per il muscolo (0,3 ng/g) e il fegato (6,0 ng/g) dal Regolamento (UE) 2023/915, determinando l'inibizione alla messa sul mercato di questi prodotti.

L'azienda, successivamente all'esito del primo campionamento, ha provveduto ad allacciarsi alla rete idrica e a ricorrere all'acqua di acquedotto per l'abbeveraggio. Gli esiti analitici dei campionamenti eseguiti nei mesi successivi (Figura 3) mostrano che i livelli dei cinque PFAS sono progressivamente diminuiti. In particolare, per quanto concerne il PFOS nel muscolo, il declino

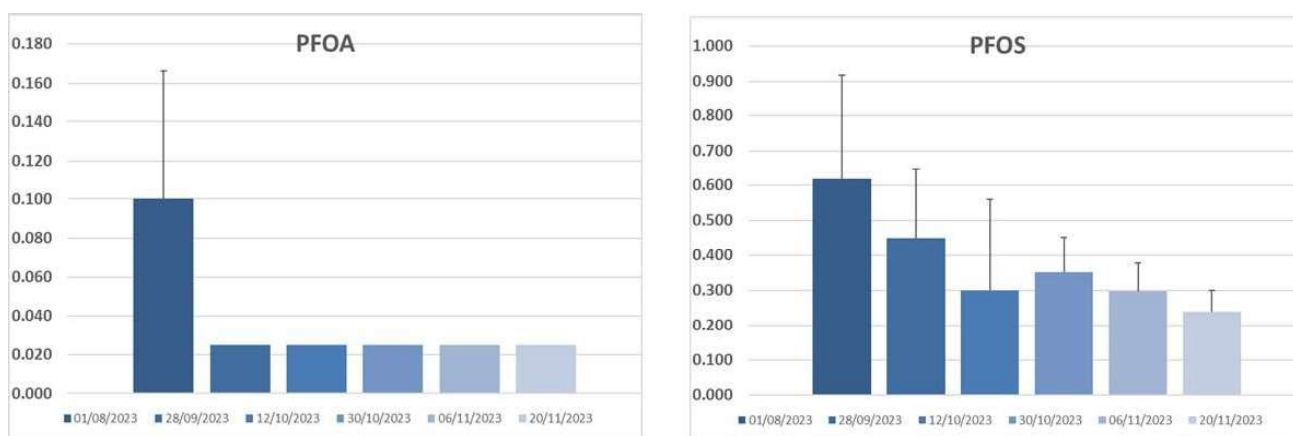
dei livelli tissutali ha determinato la conformità con i limiti legali ad esito del processo di adeguamento.

Tabella 23 – Concentrazioni in medium bound (MB) di PFAS nei campioni di muscolo e fegato bovino (ng/g) e nell'acqua di abbeveraggio (ng/L) dell'azienda sottoposta a follow-up al 01/08/2023. Per l'acqua di abbeveraggio sono riportati per confronto i valori MB misurati nelle acque delle zone ad alta e media intensità (Tabella 5).

	PFDeA	PFNA	PFOA	PFHxS	PFOS
Muscolo	0,025	0,025	0,100	0,025	0,617
Fegato	1,200	0,137	0,560	0,073	11,37
Acqua	9,0	2,5	759	7,0	104
Acqua: v. medio zona alta intensità	1,7	1,8	284	5,0	7,5
Acqua: v. medio zona media intensità	2,1	2,0	117	2,5	6,7

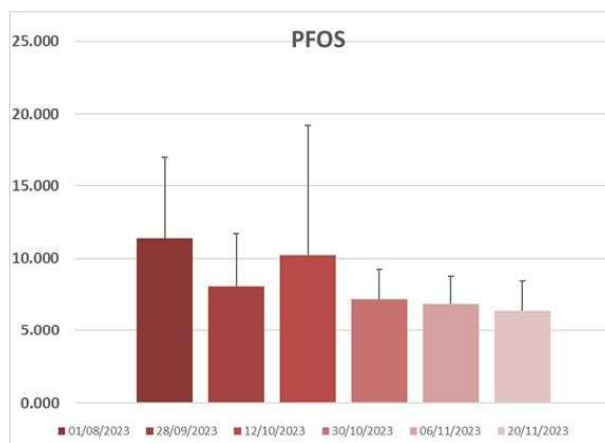
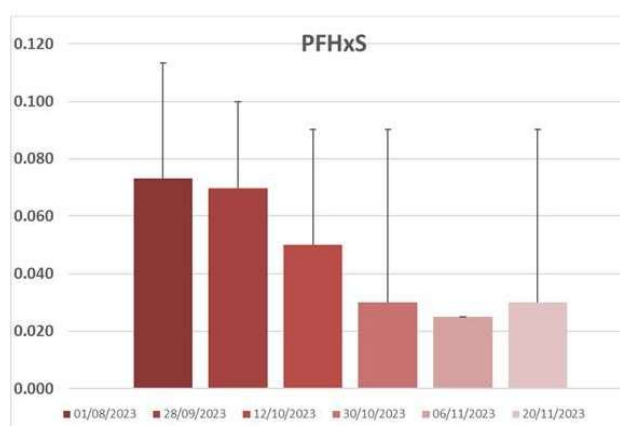
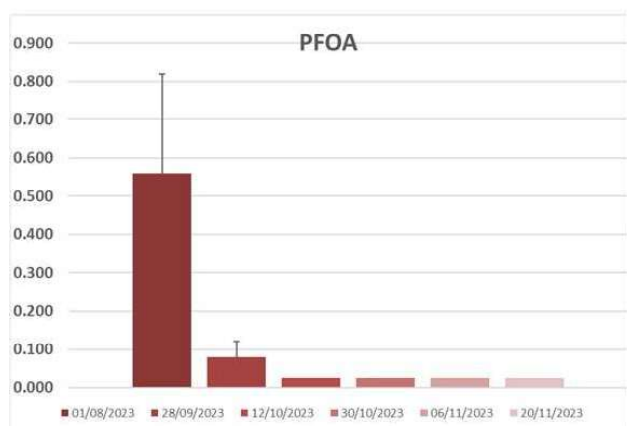
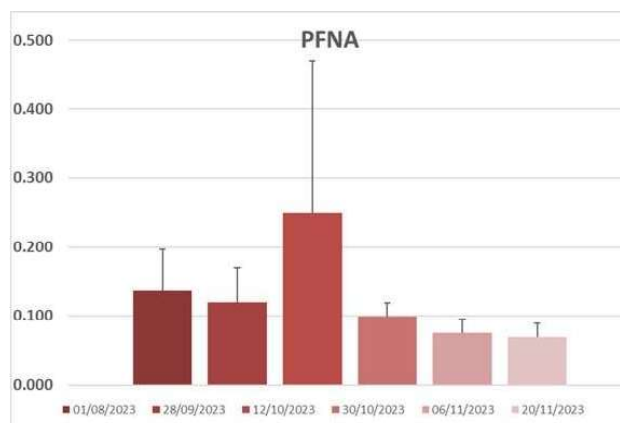
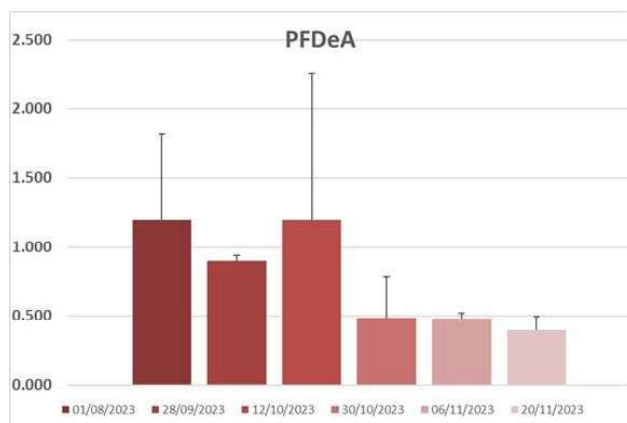
Figura 3 – Concentrazioni di PFAS (ng/g) misurate in sei successivi campionamenti di muscolo e fegato di bovino nell'azienda sottoposta a follow-up. Sono mostrate la concentrazione media misurata e l'associata incertezza di misura estesa (U) per i PFAS con concentrazioni >LoQ in almeno un campionamento. Le concentrazioni <LoQ (es. PFOA nel muscolo dei campionamenti da 2 a 6) sono visualizzate come pari a LoQ/2.

Muscolo



(continua alla pagina successiva)

Fegato



4. Discussione

Gli alimenti di origine animale contribuiscono in modo significativo all'esposizione umana ai PFAS (EFSA CONTAM Panel, 2020). Nella sua Opinione del 2020 l'EFSA ha segnalato come i PFAS si trasferiscano dai mangimi e dai foraggi agli alimenti di origine animale con chiare differenze tra le specie animali e i tipi di PFAS (EFSA CONTAM Panel, 2020). Il trasferimento di PFAS può avvenire anche tramite il suolo ingerito dagli animali d'allevamento durante il foraggiamento e tramite l'acqua di abbeveraggio (Allegato C).

I PFAS sono rapidamente assorbiti attraverso il tratto gastrointestinale, si distribuiscono nel plasma e nei tessuti e tendono ad accumularsi nel fegato in misura dipendente dalla molecola e dalla specie animale. Né i PFCA né i PFSA sono metabolizzati dagli animali e dall'uomo.⁹ Le vie di eliminazione (mediante urina e feci) e la velocità di eliminazione variano in base alla struttura chimica, alla lunghezza della catena e alla specie animale.

Gli studi di tossicocinetica indicano che i composti a catena lunga presentano fattori di bioaccumulo più elevati rispetto ai loro analoghi a catena corta, raggiungendo concentrazioni più elevate nei tessuti degli animali in relazione alla concentrazione presente nel mangime (Numata et al., 2014; Kowalczyk et al., 2013; Kowalczyk et al., 2020; Kwiatkowski et al., 2020). Inoltre, l'emivita dei PFSA è solitamente più lunga rispetto a quella dei PFCA, a parità di lunghezza della catena (EFSA CONTAM Panel, 2020). Il PFOS ha una delle emivite più lunghe: 3,5-160 giorni per i polli, 39-120 giorni per i bovini e fino a 1,7 anni per i suini (Surma et al., 2023).

Per la valutazione delle concentrazioni di PFAS misurate nelle otto matrici oggetto di indagine sono stati presi in esame diversi riferimenti quantitativi. Per una caratterizzazione dei livelli di fondo sono stati presi in esame i valori medi di presenza in LB calcolati dall'EFSA per PFOA, PFOS, PFNA e PFHxS (EFSA CONTAM Panel, 2020) (Tabella 24) e i dati di letteratura riferiti ad aree non contaminate per PFBA, PFBS, PFHxS, PFOA, PFOS, PFNA e PFDeA (Allegato C). Per il latte, la Raccomandazione (UE) 2022/1431 della Commissione Europea relativa al monitoraggio di PFAS negli alimenti segnala per i quattro PFAS sopra elencati dei livelli indicativi¹⁰ il cui superamento indica l'opportunità di indagini di approfondimento (Tabella 24). Questi quattro composti sono anche quelli normati e la Tabella 24 mostra i tenori massimi vigenti per le matrici oggetto della presente indagine.

In merito ai quattro PFAS valutati dall'EFSA nel 2020, la caratterizzazione del rischio condotta dal Panel CONTAM ha evidenziato che l'esposizione alimentare di fondo di vasta parte della popolazione generale europea supera il TWI di gruppo e ciò è motivo di preoccupazione (EFSA CONTAM Panel, 2020). Questa conclusione si può ritenere in prima istanza¹¹ valida per la

⁹ Invece, precursori come gli alcoli fluorotelomerici (FTOH), gli esteri polifluoroalchilici fosfatici (PAP), acidi sulfamidici acetici del perfluorottano (FOSAA), sulfonamidi del perfluorottano (FOSA) vengono trasformati in diversi metaboliti, tra cui i PFCA e i PFSA, contribuendo all'esposizione indiretta di PFAS (EFSA CONTAM Panel, 2020).

¹⁰ Secondo la Raccomandazione (UE) 2022/1431, questi sono definiti come livelli il cui superamento dovrebbe motivare indagini sulle cause della contaminazione.

¹¹ Cioè nelle more dell'ottenimento di stime più mirate dell'esposizione alimentare per la popolazione di riferimento. In particolare, il "Piano di monitoraggio regionale" contribuirà a questo obiettivo, come indicato nell'Introduzione.

popolazione generale del Veneto ed è supportata dai dati di biomonitoraggio umano (Ingelido et al., 2018; Ingelido et al., 2020). Per queste quattro molecole, che contribuiscono maggiormente all'esposizione alimentare di fondo e ai livelli sierici di PFAS, è appropriato considerare che ogni apporto aggiuntivo derivante da livelli di contaminazione degli alimenti superiori a quelli di fondo rappresenta un aumento del rischio per la salute. L'impatto quantitativo in termini espositivi dipende dalla frequenza di consumo e dalla tipologia di alimenti di origine locale consumati.

Nel muscolo bovino il PFOS è la molecola quantificata nel maggior numero dei campioni (24%, quasi interamente provenienti dalle zone ad alta e media intensità). I livelli medi determinati nelle zone ad alta e media intensità sono superiori a quelli di fondo (Tabella 24, Allegato C) e pari a circa un terzo del tenore massimo vigente (Tabella 24). Il dato è influenzato da valori puntuali estremamente elevati registrati in singole aziende, il 6% dei quali numericamente superiori¹² al tenore massimo vigente (valori massimi nelle zone ad alta intensità e media intensità pari a 0,37 ng/g e 0,69 ¹³□, rispettivamente). L'uso di acqua di abbeveraggio contaminata è un driver importante dell'aumento dei livelli tissutali di PFOS sia nel muscolo che nel fegato bovino, come esemplificato dal caso dell'azienda sottoposta a sorveglianza protratta nel tempo descritto nella sezione 3.3. Il PFOA è stato quantificato nel 7% dei campioni di muscolo bovino e il valore massimo determinato (0,13 ng/g) è sei volte inferiore al tenore massimo legale (Tabella 24).

Tabella 24 – Valori medi di presenza in LB calcolati dall'EFSA^a ('EFSA LB'), livelli indicativi della Raccomandazione (UE) 2022/1431 ('LI') e tenori massimi ai sensi del Regolamento (UE) 2023/915 ('TM') per i quattro PFAS ricompresi nel TWI di gruppo dell'EFSA (concentrazioni in ng/g).

PFOS				PFOA			
Matrice	EFSA LB	LI	TM	Matrice	EFSA LB	LI	TM
Uova	0,267		1,0	Uova	0,106		0,30
Carni di bovini, suini, pollame	0,028		0,30	Carni di bovini, suini, pollame	0,028		0,80
Carne di ovini	0,028		1,0	Carne ovini	0,028		0,20
Frattaglie edibili	0,867		6,0	Frattaglie edibili	0,092		0,70
Latte	0,001	0,020		Latte	0,000	0,010	
PFNA				PFHxS			
Matrice	EFSA LB	LI	TM	Matrice	EFSA LB	LI	TM
Uova	0,000		0,70	Uova	0,000		0,30
Carni di bovini, suini, pollame	0,000		0,20	Carni di bovini, suini, pollame	0,000		0,20
Carne ovini	0,000		0,20	Carne ovini	0,000		0,20
Frattaglie edibili	0,087		0,40	Frattaglie edibili	0,014		0,50
Latte	0,000	0,050		Latte	0,000	0,060	

^a(EFSA CONTAM Panel, 2020). Le categorie alimentari considerate sono (i) per le uova, '*eggs and egg products*' (ii) per le carni, '*livestock meat*' (iii) per le frattaglie edibili, '*edible offal, farmed animals*' (iv) per il latte, '*liquid milk*'.

¹² Vale a dire senza considerare l'incertezza di misura.

¹³ Valore riscontrato in un campione dell'azienda sottoposta a follow-up.

Il fegato è un organo bersaglio per la deposizione e il bioaccumulo di PFAS e nei bovini la quasi totalità dei campioni di fegato è risultata avere concentrazioni di PFOS quantificabili. I livelli medi determinati nelle zone ad alta e media intensità, pari a 1,59 ng/g e 1,65 ng/g, risultano chiaramente aumentati rispetto al tenore medio di 0,22 ng/g nella zona a bassa intensità e ai valori di fondo (Tabella 24, Allegato C). La concentrazione di PFOS determinata in 3 campioni provenienti dalla zona a media intensità (su 29, valore massimo 12,5 ng/g) supera il tenore massimo vigente (Tabella 24)¹⁴.

Due PFCA a catena lunga, il PFNA (9 atomi di carbonio) e il PFDeA (10 atomi di carbonio), sono risultati quantificabili rispettivamente nel 52% e nell'87% dei campioni di fegato bovino. Il PFNA, una delle 4 molecole ricomprese nel TWI di gruppo stabilito dall'EFSA, non presenta concentrazioni estreme (Allegato C) e anche il valore massimo (0,29 ng/g) è ben al di sotto del tenore massimo vigente (Tabella 24). Il PFDeA nelle zone ad alta e media intensità presenta una concentrazione tre volte superiore a quella della zona a bassa intensità e nella zona a media intensità raggiunge un valore massimo (1,2 ng/g)¹⁴ superiore a quelli riscontrati in letteratura (Allegato C).

Altri PFAS sono risultati quantificabili nel fegato bovino in misura molto minore: il PFOA nel 15% dei campioni (valore più elevato pari a 0,69 ng/g, inferiore al tenore massimo vigente, Tabella 24), il PFHxS e il PFUnA nel 7% dei campioni (senza valori estremi, in particolare per il primo, una delle 4 molecole ricomprese nel TWI di gruppo stabilito dall'EFSA), altri 4 composti – vale a dire PFBA, PFBS, PFDoA, PFHxA - nell'1-4% dei campioni, occasionalmente con valori puntuali elevati (PFBS 0,59 ng/g).

Nel muscolo suino, il PFBA è il composto col maggiore numero di campioni quantificati (83%), seguito da PFOA (61%), mentre PFOS e PFBS sono quantificati in una minoranza di campioni (11%). Le concentrazioni di PFBA nel muscolo suino non correlano con quelle nelle acque di abbeveraggio: le concentrazioni più elevate (valore medio 0,18 ng/g) sono state misurate nei campioni della zona a bassa intensità (sebbene la numerosità di questi ultimi sia limitata), seguite dai campioni della zona ad alta intensità (valore medio 0,11 ng/g). Altre fonti, verosimilmente legate ai livelli di contaminazione delle materie prime vegetali impiegate nell'alimentazione animale, influenzano la deposizione di questo composto nel muscolo suino col raggiungimento - nelle aziende con i valori più elevati - di livelli superiori a quelli di fondo osservati in letteratura (Allegato C). Nel caso del PFOA i livelli osservati sono invece compatibili con un ruolo (verosimilmente non esclusivo) dell'acqua di abbeveraggio, con concentrazioni medie nella zona ad alta intensità pari a 0,29 ng/g (valore massimo 0,66 ng/g). Si tratta di valori più elevati rispetto a quelli di fondo riscontrati in letteratura (Allegato C).

Nel fegato suino gli andamenti osservati nel muscolo sono confermati, ma emerge in aggiunta una deposizione marcata di PFOS e di altri PFAS a catena lunga. Le percentuali di campioni quantificati sono pari al 100% per il PFOS, 94% per il PFBA, 83% per il PFOA, 61% per PFNA e PFDeA, 50% per il PFHxS, 44% per il PFBS, 17% per il PFDoA. Il PFOS e il PFOA sono i composti con le concentrazioni più elevate e mostrano tenori simili, con i valori medi più elevati registrati nella zona ad alta intensità (2,73 ng/g per il PFOS, 2,08 ng/g per il PFOA). Questi valori

¹⁴ Questi campioni provengono dall'azienda sottoposta a follow-up.

sono largamente superiori a quelli descritti in letteratura e particolarmente elevati nel caso del PFOA. Le concentrazioni più elevate riscontrate per PFOS e PFOA nel fegato dei suini provenienti dalla zona ad alta intensità ($n = 1$ e $n = 8$, rispettivamente, con valori massimi rispettivamente 8,4 e 4,8 ng/g) sono superiori ai tenori massimi vigenti e l'entità di tale superamento è particolarmente vistosa per il PFOA. Il terzo composto più abbondante è il PFBA, che raggiunge concentrazioni medie analoghe nelle zone ad elevata e a bassa intensità (rispettivamente 0,315 ng/g e 0,290 ng/g), superiori a quelle descritte in letteratura (Allegato C). Parimenti elevati rispetto ai valori di letteratura, specialmente nella zona ad alta intensità, sono i valori misurati di PFBS e PFNA, e a seguire quelli di PFHxS e PFDeA (Allegato C).

I risultati ottenuti sul fegato suino meritano un approfondimento in termini interpretativi. I tenori elevati riscontrati per diversi PFAS riflettono il ruolo del fegato come organo bersaglio per il bioaccumulo, tuttavia sembrano sovrapporsi, con cinetiche di accumulo differenziate molecola-specifiche, deposizioni associate al ruolo dell'acqua di abbeverata (PFOS e PFOA) e deposizioni (es. PFBA) che potrebbero risentire di un contributo di altri apporti (mangimi/foraggi, pratiche zootecniche). Tale approfondimento, fondato su una ricerca bibliografica mirata, è in corso di realizzazione e sarà trasmesso come integrazione in una fase successiva per non ritardare l'emissione della presente relazione. In termini di sicurezza alimentare, si osserva che la conformità ai tenori massimi individuali e di gruppo per i PFAS normati potrebbe rappresentare un criterio insufficiente per l'idoneità all'immissione in commercio in ragione della contemporanea presenza di elevati tenori di altri PFAS, per i quali ad oggi non è disponibile una valutazione del rischio (EFSA CONTAM Panel, 2020). L'incertezza sulla natura ed entità degli effetti avversi sulla salute umana di questi PFAS e la mancanza di una caratterizzazione del pericolo determina una situazione di incertezza riguardo al potenziale rischio per la salute dei consumatori. La co-presenza di elevati livelli di numerosi PFAS è tuttavia un elemento che merita attenzione. L'eventuale adozione di misure di precauzione per garantire un livello elevato di protezione dei consumatori in questi casi rientra nell'ambito della gestione del rischio e pertanto non attiene al ruolo di codesto Istituto. Qualora l'Autorità regionale dovesse ritenere appropriata l'adozione di misure cautelative, l'Istituto resta disponibile per il supporto scientifico all'identificazione di criteri di selezione idonei. In termini di prevenzione, si suggerisce di valutare l'istituzione di un piano ad hoc per la matrice fegato suino, che potrebbe articolarsi nella forma di follow-up del presente piano, rivolto alle medesime aziende già oggetto di indagine.

Le concentrazioni dei PFAS quantificati nelle carni avicole sono contenute. Nel muscolo di broiler il PFBA è l'unico composto quantificato, con valore massimo di 0,10 ng/g, mentre nel muscolo di tacchino tutti i composti hanno concentrazioni <LoQ. Nel fegato di broiler il composto più abbondante è il PFOA (valore medio nella zona ad alta intensità pari a 0,196 ng/g, mentre il valore massimo è stato riscontrato nella zona a media intensità ed è pari a 0,450 ng/g). Segue il PFOS (valore medio nella zona ad alta intensità di 0,113 ng/g, con massimo a 0,160 ng/g) e il PFBA (valore medio nella zona ad alta intensità di 0,085 ng/g con massimo a 0,150 ng/g). Nei campioni di fegato di tacchino solo in un campione il PFOA fa registrare un valore anomalo (0,150 ng/g nella zona a media intensità).

Per quanto riguarda le uova, il PFBA è stato quantificato nell'89% dei campioni, PFOA e PFOS nel 17%, PFNA e PFDeA nel 6%. Il composto con le concentrazioni più elevate è il PFOS, con

tenori medi in MB rispettivamente nelle zone a media ed alta intensità di 0,198 ng/g e di 0,165 ng/g, inferiori al valore medio LB EFSA (Tabella 24) e un valore massimo pari a 0,490 ng/g. Segue il PFOA, con tenori medi nelle zone a media ed alta intensità di 0,158 ng/g e di 0,113 ng/g, rispettivamente, entrambi superiori al valore medio LB EFSA (Tabella 24), e un valore massimo pari a 0,290 ng/g (prossimo, sebbene inferiore, al tenore massimo vigente). Il PFBA è presente in concentrazioni inferiori, con un valore massimo pari a 0,190 ng/g. Per questi composti, i valori misurati ricadono nella coda destra delle distribuzioni di valori di letteratura ma sono inferiori a quelli particolarmente elevati riscontrati in uova provenienti da alcuni allevamenti familiari o in aree fortemente contaminate (Allegato C).

Infine, nei 13 campioni analitici di latte raccolti nelle zone ad alta e media intensità, il PFOS è stato quantificato nel 46% dei campioni, il PFOA nel 15% dei campioni, il PFBA nell'8% dei campioni. I tenori medio (in MB) e massimo di PFOS misurati nella zona ad alta intensità sono risultati pari a 0,026 ng/g e 0,070 ng/g, superiori al livello indicativo della Raccomandazione 2022/1431 di 0,020 ng/g. Il tenore massimo di PFOA misurato (nella zona ad alta intensità) è stato di 0,050 ng/g, superiore (insieme a quello di un altro campione nella zona a media intensità) al livello indicativo della Raccomandazione 2022/1431 di 0,010 ng/g.

Nel complesso i dati ottenuti mostrano la presenza di livelli di PFAS superiori a quelli di fondo soprattutto nelle zone ad alta e media intensità, con la presenza di valori elevati in siti specifici, distribuiti in massima parte in tali due zone. I composti con le concentrazioni più elevate nelle matrici alimentari oggetto di studio sono il PFOA, la molecola più abbondante nelle acque, e il PFOS, il composto generalmente dotato di maggiore potenziale di bioaccumulo negli organismi. Questo è in linea con i dati di letteratura e le valutazioni dell'EFSA che indicano in PFOA e PFOS i composti che contribuiscono in proporzione maggiore all'esposizione ai quattro PFAS ricompresi nel TWI gruppo identificato dall'Autorità (EFSA CONTAM Panel, 2020).

La numerosità dei dati quantificati limita la possibilità di valutare statisticamente l'eventuale associazione fra contaminazione dell'acqua di abbeverata e contaminazione delle matrici alimentari. Associazioni statisticamente significative sono emerse solo per il PFOS nei bovini della zona ad alta intensità. Si ritiene che una rappresentazione visuale delle concentrazioni rilevate nelle matrici alimentari rispetto ai corrispondenti tenori nelle acque di abbeverata a livello di singola azienda, incentrate sulle combinazioni molecola–matrice più rilevanti, abbia una valenza descrittiva più efficace e sia più utile in termini operativi per orientare interventi sulle pratiche zootecniche. Tale mappatura è in corso di realizzazione e sarà trasmessa in una fase successiva per non ritardare l'emissione della presente relazione.

Rispetto al piano di monitoraggio condotto nel 2016-2017, questo piano di sorveglianza ha aggiunto la ricerca di cC6O4 e GenX, che tuttavia non sono risultati quantificabili in alcun campione. Per le altre dodici molecole ricercate, un confronto puntuale con i dati ottenuti dal piano di monitoraggio del 2016-2017 non è possibile sia per le differenze di disegno (il presente piano, ad esempio, esclude l'autoconsumo) sia perché i LoQ di quello studio erano da due a dieci volte superiori a quelli raggiunti nel presente piano di sorveglianza. Ciò posto, alcune considerazioni possono essere svolte. I dati del 2016-2017 mostravano che latte e muscolo avicolo e bovino erano le matrici con i livelli di presenza inferiori per PFOA e PFOS, con >95% dei valori nell'intervallo <0,10–0,50 ng/g. I risultati del presente piano mostrano un quadro più rassicurante, con il 100%

dei campioni di latte e muscolo di avicoli aventi concentrazioni $\leq 0,07$ ng/g e $0,05$ ng/g, rispettivamente, per entrambe le molecole. Per il muscolo bovino, la massima concentrazione di PFOA misurata è stata di $0,13$ ng/g mentre per il PFOS 7 campioni (8%) hanno mostrato una concentrazione $>0,20$ ng/g (con un valore massimo pari a $0,69$ ng/g). Per il muscolo suino i dati del 2016-2017 mostravano per il PFOA un valore medio di $0,32$ ng/g e un intervallo di valori pari a $<0,10$ – $3,4$ ng/g, mentre per il PFOS l'intervallo di valori era di $<0,10$ – $0,2$ ng/g con il 95% dei valori $<0,10$ ng/g. I risultati del presente piano mostrano concentrazioni più contenute: per il PFOA il valore medio più elevato (nella zona ad alta intensità) è di $0,30$ ng/g e il valore massimo misurato è di $0,66$ ng/g, mentre per il PFOS il valore massimo misurato è di $0,06$ ng/g. Per il fegato di avicoli i dati del 2016-2017 mostravano per il PFOA un intervallo di valori $<0,10$ – $1,0$ ng/g e per il PFOS un intervallo di valori $<0,10$ – $1,1$ ng/g. I risultati del presente piano mostrano concentrazioni più contenute, per il PFOA sempre $<0,2$ ng/g tranne rare eccezioni nel fegato di broiler (con un valore massimo pari a $0,45$ ng/g) e $\leq 0,16$ ng/g per il PFOS. Per il fegato bovino i dati del 2016-2017 mostravano per il PFOA un intervallo di valori $<0,10$ – $2,0$ ng/g (con il 90% dei campioni $<0,10$ ng/g) e per il PFOS un valore medio di $0,46$ ng/g, con un massimo di $4,6$ ng/g. Nel caso del PFOA, i risultati del presente piano mostrano concentrazioni più contenute e un valore massimo di $0,69$ ng/g; nel caso del PFOS, invece, i valori medi nelle zone ad alta e media intensità sono più elevati ($1,59$ – $1,65$ ng/g), così come il valore massimo misurato ($12,50$ ng/g). Per il fegato suino i dati del 2016-2017 mostravano per il PFOA un valore medio di $2,93$ ng/g e un intervallo di valori $<0,10$ – 41 ng/g, mentre per il PFOS il valore medio era di $3,02$ ng/g e l'intervallo di valori $<0,10$ – 39 ng/g. I risultati del presente piano mostrano concentrazioni inferiori, sebbene ancora marcatamente elevate: per il PFOA il valore medio più elevato (nella zona ad alta intensità) è di $2,08$ ng/g e il valore massimo misurato è di $4,80$ ng/g, mentre per il PFOS il valore medio più elevato (nella zona ad alta intensità) è di $2,73$ ng/g e il valore massimo misurato è di $8,40$ ng/g. Infine, relativamente alle uova, i dati del 2016-2017 mostravano per il PFOA un intervallo di valori $<0,10$ – 22 ng/g (fortemente influenzato dagli allevamenti familiari, che mostravano un valore medio elevato pari a $0,89$ ng/g) e per il PFOS un intervallo di valori $<0,10$ – 12 ng/g (fortemente influenzato dagli allevamenti familiari, che mostravano un valore medio elevato pari a $1,32$ ng/g). I risultati del presente piano mostrano concentrazioni estremamente inferiori: per il PFOA il valore medio più elevato (nella zona a media intensità) è di $0,16$ ng/g e il valore massimo misurato è di $0,29$ ng/g, mentre per il PFOS il valore medio più elevato (nella zona a media intensità) è di $0,20$ ng/g e il valore massimo misurato è di $0,49$ ng/g (nella zona ad alta intensità). Questi dati hanno particolare rilevanza in quanto le uova e i prodotti derivati hanno un impatto importante sull'esposizione combinata a PFOA, PFOS, PFNA e PFHxS (EFSA CONTAM Panel, 2020).

5. Conclusioni

Il piano di sorveglianza ha avuto l'obiettivo di caratterizzare le produzioni animali destinate al consumo generale e quindi finalizzate all'immissione sul mercato¹⁵ e ha coinvolto 156 aziende selezionate sulla base delle produzioni esistenti in tre zone di interesse ricadenti nelle *Aree rossa e arancione*, classificate come ad *alta, media e bassa intensità*. In esse sono stati prelevati campioni di muscolo e fegato di (i) bovini, (ii) suini, (iii) avicoli, (iv) uova e (v) latte. Il disegno di studio ha previsto il campionamento della totalità delle aziende che producono le otto matrici alimentari oggetto di studio nella zona ad alta intensità, mentre nelle zone a media e bassa intensità la proporzione è stata del 50% e del 10% delle aziende con produzioni pertinenti, rispettivamente, salvo nel caso della produzione di uova e latte, per la quale è stato effettuato il campionamento nella totalità delle aziende presenti. Questo ha portato al campionamento di prodotti da 38 aziende nella zona ad alta intensità, 57 in quella a media intensità e 61 in quella a bassa intensità. In ciascun sito è stato prelevato un numero di campioni elementari determinato dalla consistenza aziendale che è stato poi combinato in un singolo campione analitico per sito. Complessivamente sono stati prelevati 703 campioni elementari, che sono stati combinati in 347 campioni analitici.

I dati ottenuti mostrano la presenza di livelli di PFAS superiori a quelli di fondo¹⁶ soprattutto nelle zone ad alta e media intensità, con il riscontro di valori elevati in specifici siti, distribuiti in massima parte in tali due zone.¹⁷ Alcuni di questi valori elevati sono risultati essere numericamente superiori ai tenori massimi vigenti.¹⁸ Le concentrazioni di PFOS e PFOA seguono il gradiente della contaminazione delle acque, suggerendo che l'uso di acque di abbeverata con livelli delle due molecole superiori a quelli di fondo – e in particolare di acque ottenute da impianti autonomi e francamente contaminate – sia il fattore preponderante nel determinare la contaminazione dei prodotti di origine animale oggetto del presente piano. Tuttavia, un'associazione statisticamente significativa fra le concentrazioni negli alimenti e quelle nelle acque di abbeverata è stata ottenuta solo nella zona ad alta densità per il PFOS nel muscolo e nel

¹⁵ Le produzioni familiari indirizzate all'autoconsumo sono state escluse dal disegno dello studio.

¹⁶ Per l'identificazione dei livelli di fondo si rimanda alla 'Discussione' (v. in particolare le prime due colonne della Tabella 24 e l'allegato C).

¹⁷ Considerando le 4 molecole centrali (PFOA, PFOS, PFNA e PFHxS), nelle acque di abbeveraggio il numero di campioni con tenori 10 volte superiori ai MB nella zona a bassa intensità riportati in Tabella 5 sono 11/58 (19%) per PFOA e 3/58 (5%) per PFOS nella zona a media intensità e 15/41 (37%) per PFOA e 3/41 (7%) per PFOS nella zona ad alta intensità. In relazione al latte bovino, 3 campioni prelevati nella zona ad alta ($n=2$) e media ($n=1$) intensità hanno superato il LI (v. Tabella 24) per il PFOS, mentre 3 (su 7) campioni prelevati in zona ad alta intensità hanno mostrato valori pari al LI. Per il PFOA, 2/13 (15%) hanno superato il LI, uno in zona a media (0,04 ng/g) e uno in zona ad alta intensità (0,050 ng/g).

¹⁸ Di seguito il dettaglio. PFOS in muscolo di bovino: 5/83 (6%); di questi 5 campioni, 2 sono stati campionati in zona ad alta intensità (0,31-0,37 ng/g) e 3 in zona a media intensità (0,55-0,69 ng/g). PFOS nel fegato di bovino: 3/82 (4%), tutti prelevati nella zona a media intensità (9,8-12,5 ng/g). PFOS nel fegato di suino: 1/18 (6%), campione prelevato nella zona di alta intensità (8,4 ng/g). PFOA nel fegato di suino: 9/18 (50%); 8 (con range di concentrazioni 0,73-4,8 ng/g) appartengono all'area ad alta intensità e uno alla zona a media intensità (1,19 ng/g). PFOA nelle uova: nessun superamento ma in due campioni (su 18), uno in zona ad alta e uno in zona a media intensità, il PFOA è stato quantificato con concentrazioni pari a 0,29 ng/g (vale a dire vicine al LM, v. Tabella 24). PFOA nel fegato di bovino: nessun superamento, ma 1 campione su 82 prelevato nella zona a media intensità ha mostrato una concentrazione pari a 0,69 ng/g, appena al di sotto il LM (v. Tabella 24). Nessun superamento dei LM è stato riscontrato per PFNA e PFHxS.

fegato bovino. Il caso, discusso nel dettaglio, di un'azienda di allevamento di bovini nella quale l'impiego di acqua di pozzo con livelli elevati di PFOS ha determinato tenori di questo composto superiori ai limiti legali per muscolo e fegato (e per questa ragione è stata sottoposta a follow-up) è esemplificativo. Per meglio indagare l'associazione fra i livelli di PFAS nell'acqua di abbeveraggio e nelle matrici alimentari è in corso un'elaborazione di dettaglio consistente in una mappatura a livello di singola azienda.

In riferimento alle altre molecole, il PFNA e PFHxS (gli altri due composti ricompresi nel TWI di gruppo identificato dall'EFSA) raramente raggiungono concentrazioni quantificabili e per lo più in matrici (fegato bovino e suino) di minore impatto in termini di consumo. Un'altra molecola quantificata in numerose matrici è il PFBA, che rappresenta un'eccezione ai pattern di contaminazione che vedono le concentrazioni più elevate presentarsi nelle zone ad alta e media intensità: nel muscolo suino, ad esempio, le concentrazioni di PFBA più elevate sono misurate nei campioni della zona a bassa intensità (sebbene numericamente limitati).

In merito a PFOA, PFOS, PFNA e PFHxS, la caratterizzazione del rischio condotta dal Panel CONTAM dell'EFSA ha evidenziato che l'esposizione alimentare di fondo di vasta parte della popolazione generale europea supera il TWI di gruppo e ciò è motivo di preoccupazione (EFSA CONTAM Panel, 2020). Questa conclusione si può ritenere in prima istanza ¹⁹ valida per la popolazione generale del Veneto ed è supportata dai dati di biomonitoraggio umano (Ingelido et al., 2018; Ingelido et al., 2020). Per queste quattro molecole, che contribuiscono maggiormente all'esposizione alimentare di fondo e ai livelli sierici di PFAS, è appropriato considerare che ogni apporto aggiuntivo derivante da livelli di contaminazione degli alimenti superiori a quelli di fondo rappresenta un aumento del rischio per la salute. L'impatto quantitativo in termini espositivi dipende dalla frequenza di consumo e dalla tipologia di alimenti di origine locale consumati.

I prodotti alimentari con valori di concentrazione più elevati nelle zone con livelli superiori a quelli di fondo sono il muscolo bovino per il PFOS, il fegato bovino per il PFOS e il PFDeA (e in misura minore il PFOA), il muscolo suino per PFOA e PFBA, il fegato suino per PFOS, PFOA, PFBA, PFBS, PFHxS e PFDeA, il fegato di broiler per PFOA e PFOS (e in misura minore il PFBA), le uova per PFOS, PFOA e PFBA. I valori di concentrazione più elevati in termini assoluti sono quelli misurati per il PFOS nel fegato bovino e per il PFOS e il PFOA nel fegato suino. In relazione a quest'ultima matrice sono in corso approfondimenti interpretativi degli andamenti osservati, basati su una ricerca mirata nella letteratura scientifica. La presenza simultanea di valori elevati di numerosi PFAS consiglia un follow-up del presente piano dedicato a questa matrice. In termini di sicurezza alimentare, sempre in riferimento al fegato suino, in caso di adozione di misure di precauzione da parte dell'Autorità regionale questo l'Istituto resta disponibile per il supporto scientifico all'identificazione di criteri di selezione.

Il confronto con i risultati del piano di monitoraggio condotto nel 2016-2017 deve tenere conto delle importanti differenze sia di disegno (il presente studio, ad esempio, esclude l'autoconsumo) sia attinenti alla maggiore sensibilità dei metodi analitici utilizzati nel presente piano di sorveglianza, con il raggiungimento di LoQ 2-10 volte inferiori. La maggiore sensibilità analitica

¹⁹ Cioè nelle more dell'ottenimento di stime più mirate dell'esposizione alimentare per la popolazione di riferimento. In particolare, il "Piano di monitoraggio regionale" contribuirà a questo obiettivo, come indicato nell'Introduzione.

ha consentito l'ottenimento di un quadro molto più nitido dell'effettivo grado di contaminazione delle matrici alimentari studiate, aumentando sensibilmente il numero dei risultati superiori alle soglie di rilevabilità analitica. Il quadro più nitido ottenuto attraverso il presente piano ha restituito una panoramica di generalizzata riduzione sia dei valori medi sia dei valori estremi misurati nel precedente piano per PFOA e PFOS, con la sola eccezione del PFOS nel fegato bovino.

La discussione dettagliata dei risultati ottenuti in relazione ai diversi riferimenti quantitativi presi in esame e ai dati di letteratura (v. sezione 4) offre indicazioni puntuali che possono orientare interventi specifici finalizzati a favorire pratiche produttive che minimizzino i livelli di presenza dei PFAS negli alimenti con profili di contaminazione meritevoli di attenzione. Tuttavia, la compiuta definizione di tali interventi necessita dell'acquisizione di ulteriori dati attraverso studi e approfondimenti finalizzati a identificare le migliori pratiche zootecniche (oltre all'abbeverata) per minimizzare il trasferimento di PFAS attraverso le filiere. Si ritiene necessario, in particolare, caratterizzare da un lato le coltivazioni utilizzate per l'alimentazione degli animali e dall'altro i mangimi di provenienza commerciale.

I dati acquisiti rappresentano un solido riferimento per la valutazione dell'evoluzione temporale della contaminazione per quanto attiene all'impatto sulle produzioni zootecniche. L'ottenimento dei dati del piano di sorveglianza sulle filiere vegetali, insieme a quelli degli approfondimenti sopra menzionati, aumenterà la leggibilità al quadro complessivo in riferimento alle ricadute di sanità pubblica, nonché sulla salute animale e sull'ambiente.

6. Team di lavoro e ringraziamenti

L'attività è stata svolta da esperti del Gruppo di lavoro di Tossicologia e Valutazione del Rischio operante presso l'Unità Operativa 'Alimentazione, Nutrizione e Salute' diretta dalla Dr.ssa Laura Rossi.

Il team di lavoro ha operato sotto la responsabilità scientifica del Dr. Francesco Cubadda, che ha coordinato le diverse fasi dello studio e la produzione della presente relazione. La Dr.ssa Francesca Iaconi è stata il riferimento per l'invio periodico dei dati dalla Regione del Veneto e ha curato la gestione del database ISS, l'elaborazione dei dati e la loro analisi descrittiva. La Dr.ssa Sofia Favero ha curato la ricerca bibliografica sulle concentrazioni di PFAS negli alimenti e la valutazione dei dati prodotti dal piano di sorveglianza in relazione ai dati di letteratura, inclusa la generazione delle elaborazioni descrittive di confronto.

Si ringraziano sentitamente per la proficua collaborazione i gruppi di lavoro dell'IZSVE (Roberto Angeletti, Nicola Ferrè, Federica Gallochio, Monica Lorenzetto, Antonia Ricci e i collaboratori Alessandra Moressa, Gioele Scopel, Gloria Zonta) e dell'ARPAV (Francesca Zanon e i collaboratori Caterina Cecchinato, Massimiliano Prenzato, Andrea Vantini). Si ringrazia inoltre il gruppo di lavoro dell'Unità organizzativa Sicurezza alimentare presso la Direzione Prevenzione, Sicurezza alimentare e Veterinaria, Area Sanità e Sociale della Regione del Veneto, in particolare la Direttrice Alessandra Amorena e i collaboratori Andrea Massaro e Sara Gastaldello per l'efficace cooperazione durante tutte le fasi del piano di sorveglianza. Si ringrazia infine il personale delle AULSS territorialmente competenti per l'instancabile attività che ha consentito di portare a compimento il piano di campionamento.

7. Riferimenti bibliografici

- Aßhoff N, Bernsmann T, Esselen M, Stahl T, 2024. A sensitive method for the determination of per- and polyfluoroalkyl substances in food and food contact material using high-performance liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* 1730:465041.
- ANSES, 2011. Second French Total Diet Study (TDS 2) Report 1 Inorganic contaminants, minerals, persistent organic pollutants, mycotoxins and phytoestrogens. <https://www.anses.fr/system/files/PASER2006sa0361Ra1EN.pdf>. Consultato il 5 agosto 2025.
- Bao J, Yu WJ, Liu Y, Wang X, Jin YH, Dong GH, 2019. Perfluoroalkyl substances in groundwater and home-produced vegetables and eggs around a fluorochemical industrial park in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 171:199.
- Barbarossa A, Gazzotti T, Zironi E, Serraino A, Pagliuca G, 2014. Short communication: Monitoring the presence of perfluoroalkyl substances in Italian cow milk. *Journal of Dairy Science* 97:3339.
- Berendsen BJA, Lakraoui F, Leenders L, van Leeuwen SPJ, 2020. The analysis of perfluoroalkyl substances at ppt level in milk and egg using UHPLC-MS/MS. *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment* 37:1707.
- Bonato T, Pal T, Benna C, Di Maria F, 2025. Contamination of the terrestrial food chain by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and related human health risks: A systematic review. *Science of the Total Environment* 961:178337.
- Brambilla G, D'Hollander W, Oliaei F, Stahl T, Weber R, 2015. Pathways and factors for food safety and food security at PFOS contaminated sites within a problem based learning approach. *Chemosphere* 129:192.
- Chiesa LM, Shih-Kuo L, Ceriani F, Panseri S, Arioli F, 2018. Levels and distribution of PBDEs and PFASs in pork from different European countries. *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment* 35:2414.
- Chiumiento F, Bellocchi M, Ceci R, D'Antonio S, De Benedictis A, Leva M, Pirito L, Rosato R, Scarpone R, Scortichini G, Tammaro G, Diletti G, 2023. A new method for determining PFASs by UHPLC-HRMS (Q-Orbitrap): Application to PFAS analysis of organic and conventional eggs sold in Italy. *Food Chemistry* 401:134135.
- Clarke DB, Bailey VA, Routledge A, Lloyd AS, Hird S, Mortimer DN, Gem M, 2010. Dietary intake estimate for perfluorooctanesulphonic acid (PFOS) and other perfluorocompounds (PFCs) in UK retail foods following determination using standard addition LC-MS/MS. *Food Additives and Contaminants - Part A* 27:530.
- Cornelis C, D'Hollander W, Roosens L, Covaci A, Smolders R, Van Den Heuvel R, Govarts E, Van Campenhout K, Reynders H, Bervoets L, 2012. First assessment of population exposure to perfluorinated compounds in Flanders, Belgium. *Chemosphere* 86:308.
- D'Hollander W, de Voogt P, Bervoets L, 2011. Accumulation of perfluorinated chemicals in Belgian home-produced chicken eggs. *Organohalogen Compounds* 73:917.

- Death C, Bell C, Champness D, Milne C, Reichman S, Hagen T, 2021. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in livestock and game species: A review. *Science of the Total Environment* 774:144795.
- Domingo JL, Jogsten IE, Eriksson U, Martorell I, Perelló G, Nadal M, Van Bavel B, 2012. Human dietary exposure to perfluoroalkyl substances in Catalonia, Spain. Temporal trend. *Food Chemistry* 135:1575.
- Domingo JL, Nadal M, 2017. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in food and human dietary intake: A review of the recent scientific literature. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 65:533.
- EEA (European Environment Agency), 2019. Emerging chemical risks in Europe — ‘PFAS’. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emerging-chemical-risks-in-europe>. Consultato il 7 settembre 2025.
- Eriksson U, Kärman A, Rotander A, Mikkelsen B, Dam M, 2013. Perfluoroalkyl substances (PFASs) in food and water from Faroe Islands. *Environmental Science and Pollution Research* 20:7940.
- EFSA CONTAM Panel, 2020. Scientific opinion on the risk for human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA Journal* 18(9):6223.
- EFSA, 2010. Management of left-censored data in dietary exposure assessment of chemical substances. *EFSA Journal* 8(3):1557.
- Fiedler H, Sadia M, Baabish A, Sobhane S, 2022. Perfluoroalkane substances in national samples from global monitoring plan projects (2017–2019). *Chemosphere* 307:136038.
- FDA, 2021. Analytical results for PFAS in 2021 total diet study sampling (Parts Per Trillion)-Dataset 3. <https://www.fda.gov/media/150338/download?attachment>. Consultato il 3 Novembre 2025.
- FDA, 2022. Analytical results for PFAS in 2021 total diet study sampling (Parts Per Trillion)-Dataset 5. <https://www.fda.gov/media/156351/download?attachment>. Consultato il 3 Novembre 2025.
- FDA, 2023. Analytical results for PFAS in 2021 total diet study sampling (Parts Per Trillion)-Dataset 6. <https://www.fda.gov/media/168447/download?attachment>. Consultato il 3 Novembre 2025.
- FDA, 2023. Analytical results for PFAS in 2021 total diet study sampling (Parts Per Trillion)-Dataset 7. <https://www.fda.gov/media/168448/download?attachment>. Consultato il 3 Novembre 2025.
- FDA, 2024. Analytical results for PFAS in 2021 total diet study sampling (Parts Per Trillion)-Dataset 8. <https://www.fda.gov/media/177831/download?attachment>. Consultato il 3 Novembre 2025.
- FERA, 2012. Organic environmental contaminants in the 2012 total diet study samples. <https://www.food.gov.uk/sites/default/files/media/document/research-report-total-diet-study.pdf>. Consultato il 5 Agosto 2025.
- FSANZ, 2021. 27th Australian total diet study. <https://www.foodstandards.gov.au/sites/default/files/2023-11/27th-ATDS.pdf>. Consultato il 5 Agosto 2025.
- Gazzotti T, Sirri F, Ghelli E, Zironi E, Zampiga M, Pagliuca G, 2021. Perfluoroalkyl contaminants in eggs from backyard chickens reared in Italy. *Food Chemistry* 362:130178.
- Ghelli E, Tondo MT, Zironi E, Pagliuca G, Sirri F, Gazzotti T, 2019. Preliminary monitoring of the presence of perfluoroalkyl substances in Italian eggs from different breeding systems. *Italian Journal of Food Safety* 8:7702.

- Guerranti C, Perra G, Corsolini S, Focardi SE, 2013. Pilot study on levels of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) in selected foodstuffs and human milk from Italy. *Food Chemistry* 140:197.
- Haug LS, Salihovic S, Jogsten IE, Thomsen C, van Bavel B, Lindström G, Becher G, 2010. Levels in food and beverages and daily intake of perfluorinated compounds in Norway. *Chemosphere* 80:1137.
- Hlouskova V, Hradkova P, Poustka J, Brambilla G, De Filippis SP, D'Hollander W, Bervoets L, Herzke D, Huber S, de Voogt P, Pulkrabova J, 2013. Occurrence of perfluoroalkyl substances (PFASs) in various food items of animal origin collected in four European countries. *Food Additives and Contaminants - Part A* 30:1918.
- Iacoponi F, Cubadda F, 2021. Contaminazione da sostanze perfluoroalchiliche in Veneto: valutazione dell'esposizione alimentare e caratterizzazione del rischio. In: *Contributi del Dipartimento di Sicurezza alimentare, nutrizione e sanità pubblica veterinaria per un approccio One Health* (a cura di U. Agrimi, V. Patriarca, I. Purificato). *Rapporti ISTISAN* 21/11, 40-46.
- Ingelido AM, Abballe A, Gemma S, Dellatte E, Iacovella N, De Angelis G, Zampaglioni F, Marra V, Miniero R, Valentini S, Russo F, Vazzoler M, Testai E, De Felip E, 2018. Biomonitoring of perfluorinated compounds in adults exposed to contaminated drinking water in the Veneto Region, Italy. *Environment International* 110:149.
- Ingelido AM, Abballe A, Gemma S, Dellatte E, Iacovella N, De Angelis G, Marra V, Russo F, Vazzoler M, Testai E, De Felip E, 2020. Serum concentrations of perfluorinated alkyl substances in farmers living in areas affected by water contamination in the Veneto Region (Northern Italy). *Environment International* 136:105435.
- Istituto Superiore di Sanità, Dipartimento di Sicurezza Alimentare, Nutrizione e Sanità Pubblica Veterinaria, 2019. Contaminazione da sostanze perfluoroalchiliche in Veneto: valutazione dell'esposizione alimentare e caratterizzazione del rischio - Relazione finale. 58 pp. (trasmesso alla 'Direzione Prevenzione, Sicurezza Alimentare, Veterinaria' della Regione del Veneto il 24/06/2019, Prot. 19240_PRE16).
- Johansson JH, Berger U, Vestergren R, Cousins IT, Bignert A, Glynn A, Darnerud PO, 2014. Temporal trends (1999-2010) of perfluoroalkyl acids in commonly consumed food items. *Environmental Pollution* 188:102.
- Kedikoglou K, Costopoulou D, Vassiliadou I, Leondiadis L, 2019. Preliminary assessment of general population exposure to perfluoroalkyl substances through diet in Greece. *Environmental Research* 177:108617.
- Kowalczyk J, Ehlers S, Oberhausen A, Tischer M, Fürst P, Schafft H, Lahrssen-Wiederholt M, 2013. Absorption, distribution, and milk secretion of the perfluoroalkyl acids PFBS, PFHxS, PFOS, and PFOA by dairy cows fed naturally contaminated feed. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61:2903.
- Kowalczyk J, Göckener B, Eichhorn M, Kotthoff M, Bücking M, Schafft H, Lahrssen-Wiederholt M, Numata J, 2020. Transfer of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from feed into the eggs of laying hens. Part 2: Toxicokinetic results including the role of precursors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 68:12539.

- Krippner J, Falk S, Brunn H, Georgii S, Schubert S, Stahl T, 2015. Accumulation potentials of perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCAs) and perfluoroalkyl sulfonic acids (PFSA) in maize (*Zea mays*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63:3646.
- Kwiatkowski CF, Andrews DQ, Birnbaum LS, Bruton TA, Dewitt JC, Knappe DRU, Maffini MV, Miller MF, Pelch KE, Reade A, Soehl A, Trier X, Venier M, Wagner CC, Wang Z, Blum A, 2020. Scientific basis for managing PFAS as a chemical class. *Environmental Science and Technology Letters* 7:532.
- Lasters R, Groffen T, Eens M, Bervoets L, 2024. Dynamic spatiotemporal changes of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in soil and eggs of private gardens at different distances from a fluorochemical plant. *Environmental Pollution* 346:123613.
- Lasters R, Groffen T, Eens M, Coertjens D, Gebbink WA, Hofman J, Bervoets L, 2022. Home-produced eggs: An important human exposure pathway of perfluoroalkylated substances (PFAS). *Chemosphere* 308:136283.
- Liu Y, Zhang Q, Li Y, Hao Y, Li J, Zhang L, Wang P, Yin Y, Zhang S, Li T, Wang Y, Dong S, Wei S, Zhang W, Su X, Li X, 2022. Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in raw milk and feed from nine Chinese provinces and human exposure risk assessment. *Chemosphere* 300:134521.
- Mesfin Tefera Y, Gaskin S, Mitchell K, Springer D, Mills S, Pisaniello D, 2022. Food grown on fire stations as a potential pathway for firefighters' exposure to per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS). *Environment International* 168:107455.
- Mikolajczyk S, Pajurek M, Warenik-Bany M, 2022. Perfluoroalkyl substances in hen eggs from different types of husbandry. *Chemosphere* 303:134950.
- Mikolajczyk S, Warenik-Bany M, Pajurek M, 2023. Occurrence of perfluoroalkyl substances in cow's, goat's and sheep's milk – dietary intake and risk assessment. *Journal of Veterinary Research (Poland)* 67:593.
- Mikolajczyk S, Warenik-Bany M, Pajurek M, 2024. Chickens' eggs and the livers of farm animals as sources of perfluoroalkyl substances. *Journal of Veterinary Research (Poland)* 68:241.
- Mikolajczyk S, Warenik-Bany M, Pajurek M, Marchand P, 2024. Perfluoroalkyl substances in the meat of Polish farm animals and game – Occurrence, profiles and dietary intake. *Science of the Total Environment* 945:174071.
- Nederlof R, Vrijenhoek NG, Boon PE, 2025. Risk assessment of PFAS through consumption of home-produced eggs in the Netherlands. *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)*. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2025-0011.pdf>. Consultato il 30 ottobre 2025.
- Nobile M, Arioli F, Curci D, Ancillotti C, Scanavini G, Chiesa LM, Panzeri S, 2023. Incidence of perfluoroalkyl substances in commercial eggs and their impact on consumer's safety. *Foods* 12:3846.
- Nobile M, Panzeri S, Curci D, Chiesa LM, Ghidini S, Arioli F, 2024. Prevalence of perfluoroalkyl substances in paired batches of precooked and canned bovine meat and their implication on consumer safety. *Food and Chemical Toxicology* 192:114910.
- Noorlander CW, Van Leeuwen SPJ, Te Biesebeek JD, Mengelers MJB, Zeilmaker MJ, 2011. Levels of perfluorinated compounds in food and dietary intake of PFOS and PFOA in the Netherlands. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59:7496.

- Numata J, Kowalczyk J, Adolphs J, Ehlers S, Schafft H, Fuerst P, Müller-Graf C, Lahrssen-Wiederholt M, Greiner M, 2014. Toxicokinetics of seven perfluoroalkyl sulfonic and carboxylic acids in pigs fed a contaminated diet. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 62:6861.
- Pasecnaja E, Zacs D, 2024. Determination of Perfluorinated Substances (PFAS) Using LC-ORBITRAP-MS in certain foodstuffs of animal origin according to newly established EU legislation. *Food Analytical Methods* 17:640.
- Petrlik J, Bell L, Beeler B, Møller M, Jopkova M, Arisandi P, Brabcova K, Carcamo M, Chávez Arce SC, Dizon T, Ismawati Drwiega Y, Kuepouo G, Mng'anya S, Ochieng Ochola G, Skalsky M, 2021. Plastic waste disposal leads to contamination of the food chain. International Pollutants Elimination Network (IPEN). <https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-plastic-waste-contamination-full-en.pdf>. Consultato il 3 Novembre 2025.
- Petrlik J, Ismawati Y, Arisandi P, Bell L, Beeler B, Grechko V, Ozanova S, 2020. Toxic hot spots in Java and persistent organic pollutants (POPs) in eggs. IPEN, Arnika – Toxics and Waste Programme, Nexus3, Ecoton. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35755.21288>. Consultato il 3 Novembre 2025.
- Sadia M, Yeung LWY, Fiedler H, 2020. Trace level analyses of selected perfluoroalkyl acids in food: Method development and data generation. *Environmental Pollution* 263:113721.
- Schechter A, Colacino J, Haffner D, Patel K, Opel M, Pöpke O, Birnbaum L, 2010. Perfluorinated compounds, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticide contamination in composite food samples from Dallas, Texas, USA. *Environmental Health Perspectives* 118:796.
- Schepens MAA, te Biesebeek JD, Hartmann J, van der Aa NGFM, Zijlstra R, Boon PE, 2023. Risk assessment of exposure to PFAS through food and drinking water in the Netherlands. Rijksoverheid voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2023-0011.pdf>. Consultato il 5 agosto 2025.
- Scher DP, Kelly JE, Huset CA, Barry KM, Hoffbeck RW, Yingling VL, Messing RB, 2018. Occurrence of perfluoroalkyl substances (PFAS) in garden produce at homes with a history of PFAS-contaminated drinking water. *Chemosphere* 196:548.
- Still M, Schlummer M, Gruber L, Fiedler D, Wolz G, 2013. Impact of industrial production and packaging processes on the concentration of per- and polyfluorinated compounds in milk and dairy products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61:9052.
- Su H, Shi Y, Lu Y, Wang P, Zhang M, Sweetman A, Jones K, Johnson A, 2017. Home produced eggs: An important pathway of human exposure to perfluorobutanoic acid (PFBA) and perfluorooctanoic acid (PFOA) around a fluorochemical industrial park in China. *Environment International* 101:1.
- Surma M, Sznajder-Katarzyńska K, Wiczkowski W, Piskula M, Zieliński H, 2023. Detection of per- and polyfluoroalkyl substances in high-protein food products. *Environmental Toxicology and Chemistry* 42:2589.
- Sznajder-Katarzyńska K, Surma M, Wiczkowski W, Cieślik E, 2019. The perfluoroalkyl substance (PFAS) contamination level in milk and milk products in Poland. *International Dairy Journal* 96:73.
- Ullah S, Alsberg T, Vestergren R, Berger U, 2012. Determination of perfluoroalkyl carboxylic, sulfonic, and phosphonic acids in food. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 404:2193.

- Van Asselt ED, Kowalczyk J, van Eijkeren JCH, Zeilmaker MJ, Ehlers S, Fürst P, Lahrssen-Wiederholt M, van der Fels-Klerx HJ, 2013. Transfer of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) from contaminated feed to dairy milk. *Food Chemistry* 141:1489.
- Vestergren R, Berger U, Glynn A, Cousins IT, 2012. Dietary exposure to perfluoroalkyl acids for the Swedish population in 1999, 2005 and 2010. *Environment International* 49:120.
- Wang F, Zhao C, Gao Y, Fu J, Gao K, Lv K, Wang K, Yue H, Lan X, Liang Y, Wang Y, Jiang G, 2019. Protein-specific distribution patterns of perfluoroalkyl acids in egg yolk and albumen samples around a fluorochemical facility. *Science of the Total Environment* 650:2697.
- Wang G, Lu J, Li S, Liu Z, Chang H, Xie C, 2018. Pollution levels and risk assessment of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in beef muscle and liver from southern Xinjiang. *Environmental Science and Pollution Research* 25:25486.
- Wang G, Lu J, Xing Z, Li S, Liu Z, Tong Y, 2017. Occurrence, distribution, and risk assessment of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in muscle and liver of cattle in Xinjiang, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14:970.
- Wang JM, Shi YL, Pan YY, Cai YQ, 2010a. Perfluorinated compounds in milk, milk powder and yoghurt purchased from markets in China. *Chinese Science Bulletin* 55:1020.
- Wang JM, Shi YL, Pan YY, Cai YQ, 2010b. Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and other fluorochemicals in viscera and muscle of farmed pigs and chickens in Beijing, China. *Chinese Science Bulletin* 55:3550.
- Wang X, Zhang H, Zhao H, Li J, 2022. Spatiotemporal distribution of perfluoroalkyl acid in Chinese eggs. *Food Additives and Contaminants: Part B Surveillance* 15:142.
- Wang X, Zhang Q, Zhao Z, Song W, Cheng L, Yang J, Chen S, Guan S, Song W, Rao Q, Zhao Z, 2021. A multi-plug filtration (m-PFC) cleanup method based on carboxylic multi-walled carbon nanotubes for the detection of 14 perfluorinated compounds and dietary risk assessment of chicken, beef, and mutton collected from Shanghai markets. *Food Control* 130:108330.
- Wang Y, Gao X, Liu J, Lyu B, Li J, Zhao Y, Wu Y, 2022. Exposure to emerging and legacy polyfluoroalkyl substances in the sixth total diet study - China, 2016-2019. *China CDC Weekly* 4:168.
- Wilson TB, Stevenson G, Crough R, de Araujo J, Fernando N, Anwar A, Scott T, Quinteros JA, Scott PC, Archer MJG, 2021. Evaluation of residues in hen eggs after exposure of laying hens to water containing per- and polyfluoroalkyl substances. *Environmental Toxicology and Chemistry* 40:735.
- Xiao K, Li X, Xu N, Wang X, Hao L, Bao H, Zhang L, Shi Y, Cai Y, 2024. Carry-over rate of per- and polyfluoroalkyl substances to raw milk and human exposure risks in different regions of China. *Science of the Total Environment* 944:173902.
- Xing Z, Lu J, Liu Z, Li S, Wang G, Wang X, 2016. Occurrence of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in milk and yogurt and their risk assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13:1037.
- Young WM, South P, Begley TH, Diachenko GW, Noonan GO, 2012. Determination of perfluorochemicals in cow's milk using liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60:1652.
- Yu Y, Xu D, Lu M, Zhou S, Peng T, Yue Z, Zhou Y, 2015. QuEChERs combined with online interference trapping LC-MS/MS method for the simultaneous determination of 20

polyfluoroalkane substances in dietary milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63:4087.

Zafeiraki E, Costopoulou D, Vassiliadou I, Leondiadis L, Dassenakis E, Hoogenboom RLAP, van Leeuwen SPJ, 2016. Perfluoroalkylated substances (PFASs) in home and commercially produced chicken eggs from the Netherlands and Greece. *Chemosphere* 144:2106.

Zafeiraki E, Vassiliadou I, Costopoulou D, Leondiadis L, Schafft, HA, Hoogenboom RLAP, van Leeuwen SPJ, 2016. Perfluoroalkylated substances in edible livers of farm animals, including depuration behaviour in young sheep fed with contaminated grass. *Chemosphere* 156:280.

Zhang T, Sun HW, Wu Q, Zhang XZ, Yun SH, Kannan K, 2010. Perfluorochemicals in meat, eggs and indoor dust in China: Assessment of sources and pathways of human exposure to perfluorochemicals. *Environmental Science and Technology* 44:3572.

Allegato A: Piano di sorveglianza di PFAS nei prodotti agroalimentari delle zone rossa e arancione: alimenti di origine animale - Disegno dello studio e piano di campionamento

Il disegno del piano comporta una classificazione *risk-based* delle aziende che insistono sul territorio interessato, sulla base di una elaborazione geostatistica aggiornata dei dati esistenti sulla presenza di PFAS, e identifica una numerosità campionaria per le diverse matrici da analizzare in relazione all'orientamento produttivo delle aziende stesse. Le aziende da controllare in via prioritaria sono identificate in quelle che allevano animali per l'immissione sul mercato di prodotti (es. carne e uova). Sulla base di tale orientamento - integrato da ulteriori indicazioni ricevute dalla Regione del Veneto - **il piano non coinvolge gli allevamenti le cui produzioni sono destinate all'esclusivo autoconsumo.**

La numerosità dei campioni di origine animale prelevati per ogni azienda (indipendentemente dal fatto che il campionamento avvenga in allevamento o al macello) deve essere idonea a garantire una sufficiente rappresentatività delle produzioni dell'azienda per i seguenti motivi:

- i dati di concentrazione sono utilizzati per valutare l'esposizione mediante la combinazione con i dati di consumo dei singoli alimenti; la premessa concettuale di questa valutazione è che i campioni siano rappresentativi delle produzioni dalle quali originano;
- i dati di concentrazione sono inoltre utilizzati per identificare l'effetto delle acque di abbeveraggio sul bioaccumulo di PFAS; la premessa concettuale di questa valutazione è che i campioni (sia quelli di alimenti sia quelli di acque) siano rappresentativi delle produzioni dalle quali originano.

Tuttavia, è necessario mantenere il carico analitico per i laboratori a livelli sostenibili e per questo motivo i campioni della stessa tipologia da ogni singolo insediamento produttivo saranno combinati in un unico campione pool, sebbene questa procedura porti con sé una perdita di informazione sulla variabilità interindividuale. Questa perdita di informazione può essere mitigata conservando aliquote dei campioni originari dalle aziende più estese (e quindi caratterizzate da un numero maggiore di campioni prelevati) prima della combinazione in campione pool. Se ritenuto necessario, set di campioni potranno essere studiati in un secondo momento per acquisire informazioni sulla variabilità fra campioni di uno stesso insediamento produttivo.

Contaminazione dei prodotti alimentari in relazione alle pratiche produttive applicate

Il **primo obiettivo** del piano è quello di ottenere un **quadro aggiornato ed esauriente dell'impatto della contaminazione sulle produzioni agro-zootecniche, acquisendo dati sui livelli di presenza di PFAS nelle matrici alimentari in relazione alle pratiche produttive applicate.** Questo obiettivo comporta la necessità di raccogliere dati relativi alle diverse pratiche agro-zootecniche in uso nelle aziende interessate dal campionamento al fine di esaminare le possibili relazioni con la contaminazione delle matrici alimentari campionate ed analizzate. In particolare, devono essere raccolte informazioni su:

- tempo di permanenza in allevamento
- approvvigionamento idrico per l'abbeveraggio (es. acque sotterranee da pozzi, acquedotto, raccolta di acque meteoriche o di sorgente al pascolo, ecc.)
- tipo di alimentazione (es. foraggi, mangimi, pascolo aree esterne, *free range*).

Un elemento centrale, in questo contesto, è la **caratterizzazione dei livelli di PFAS nell'acqua di abbeveraggio** utilizzata negli insediamenti produttivi. Il campionamento dell'acqua di abbeveraggio presso le aziende zootecniche deve prevedere il prelievo del campione dall'acqua dell'abbeveratoio utilizzato per ciascuna specie produttiva allevata e l'informazione sulla specie di riferimento deve essere preservata al fine di essere disponibile quando il dato di concentrazione sarà determinato e utilizzato nelle elaborazioni

successive. Secondo le indicazioni fornite dalla Regione del Veneto,²⁰ il campionamento di acqua può essere temporalmente disallineato (sebbene prossimo) al campionamento delle matrici alimentari nel medesimo allevamento.

Un altro elemento centrale, sulla base dei riscontri analitici e di altri elementi pertinenti, è l'**identificazione di un novero di aziende da seguire nel tempo per indagini di approfondimento**, con ulteriori e più puntuali campionamenti rivolti a comprendere l'impatto delle pratiche zootecniche sulla contaminazione degli alimenti di origine animale, con particolare riferimento alle matrici impiegate per alimentare gli animali, con campionamenti che riflettano le materie prime impiegate nella loro dinamica stagionale, e a uno studio fine dell'acqua di abbeveraggio, con campionamenti ripetuti da tutte le fonti di approvvigionamento idrico presenti nell'allevamento. Si ritiene che il tempo minimo per questa indagine di follow-up sia di 24 mesi. Questo studio fornirà elementi di valutazione per l'eventuale disegno di uno studio che segue l'evoluzione, per tempi più lunghi, delle variazioni di concentrazione di PFAS nei prodotti rispetto all'acqua utilizzata e alle altre condizioni impiegate della produzione.

Valutazione dell'esposizione alimentare e caratterizzazione del rischio

Il **secondo obiettivo** del piano è quello di ottenere dati sui livelli di presenza dei diversi PFAS (*occurrence data*), in particolare dei quattro per i quali è disponibile il TWI di gruppo, nei diversi alimenti di origine animale prodotti localmente per poter disegnare degli **scenari di esposizione legati al consumo di tali prodotti**. Analoga elaborazione verrà eseguita per il consumo di alimenti vegetali prodotti localmente e per il consumo di acqua potabile all'interno del perimetro delle aree indagate, sia per la fattispecie acqua di rete che per l'acqua da impianti autonomi. I dati di concentrazione verranno combinati con i dati di consumo alimentare, utilizzando i dati dell'indagine più recente sui consumi alimentari nazionali disponibile al momento dell'elaborazione. Nel loro insieme queste elaborazioni forniranno **stime dei livelli espositivi che originano dal consumo di acqua e alimenti provenienti dalle aree a maggiore contaminazione**.

Per la ricostruzione del contributo all'esposizione del resto della dieta si farà invece ricorso ai dati che origineranno dal "Piano di monitoraggio regionale dei PFAS negli alimenti e nei materiali a contatto presenti sul mercato". Solo in caso di non disponibilità di dati di concentrazione per alimenti ritenuti meritevoli di inclusione nelle stime, si procederà all'utilizzo di dati 'europei' raccolti da EFSA in occasione della recente Opinione (1).

I dati sui livelli espositivi legati agli scenari sopra descritti verranno confrontati con l'**esposizione baseline ('di fondo') della popolazione generale**, stimata sulla base dei dati del "Piano di monitoraggio regionale dei PFAS negli alimenti e nei materiali a contatto presenti sul mercato" (sempre integrati dai dati EFSA laddove necessario).

Nel complesso, i passaggi analitici che l'ISS svolgerà saranno i seguenti:

- definizione degli scenari di esposizione
- preparazione dei dati di concentrazione per le stime di esposizione, incluso trattamento dati '*left-censored*'
- combinazione dei dati di concentrazione con i dati di consumo alimentare
- identificazione dei livelli espositivi associati a ciascuno scenario e dei descrittori associati (es. contributo percentuale all'esposizione per matrice alimentare).

In riferimento ai quattro PFAS per i quali è disponibile il TWI di gruppo, si procederà alla **caratterizzazione del rischio per la salute umana** come di seguito indicato:

- confronto fra esposizione stimata e TWI di gruppo per PFOA, PFOS, PFNA e PFHxS (EFSA 2020) per ciascuno scenario di esposizione
- identificazione delle incertezze

²⁰ Nota della Regione del Veneto del 30/12/2021 prot. 609512 su 'Campionamento dell'acqua di abbeverata per la ricerca di PFAS in aziende zootecniche ubicate nell'area rossa ai fini della verifica dell'autocontrollo e nell'ambito del Piano di sorveglianza di cui alla DGR 1494 del 15/10/2019.

- valutazione degli esiti della caratterizzazione del rischio.

Flusso dei dati

I dati seguiranno i seguenti flussi:

- acque per consumo umano: i dati degli esiti analitici in formato elettronico seguiranno il flusso per la matrice acqua già esistente tra la Direzione regionale Prevenzione, sicurezza alimentare, veterinaria e ISS (ARPAV -> Direzione regionale Prevenzione, sicurezza alimentare, veterinaria -> ISS), salvo che i dati dovranno essere indirizzati al riferimento sottoindicato in aggiunta ai riferimenti attualmente utilizzati;
- acque di abbeveraggio e di irrigazione: i dati degli esiti analitici in formato elettronico vengono inviati da ARPAV a ULSS competente sull'azienda/allevamento e contestualmente alla Direzione regionale Prevenzione, Sicurezza Alimentare, Veterinaria. Quest'ultima provvederà all'inoltro al riferimento di ISS sottoindicato. L'AULSS, inoltre, inserisce i dati relativi al campionamento in un format digitale messo a disposizione dalla Direzione regionale;
- alimenti di origine animale: i dati degli esiti analitici in formato elettronico vengono inviati da IZSVE all'AULSS competente sull'azienda/allevamento e contestualmente alla Direzione regionale Prevenzione, Sicurezza alimentare, Veterinaria. Quest'ultima provvederà all'inoltro al riferimento di ISS sottoindicato. I rapporti di prova sono trasmessi da IZSVE ad AULSS e ISS. L'AULSS, inoltre, inserisce i dati relativi al campionamento in un format digitale messo a disposizione dalla Direzione regionale;
- copia dei verbali di campionamento delle matrici analizzate presso IZS viene trasmessa dall'IZS all'ISS; copia dei verbali di campionamento delle matrici analizzate presso ARPAV vengono trasmessi dall'AULSS all'ISS, su richiesta dell'ISS.

Il riferimento unico per la gestione di tutti i dati presso l'ISS, è la dr.ssa Francesca Iacoponi (francesca.iacoponi@iss.it), alla quale dovranno essere indirizzati *periodicamente* (ad es. ogni trimestre) tutti i pacchetti di dati prodotti nel corso di tutti i piani. L'invio dovrà essere completo di tutti i necessari metadati, in formato elettronico (formato *Excel* o *Access*), escludendo qualsiasi attività di data-entry da parte dell'ISS. I riferimenti per l'invio dei dati dalla Regione del Veneto all'ISS sono: la dott.ssa Laura Tagliapietra (laura.tagliapietra@regione.veneto.it) per i dati relativi all'acqua e la dott.ssa Daniela Sandri (daniela.sandri@regione.veneto.it) per i dati relativi alle matrici analizzate diverse dall'acqua.

2.4 Campionamento dei prodotti di origine animale

Il piano prevede il campionamento di *aziende zootecniche (allevamenti)* dalle quali verranno prelevate matrici animali definite con una numerosità campionaria minima prefissata.

Le matrici animali considerate sono:

- carne (muscolo e fegato) di bovini, suini e pollame;
- uova;
- latte di vacca.

Il campionamento verrà effettuato su aziende presenti sul territorio oggetto di studio mediante un criterio di selezione che tiene conto di parametri quali la distribuzione spaziale, l'orientamento produttivo e la consistenza. Il campionamento sarà geo-referenziato e il numero di campioni prelevati terrà conto della vastità/varietà della produzione dell'insediamento.

Nelle aziende individuate verranno raccolte informazioni di dettaglio attraverso il **Verbale di campionamento degli alimenti** ed il **Verbale di campionamento dell'acqua di abbeveraggio** (allegati).

Le aziende che risulteranno essere caratterizzate da livelli di contaminazione più significativi saranno soggette a follow-up durante il secondo anno. Al fine di attuare un'efficace sorveglianza protratta nel tempo, tali aziende potranno essere oggetto di una successiva visita ispettiva, con puntuale studio di tutti i fattori della produzione (con particolare attenzione all'acqua di pozzo, se utilizzata) e delle pratiche zootecniche applicate (ad es. incluso, laddove pertinente, il prelievo di campioni di mais, insilato, o mangime o altra materia prima zootecnica, qualora prodotta in campi ubicati all'interno dell'azienda).

I campioni provenienti da bovini e suini saranno tutti prelevati al macello, assicurando la verifica della provenienza dall'azienda selezionata.

In questa prima fase, non verranno considerate le aziende che producono alimenti destinati esclusivamente all'autoconsumo e/o che non sono necessariamente presenti nella Banca Dati Nazionale dell'Anagrafe Zootecnica (BDN) per obbligo di legge²¹.

Legenda

Azienda zootecnica: unità campionaria da selezionare

Matrice: tipologia di campione intesa come muscolo, fegato, latte, uova

Campione elementare: campione prelevato da esemplari diversi da combinare in pool

Campione analitico: pool di singoli campioni elementari.

Piano di campionamento

Per le *aziende zootecniche*, l'IZSve ha identificato tre zone clusterizzate, riportate in Figura 1, denominate ad "alta intensità" (maggiore densità di aziende vicine tra loro con alti valori di PFAS, ubicate nell' "Area rossa A"), a "media intensità" (estesa più a nord per tener conto dell'inquinamento della falda, e comprendere l'"Area Arancione") e a "bassa intensità" (nel territorio dell'Area rossa A e dell'Area rossa B).

Dati di popolazione

Nelle tre zone individuate sono presenti 651 aziende (estrazione da BDN del 26/08/2021). Di questa popolazione di aziende, nelle tre aree verrà campionato rispettivamente il 100% (totalità delle aziende presenti sul territorio), il 50% e il 10% delle aziende con allevamenti bovini, suini, avicoli e galline ovaiole che producono alimenti (carne, latte e uova) per l'immissione sul mercato (Tabella 1). Il latte verrà campionato da tutte le aziende di bovini ad orientamento produttivo misto e le uova da tutte le aziende presenti sul territorio ove presenti galline ovaiole.

Tabella 1. Matrici da campionare stratificate per zone di intensità

Zone intensità	di	% di aziende da campionare sul totale delle aziende presenti	Numero di aziende presenti	Matrici animali da campionare	Matrici non animali da campionare
Alta intensità		100%	58	Bovini (latte), suini, avicoli, uova	Acqua di abbeveraggio
Media intensità		50%	116	Bovini (latte), suini, avicoli, uova	Acqua di abbeveraggio
Bassa intensità		10%	477	Bovini (latte), suini, avicoli, uova	Acqua di abbeveraggio

Considerata (i) l'importanza delle acque come principale veicolo di contaminazione da PFAS, (ii) il forte contributo del consumo di pesce all'esposizione, (iii) gli alti valori di PFAS rilevati nel corso del precedente piano di monitoraggio in esemplari ittici, il campionamento di prodotti ittici sarebbe di fondamentale importanza qualora insistessero sul territorio insediamenti produttivi. Tuttavia, non essendo presenti allevamenti di acquacoltura, nessun campione di pesce verrà prelevato.

²¹ https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_5.jsp?lingua=italiano&area=sanitaAnimale&menu=tracciabilita.

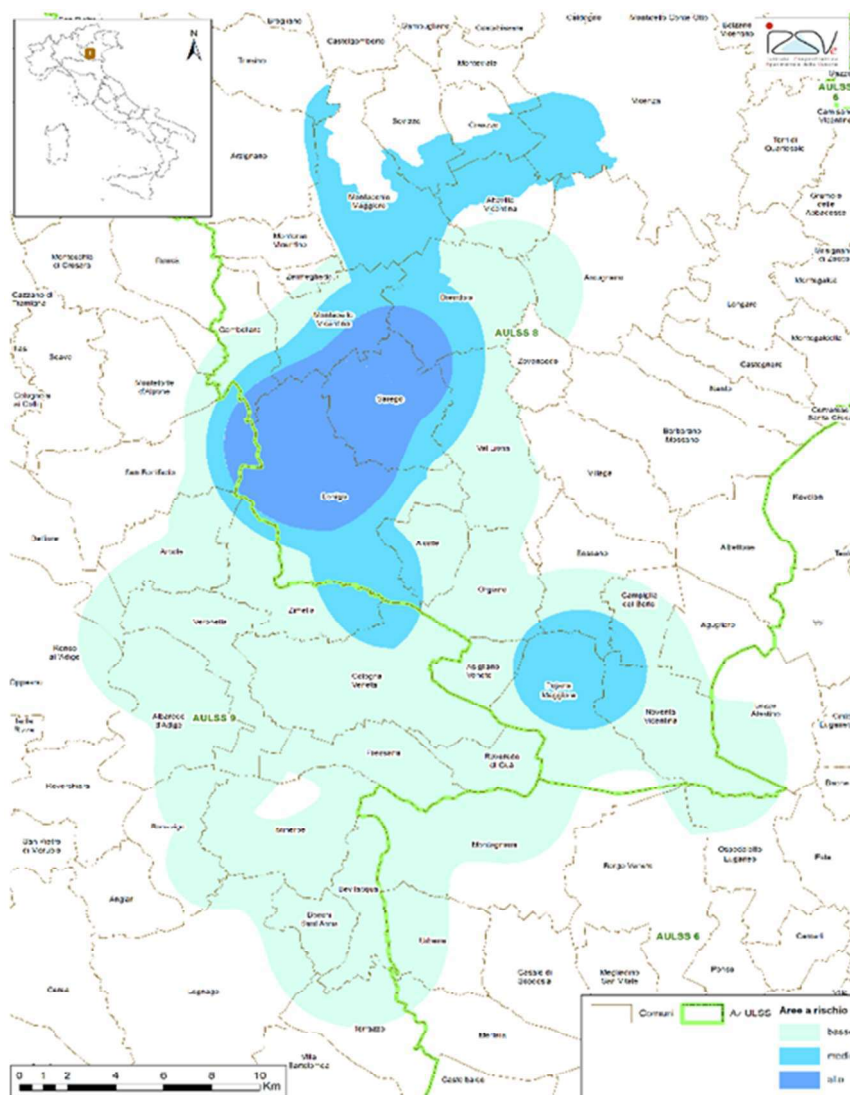


Figura 1. Zone clusterizzate (bassa, media e alta intensità)

Premesso quanto sopra, in Tabella 2 sono state considerate le specie da campionare in maniera rappresentativa delle aziende/allevamenti presenti nelle zone individuate.

Tabella 2. Specie animale da campionare, orientamento produttivo dell'azienda, numero aziende presenti nelle zone

Specie animale	Descrizione allevamenti	Aziende presenti
Bovini	Orientamento da carne e misto	382 (di cui 12 miste)
Suini	Orientamento da ingrasso*	59
Avicoli	Specie Tacchini, broiler e faraone	188
Ovaiole	Uova da consumo	22
Totale		651

*non sono presenti nelle aree oggetto di studio allevamenti da riproduzione a ciclo chiuso

Per la specie BOVINI, vengono considerati solo gli allevamenti che a partire dal 01/01/2019 hanno registrato per almeno un giorno un numero di animali presenti maggiore di 0. In altre parole, non sono inclusi nel conteggio gli allevamenti che pur risultando ancora aperti (quindi con il codice allevamento

ancora attivo), a partire dal 01/01/2019 alla data di estrazione dei dati anagrafici, non hanno avuto in carico alcun bovino.

Le AULSS coinvolte nel campionamento sono tre: la AULSS 6 Euganea, la AULSS 8 Berica, la AULSS 9 Scaligera, nel cui territorio sono rispettivamente presenti 55, 252 e 344 aziende zootecniche (Totale=651).

Campionamento

Per la zona ad alta intensità i campionamenti verranno eseguiti su tutte le 58 aziende presenti (100%); nelle zone a media e bassa intensità è previsto il prelievo di uova presso tutti gli allevamenti produttivi di galline ovaiole.

Il processo di campionamento proposto, per le zone di media e bassa intensità, si basa su elementi sia geografici che di consistenza aziendale, al fine di selezionare rispettivamente il 50% delle aziende della zona a media intensità (per un totale di 58 aziende comprese le 3 aziende di ovaiole che vanno tutte campionate) e il 10% delle aziende della zona a bassa intensità (n. 47 aziende) escluse le 14 aziende di ovaiole che vanno campionate al 100% (totale di 61 aziende da campionare) (v. Tabelle 3 e 4). I campioni sono stati distribuiti in maniera omogenea nelle zone media e bassa, tenendo in considerazione nel contempo le varie densità geografiche con cui si distribuiscono le aziende sul territorio. A tal fine, sono state individuate 3 sub-zone medie (m_1, m_2, m_3) e 3 sub-zone basse (b_1, b_2, b_3). In tabella 3 sono riportate le numerosità per AULSS e specie, per le sei sub-zone e in Figura 2 è presentata la mappa con la distribuzione geografica delle stesse.

Tabella 3. Distribuzione degli allevamenti, per AULSS e specie, nelle 6 sub-zone

AULSS	Alta	Media			Bassa			Totale per AULSS
		m_1	m_2	m_3	b_1	b_2	b_3	
6 - Euganea	0	0	0	0	0	11	44	55
AVICOLI						7	19	26
BOVINI						3	23	26
OVAIOLE								0
SUINI						1	2	3
8 - Berica	56	30	28	37	63	38	0	252
AVICOLI	8	1	7	20	14	9		59
BOVINI	35	18	15	13	31	26		138
OVAIOLE	4	1	2		2			9
SUINI	9	10	4	4	16	3		46
9 - Scaligera	2	0	21	0	89	131	101	344
AVICOLI	1		6		28	36	32	103
BOVINI	1		13		54	88	62	218
OVAIOLE			1		4	4	4	13
SUINI			1		3	3	3	10
Totale per sub zona	58	30	49	37	152	180	145	
Totale per Zona	58			116				477
Totale allevamenti								651

Per ciascuna sub-zona verrà campionato un numero di allevamenti proporzionale al numero di allevamenti presenti nella sub-zona. Le numerosità di campioni per sub-zona sono indicate nella tabella 4.

Tabella 4. Numerosità campionaria per AULSS, specie e sub-zona

AULSS	Alta	Media			Bassa			Totale per AULSS
		m_1	m_2	m_3	b_1	b_2	b_3	
6 - Euganea	0	0	0	0	0	1	4	5
AVICOLI						1	2	3
BOVINI							2	2
OVAIOLE								0
SUINI								0
8 - Berica	56	15	15	18	8	4	0	116
AVICOLI	8		4	10	1	1		24
BOVINI	35	9	7	6	3	3		63
OVAIOLE	4	1	2		2			9
SUINI	9	5	2	2	2			20
9 - Scaligera	2	0	10	0	13	17	14	56
AVICOLI	1		3		3	4	3	14
BOVINI	1		6		6	9	7	29
OVAIOLE			1		4	4	4	13
SUINI								0
Totale per sub zona	58	15	25	18	21	22	18	
Totale per Zona	58			58				61
Totale allevamenti								177

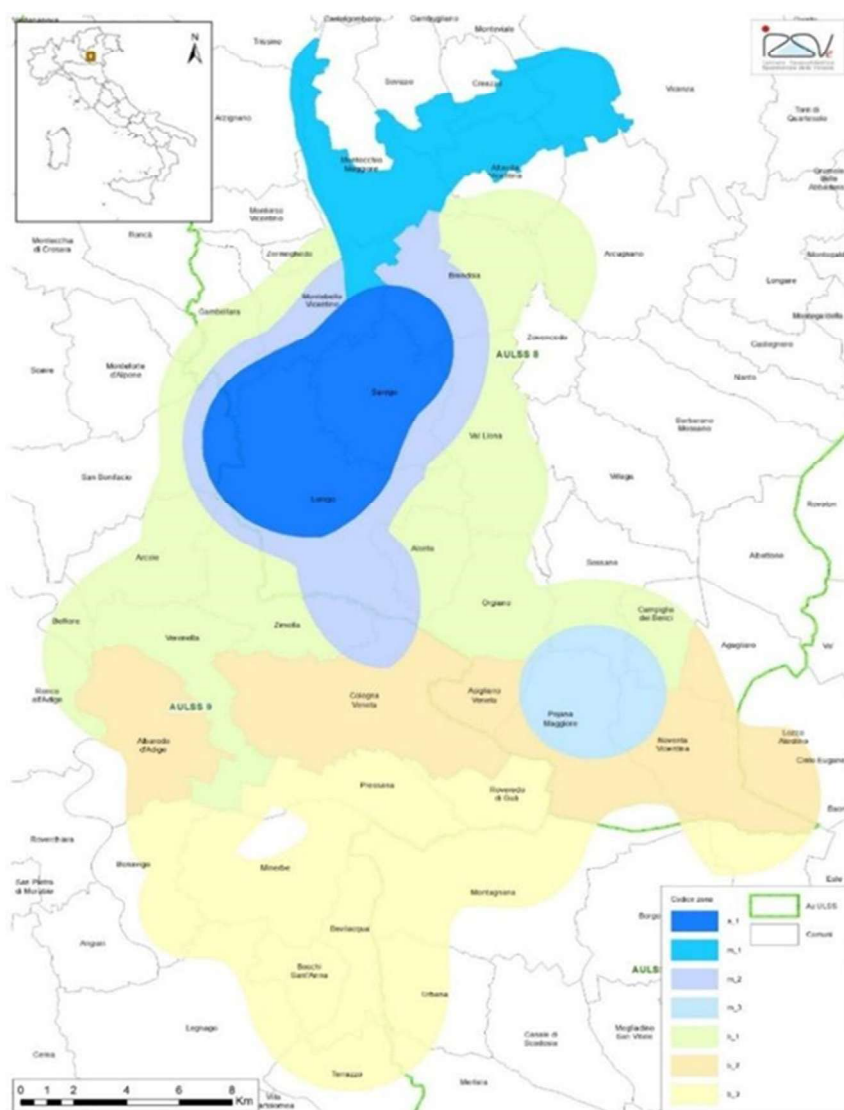


Figura 2. Geolocalizzazione delle sub-zone

Metodo di campionamento delle aziende in zone a media e bassa intensità

Per ciascuna sub-zona delle zone media e bassa intensità verranno estratti due elenchi di allevamenti per mezzo di un “campionamento casuale semplice”. Il primo elenco si riferirà agli allevamenti da campionare, il secondo sarà l’elenco degli allevamenti considerati come riserve. La numerosità delle riserve sarà il doppio del numero di campioni selezionati.

A ciascuna AULSS verrà fornito l’elenco degli allevamenti da campionare e delle riserve, che seguirà le numerosità totali riportate in tabella 4.

Nell’eventualità in cui in un allevamento selezionato vengano allevate più di una specie, verrà campionata la specie suina (se presente), in subordine la specie avicola (se presente), ed in ultima istanza quella bovina. Nel caso in un allevamento avicolo da carne siano presenti più specie avicole, verrà campionata la specie tacchino, in subordine la specie broiler ed in ultima istanza la specie faraona.

Il numero di **campioni elementari** da prelevare in ciascuna unità campionaria selezionata sarà in funzione della dimensione dell’allevamento. Si propone di fissare una numerosità minima di campionamento per le aziende “piccole” di $n=3$ animali, una numerosità $n=5$ per le aziende “medie” e una pari a $n=7$ per le aziende “grandi”. I singoli campioni elementari verranno combinati in un singolo pool indicato quale **campione analitico**.

Per la classificazione delle aziende/allevamenti sulla base delle dimensioni è stata considerata la distribuzione del numero di animali potenzialmente allevabili in ciascun allevamento presente nelle tre province coinvolte nello studio. È stato impiegato il metodo dei “natural breaks”²² per il calcolo delle soglie delle classi.

Tabella 5. Classificazione della dimensione delle aziende sulla base della consistenza numerica per ciascuna specie

SPECIE	Dimensione azienda		
	Piccola	Media	Grande
Faraone>50 a livello anagrafico, il filtro è posto a >50, nella zona oggetto di studio, l’azienda più piccola di faraone ha 100 capi	100 - 14200	14201 - 46000	46001 - 119348
Tacchini>50 a livello anagrafico, il filtro è posto a >50, nella zona oggetto di studio, l’azienda più piccola di tacchini ha 100 capi	100 – 17500	17501 – 36000	36001 – 17700

²² Il Metodo di Natural Breaks del software ArcGIS è descritto nel seguente modo: ‘With natural breaks classification (Jenks), classes are based on natural groupings inherent in the data. Class breaks are created in a way that best groups similar values together and maximizes the differences between classes. The features are divided into classes whose boundaries are set where there are relatively big differences in the data values. Natural breaks are data-specific classifications and not useful for comparing multiple maps built from different underlying information. This classification is based on the Jenks Natural Breaks algorithm. For further information, see Univariate classification schemes in Geospatial Analysis—A Comprehensive Guide, 6th edition; 2007–2018; de Smith, Goodchild, Longley. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>

The Jenks optimization method, also called the Jenks natural breaks classification method, is a data clustering method designed to determine the best arrangement of values into different classes. This is done by seeking to minimize each class's average deviation from the class mean, while maximizing each class's deviation from the means of the other classes. In other words, the method seeks to reduce the variance within classes and maximize the variance between classes.’

Broiler>50 a livello anagrafico, il filtro è posto a >50, nella zona oggetto di studio, l'azienda più piccola di broiler ha 60 capi	60 – 74000	74001 – 385000	385001 – 1000000
Bovini>0	1-499	500-3435	3436-9643
Suini >4	5-1300	1301-5364	5365-14966

La distribuzione delle aziende per dimensione, classificate quindi come di grandi, medie e piccole dimensioni, nelle tre zone individuate è riportata in Tabella 6.

Tabella 6. Distribuzione delle aziende per specie, dimensione e zona di intensità

Specie/aziende campionate	ZONA							Totale aziende
	a_1	m_1	m_2	m_3	b_1	b_2	b_3	
AVICOLI	13	2	16	20	48	56	55	210
grande	2				4	3	2	11
media	1		5	6	10	22	18	62
piccola	6	1	8	14	28	27	31	115
ovaiole	4	1	3		6	4	4	22
BOVINI CARNE-MISTO	36	18	28	13	85	117	85	382
media	1		7	1	12	16	14	51
piccola	35	18	21	12	73	101	71	331
SUINI	9	10	5	4	19	7	5	59
media					1	1	1	3
piccola	9	10	5	4	18	6	4	56
Totale complessivo	58	30	49	37	152	180	145	651

Le matrici da campionare consisteranno in un campione globale in unica aliquota di:

- 12 uova: pool di n. 12 campioni elementari,
- muscolo di bovino o suino: di 0,5 Kg (pool di 3, 5 o 7 campioni elementari)
- fegato di bovino o suino: 0,4 Kg (pool di 3, 5 o 7 campioni elementari)
- muscolo (spellato e disossato) di avicoli: 0,5 kg (pool di 3, 5 o 7 campioni elementari)
- fegato di avicoli: 0,2 kg (pool di 3, 5 o 7 campioni elementari)
- latte: 0,5 l (latte di massa dalla cisterna previa miscelazione).

Gli animali da cui campionare le matrici di muscolo e fegato dovrebbero avere tutti lo stesso tempo di permanenza in azienda per evitare un fattore confondente nella caratterizzazione dei livelli di PFAS.

In conclusione, dei 651 allevamenti zootecnici di bovini, suini, avicoli e ovaiole, presenti nella zona rossa/arancione, ne verranno campionati 177, stratificati per zone di intensità (alta, media, bassa intensità). Per ogni azienda selezionata casualmente dalle 3 zone verranno prelevati 3, 5 o 7 campioni elementari (latte da cisterna o 12 uova) a seconda della consistenza aziendale che andranno a costituire un campione globale da sottoporre ad analisi per ogni matrice. Le numerosità totali dei campioni analitici e quindi afferenti ai laboratori sono riportate in tabella 7.

Tabella 7. Campioni analitici (derivati da pool) per ogni azienda

	Allevamenti presenti	Allevamenti campionati	Matrice campionata	Numerosità campioni analitici per azienda*	Totale campioni analitici
BOVINI	382	94	<i>muscolo e fegato</i>	2	188
SUINI	59	20	<i>muscolo e fegato</i>	2	40
AVICOLI	188	41	<i>muscolo e fegato</i>	2	82
OVAIOLE	22	22	<i>uova</i>	1	22
LATTE (da allevamenti bovini misti)	12	12	<i>latte</i>	1	12
TOTALE	651	177			344

*Il pool che compone ogni campione globale analitico sarà composto da almeno 7 capi (campioni elementari) per le grandi aziende, 5 capi per medie dimensioni e 3 capi per piccole dimensioni; 12 uova andranno a costituire il campione globale analitico (pool di campioni elementari) in allevamenti di ovaiole

In ogni azienda prescelta per il campionamento di matrici di origine animale viene prelevato anche un campione dell'acqua di abbeveraggio da analizzare presso i laboratori di ARPAV.

Dettaglio attività AULSS, Regione del Veneto, IZSve, ISS e intersezioni

Le attività svolte dalle Aziende Sanitarie Locali per il presente piano consistono in:

1. prelievo dei campioni delle matrici indicate relativi alle aziende individuate e compilazione dei verbali di campionamento con le indicazioni previste;
2. recapito dei campioni dell'alimento di origine animale presso la sede dell'IZS di riferimento e dell'acqua di abbeveraggio presso il laboratorio di ARPAV di riferimento;
3. inserimento dei dati relativi ai verbali di campionamento delle matrici sopra considerate nel sistema informativo messo a disposizione dalla Regione del Veneto.

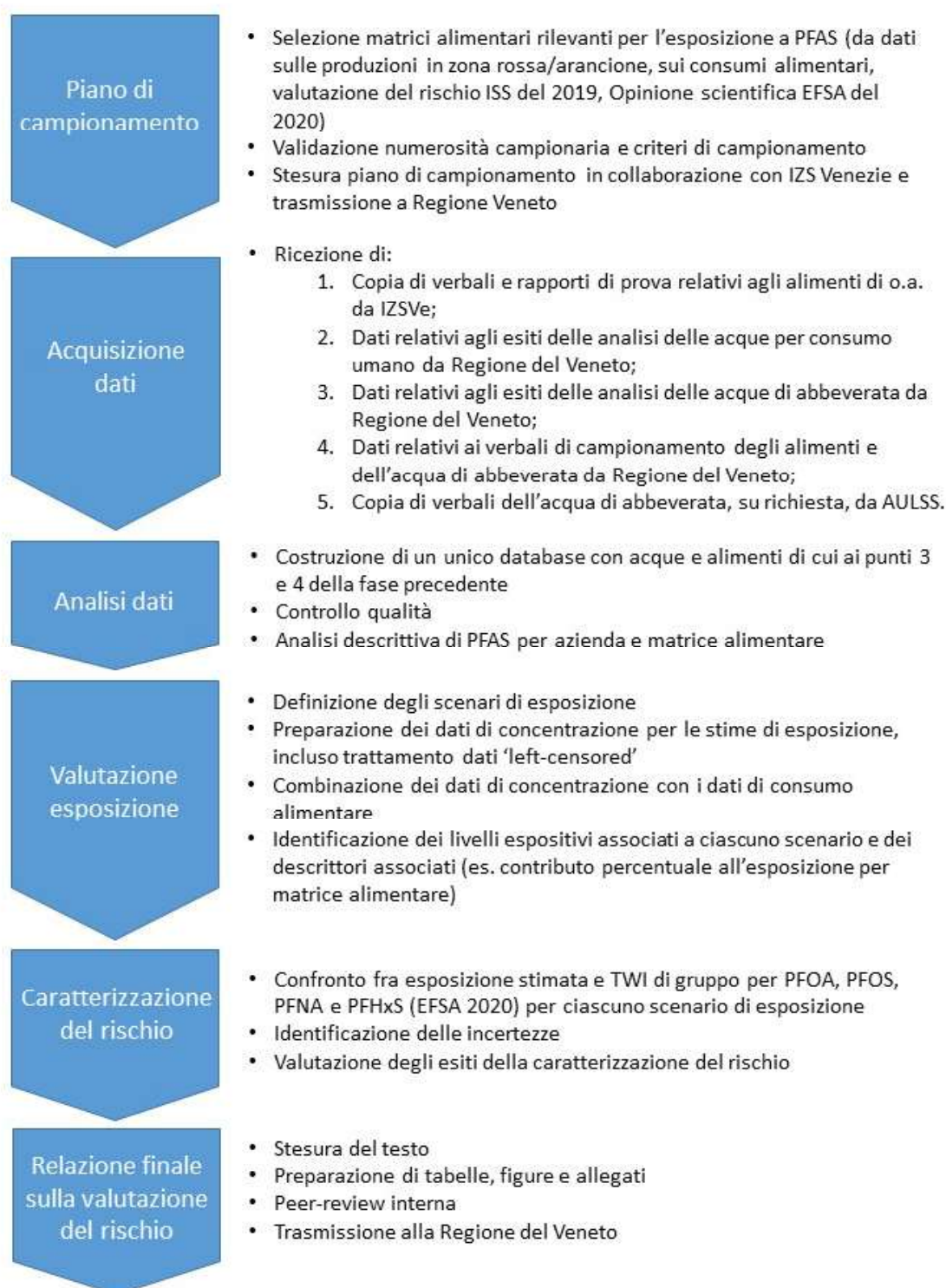
La Direzione regionale Prevenzione, sicurezza alimentare, veterinaria mette a disposizione delle AULSS un sistema informativo per la raccolta dei dati relativi ai verbali di campionamento delle diverse matrici analizzate e trasmetterà periodicamente a ISS tali dati e i dati analitici ricevuti da IZSve e da ARPAV.

Le attività svolte dall'IZSve consistono in:

1. trasmissione dell'elenco degli allevamenti da campionare (oltre alle riserve) alle AULSS interessate;
2. acquisizione del campione ed invio ad ISS della copia del verbale;
3. invio del referto ad AULSS e ISS;
4. invio periodico ad AULSS e alla Direzione regionale Prevenzione, sicurezza alimentare, veterinaria dell'estrazione dei dati relativi ai campioni accettati e processati, con la specifica del numero di verbale e del risultato dell'analisi.

Le attività svolte dall'ISS sono sintetizzate nella Figura 3. Sono indicate in particolare le attività che condurranno alla valutazione dell'esposizione alimentare e alla caratterizzazione del rischio per la salute umana. ISS supporterà la Direzione Prevenzione nella definizione delle eventuali misure di sanità pubblica che dovessero rendersi necessarie per la gestione del rischio. In figura non sono rappresentate le attività connesse allo studio sulla contaminazione dei prodotti alimentari in relazione alle pratiche produttive applicate che saranno parallelamente sviluppate, come indicato nella sezione 2.1.

Figura 3. Attività ISS nel piano di sorveglianza delle matrici di origine animale



Allegato B: Determinazione degli analiti nelle acque di abbeveraggio e negli alimenti

Determinazione di PFAS nelle acque di abbeveraggio mediante LC-MS/MS

Il metodo consente la quantificazione di 24 PFAS in campioni di acque sotterranee, superficiali e acque destinate al consumo umano (Rapporti ISTISAN 2019/7, pag. 151, ISS.CBA.052). La determinazione viene eseguita per iniezione diretta in cromatografia liquida abbinata alla spettrometria di massa Triplo Quadrupolo (strumentazione: HPLC Shimadzu LD-40 X abbinato a un spettrometro MS/MS Sciex 7500) previa aggiunta di opportuni standard interni marcati. La ionizzazione del campione avviene per elettrospray negativa ESI(-) e la rivelazione in modalità Multiple Reaction Monitoring (MRM). La separazione cromatografica avviene su colonna Phenomenex Luna Omega PS C18 (2.1 mm ID × 100 mm, 3 µm), preceduta da una precolonna Xterra MS C18 (2.1 mm ID × 5 mm, 2.6 µm) impiegando come eluente una miscela di metanolo e acqua tamponata con acetato d'ammonio.

La taratura degli analiti copre un intervallo di concentrazione compreso tra 0,1 e 1000 ng/L, modulato in base alle caratteristiche delle molecole target e alla sensibilità analitica richiesta. Per campioni con concentrazioni al di fuori di questo intervallo si procede a diluizione. Ogni sessione analitica include controlli di qualità ad almeno due livelli di concentrazione ed analisi di “bianchi” almeno ogni 50 determinazioni, nonché alla fine di ciascun batch. Le prestazioni del metodo garantiscono un recupero in matrice compreso tra l'80% e il 120%. Il limite di quantificazione (LoQ) è risultato pari a 2-5 ng/L per tutti gli analiti salvo C6O4, per il quale il LoQ è stato di 10-40 ng/L.

Determinazione di PFAS in alimenti di origine animale (latte, muscolo, tessuto epatico e uova) mediante LC-MS/MS

Il metodo consente la quantificazione dei 14 PFAS oggetto del piano di sorveglianza. La determinazione viene eseguita secondo procedura accreditata pdp CHI 290 “Determinazione di sostanze poli e perfluoroalchiliche (PFAS) nel latte, muscolo, tessuto epatico e uova mediante HPLC-MS/MS”. Tale procedura prevede, previa aggiunta di opportuni standard interni marcati (standard surrogati), una fase di estrazione mediante tecnica Quechers (solvente di estrazione acetonitrile; sali di estrazione MgSO₄ g, NaCl 1 g, trisodio citrato diidrogenato 1 g, citrato disodico sesquidrato 0,5 g), e una fase di purificazione mediante dispersive SPE (PSA 150 mg, MgSO₄ 900 mg, C18 EC 150 mg). L'estratto purificato viene analizzato in cromatografia liquida abbinata alla spettrometria di massa Triplo Quadrupolo (strumentazione: HPLC Sciex, Exion LC abbinato a spettrometro MS/MS Sciex 6500). La ionizzazione del campione avviene per ESI (-) e la rivelazione in modalità MRM. La separazione cromatografica avviene su Colonna LC Acquity BEH Shield RP18 1,7 µm munita di pre-filtro assy frit da 0,2 µm Waters, delay column XTerra® MSC18 (2.1 × 100 mm) 5µm, impiegando come eluente una miscela di metanolo e acqua tamponata con acetato d'ammonio. Il volume di iniezione è pari a 2 µl.

L'intervallo di linearità del metodo è 0,025 – 1,5 ng/g per tutti gli analiti ad eccezione di GenX e C6O4 per i quali è 0,050 – 1,5 ng/g. Il LoQ è pari a 0,05 ng/g per tutti gli analiti, ad eccezione di GenX e C6O4 per i quali è 0,10 ng/g.

Nel caso specifico della matrice latte, per i soli analiti PFOA, PFNA, PFHxS e PFOS, si effettua una seconda analisi dell'estratto mediante HPLC Sciex, Exion LC abbinato a spettrometro MS/MS Sciex 7500 (intervallo di linearità 0,005 – 1,5 ng/g e limite di quantificazione pari a 0,01 ng/g).

Per campioni con concentrazioni al di fuori degli intervalli di linearità studiati, si procede a diluizione con estratto in matrice della stessa tipologia del campione in analisi. Ogni sessione analitica include analisi di “bianchi” (bianco reattivi e matrice negativa) all'inizio di ogni batch analitico e controlli di qualità al LoQ (campioni fortificati) alla fine di ciascun batch. Ogni batch contiene un massimo di 15 campioni. Le prestazioni del metodo garantiscono un recupero in matrice compreso tra l'80% e il 120%.

Allegato C: Confronto con i dati di letteratura

Il confronto tra i risultati del piano di sorveglianza per le matrici di origine animale e i dati di letteratura deve tenere in considerazione le difficoltà analitiche inerenti alla valutazione della contaminazione alimentare da PFAS quali (i) la loro presenza in tracce, (ii) le limitazioni associate all'effetto delle matrici e (iii) la presenza di contaminazione di fondo che può portare a interferenze nelle analisi con il mancato raggiungimento di LoQ idonei (Surma et al., 2023; Aßhoff et al., 2024). Tali difficoltà sono state affrontate con successo soprattutto per gli studi più recenti, nei quali in molti casi sono stati applicati metodi avanzati in grado di raggiungere i LoQ indicati dalla Raccomandazione (UE) 2022/1431 per il monitoraggio dei PFAS negli alimenti.

Un'importante discriminante è la natura dei dati di letteratura, che in alcuni casi sono stati ottenuti da campioni associati a zone per le quali gli autori hanno dichiarato una vicinanza o possibile vicinanza a fonti di contaminazione. Per la maggior parte di questi casi, le concentrazioni di PFAS misurate sono superiori rispetto agli altri studi riferiti a zone con valori di fondo. In Europa, il numero di siti influenzati o potenzialmente influenzati da emissioni di PFAS è stato stimato intorno a circa 100.000 (EEA, 2019).

Come descritto nella sezione 2.5 la rappresentazione delle concentrazioni di PFAS per gli studi primari censiti è stata realizzata in due modi distinti. Per i soli studi riferiti a zone con valori di fondo e laddove il numero di studi fosse sufficientemente elevato (≥ 10) i dati sono stati rappresentati mediante grafici raffiguranti i valori medi e i valori massimi misurati. In questi grafici è mostrato il dato ottenuto nel contesto del presente piano in riferimento alla zona ad alta intensità.²³ I dati rappresentati nei grafici sono integrati da tabelle riassuntive più estese che includono tutti gli studi raccolti, compresi (i) quelli relativi ad aree aventi fonti dichiarate di rilascio di PFAS o centri fluorochimici nelle vicinanze e quelli (ii) non rappresentabili graficamente a causa di informazioni incomplete e/o caratteristiche specifiche della matrice analizzata. In queste tabelle è mostrato il dato ottenuto nel contesto del presente piano in riferimento alle tre zone (bassa, media e alta intensità).

Le Figure 1-6 relative a PFBA (muscolo suino), PFOA (muscolo suino, uova di gallina), PFOS (muscolo bovino, uova di gallina, latte bovino) sono riportate in coda al presente allegato. A seguire sono riportate le Tabelle 1-22 relative a PFBA (muscolo suino, fegato suino, muscolo di broiler, fegato di broiler, uova di gallina), PFBS (fegato suino), PFHxS (fegato suino, fegato di broiler), PFOA (muscolo suino, fegato suino, fegato di broiler, uova di gallina), PFOS (muscolo bovino, fegato bovino, fegato suino, fegato di avicoli, uova di gallina, latte), PFNA (fegato bovino, fegato suino) e PFDeA (fegato bovino, fegato suino).

Prodotti carnei

L'assorbimento e distribuzione dei PFAS nei tessuti animali può essere il risultato di meccanismi di trasferimento che dipendono da diverse possibili vie di esposizione orale. Nelle specie destinate alla produzione alimentare, questi composti possono essere trasferiti sia dai mangimi sia dall'acqua di abbeveraggio ai prodotti oggetto di consumo umano. Inoltre, gli animali da allevamento che si nutrono di foraggio possono ingerire accidentalmente particelle di suolo²⁴. È documentato che tale

²³ Indicato come 'VENETO-Alta intensità'.

²⁴ I PFAS (con efficienza maggiore per quelli solfonati e con catene più lunghe) possono essere adsorbiti sulle particelle di terreno attraverso l'interazione delle code della catena perfluoroalchilica con la frazione di

comportamento alimentare rappresenti una possibile via di esposizione ai PFAS specialmente per il pollame e i suini allevati all'aperto (Gazzotti et al., 2021; EFSA CONTAM Panel, 2020), così come la contaminazione del foraggio per i ruminanti, che è a sua volta modulata da pratiche agricole quali lo spargimento di fanghi contaminati sui terreni agricoli (Brambilla et al., 2015).

I dati di letteratura mostrano che nel muscolo e nel fegato bovino il PFOS è di regola il composto prevalente (Figura 1, Tabelle 1 e 2). Altre molecole quantificate da vari studi nel fegato bovino sono i PFCA con 9 e 10 atomi di carbonio, vale a dire il PFNA (Tabella 3) e il PFDeA (Tabella 4). Le concentrazioni di PFOS misurate nel fegato sono di un ordine grandezza superiori a quelle riscontrate nel muscolo bovino. A differenza dei contaminanti persistenti liposolubili come le diossine, il bioaccumulo dei PFAS non è associato ai grassi, ma all'interazione con le proteine plasmatiche; questa caratteristica contribuisce a determinare le matrici più importanti per l'esposizione alimentare (EFSA CONTAM Panel, 2020; Cubadda e Iaconi, 2021). Nelle carni, l'affinità dei PFAS per le proteine strutturali, come quelle muscolari, risulta generalmente bassa. Al contrario, i PFAS tendono a concentrarsi maggiormente nel fegato, dove si legano a proteine specifiche, determinando modelli di accumulo tessuto-specifici. Il meccanismo di bioaccumulo nel fegato prevede l'assorbimento dal flusso sanguigno negli epatociti, attraverso proteine trasportatrici, facilitato dall'elevata affinità dei PFAS ai tessuti epatici e alle proteine. Il ruolo cruciale del fegato nei processi di metabolismo e detossificazione contribuisce ulteriormente alla ritenzione e all'accumulo di PFAS, rendendolo un organo bersaglio significativo per la deposizione di PFAS (Surma et al., 2023).

Contrariamente al muscolo bovino, i dati di letteratura indicano che il muscolo suino è più vulnerabile alla contaminazione da PFOA (Figura 3, Tabella 6). In linea con le evidenze in letteratura, nel piano di sorveglianza il PFOA è stato quantificato in maggiore misura rispetto al PFOS (quantificato soltanto in due campioni prelevati dalla zona ad alta intensità, con valori di 0,05 e 0,06 ng/g) e i livelli di PFOA misurati sono più elevati. Alcuni studi hanno riscontrato concentrazioni di PFOA superiori a quelle di PFOS nel muscolo suino (Chiesa et al., 2018; Surma et al., 2023). Altra molecola di regola quantificata in questa matrice è il PFBA (Figura 2, Tabella 5). Questa molecola è il PFCA studiato con la catena più corta: è caratterizzato da solubilità e mobilità relativamente elevate, preferenziale ripartizione nell'acqua piuttosto che nella materia organica del suolo (Scher et al., 2018) e trasferimento suolo-pianta più efficace rispetto ai composti a catena lunga (Krippner et al., 2015; EFSA CONTAM Panel, 2020; Mikołajczyk et al., 2024; Aßhoff et al., 2024; Surma et al., 2023). L'uso di materie prime vegetali come mais e altri tipi di cereali (o loro sottoprodotti) con livelli elevati di PFBA può rendere conto della presenza della molecola nei tessuti edibili dei suini.

Nel fegato di suino le molecole ordinariamente quantificate includono PFHxS (Tabella 9), PFOA (Tabella 10), PFOS (Tabella 11), PFNA (Tabella 12) e PFDeA (Tabella 13).

Negli avicoli, i dati di letteratura segnalano fra i PFAS con concentrazioni misurabili nel muscolo il PFBA (Tabella 14). Nel fegato, i PFAS con concentrazioni misurabili includono il PFBA (Tabella 15), il PFHxS (Tabella 16), il PFOA (Tabella 17) e il PFOS (Tabella 18).

carbonio organico del suolo, e in misura minore, attraverso interazioni elettrostatiche tra il gruppo terminale idrofilo e le frazioni cariche della porzione argillosa (Gazzotti et al., 2021).

I trend di deposizione molecola-specifici che emergono dai risultati del presente piano di sorveglianza sono in accordo con i dati di letteratura (vedi Tabelle 1-18), anche se l'intervallo di valori tra gli studi è spesso ampio. La variabilità nei livelli di ciascun composto in una matrice specifica è influenzata da fattori sito-specifici, nonché dall'età, dalle abitudini alimentari e condizioni di allevamento degli animali (Wang et al., 2017). I valori misurati nel presente studio sono generalmente confrontabili con studi che si collocano nella coda destra della distribuzione di valori per ciascuna combinazione matrice-molecola.

Uova

Le uova sono risultate l'alimento con il maggior numero di studi condotti, eterogenei in termini di numerosità campionaria, matrice analizzata (tuorlo, albume e uovo intero), origine geografica e tipologia di allevamento. Le Figure 4-5 e le Tabelle 19-21 riportano un riepilogo dei dati di letteratura per tre molecole: PFBA, PFOA e PFOS.

Gli studi di esposizione controllata ai PFAS condotti su galline ovaiole dimostrano l'esistenza di tassi di trasferimento alle uova e di eliminazione dalle stesse molecola-specifici.²⁵ Nelle uova, i PFAS si distribuiscono prevalentemente nel tuorlo e in minor misura nell'albume: per questo motivo molti studi focalizzano l'analisi sul tuorlo. In particolare, è stato documentato come PFBA, PFBS, PFHxS, PFOA e PFOS presentino una capacità di legame relativamente elevata con le proteine epatiche trasportate nel tuorlo, ovvero le lipoproteine a bassa densità (LDL), ad alta intensità (HDL) e la vitellina (Vn), rispetto alla loro affinità con l'ovoalbumina (OVA) presente nell'albume (Wang et al., 2019).

Negli studi di letteratura sulle uova prodotte da galline domestiche allevate all'aperto sono stati osservati livelli di PFAS superiori rispetto a quelli riscontrati nelle uova commerciali, incluse quelle provenienti da allevamenti biologici. L'esposizione delle ovaiole può avvenire attraverso l'ingestione diretta di particelle di suolo/sabbia o tramite l'alimentazione (ingestione di insetti, vermi o residui organici). Giocano un ruolo anche altri fattori, quali il tasso di deposizione più basso delle galline ovaiole domestiche rispetto a quelle da allevamento e l'esposizione più prolungata ai contaminanti in ragione della maggiore vita media (Gazzotti et al., 2021).

Le concentrazioni misurate nel presente piano sono risultate superiori rispetto a quanto riportato dagli studi di letteratura riferiti a valori di fondo (Figure 4-5), mentre nelle Tabelle 19-21 sono documentati casi di aree contaminate in cui sono stati osservati valori significativamente più elevati.

Latte

Nei bovini, analogamente ad altre specie animali, il legame specifico alle proteine come l'albumina sierica e la proteina legante gli acidi grassi del fegato (L-FABP), e la ripartizione nei fosfolipidi, sono possibili meccanismi che spiegano l'accumulo e la distribuzione tissutale dei PFAS. Per quanto riguarda il latte, i PFAS accumulati dagli animali che lo producono possono essere facilmente eliminati attraverso l'escrezione mammaria a causa del loro legame con le beta-lattoglobuline (Sznajder-Katarzyńska et al., 2019; Barbarossa et al., 2014). Van Asselt et al. (2013) hanno sviluppato un modello farmacocinetico (PBPK) per descrivere l'assorbimento del PFOS da

²⁵ PFOS, PFHxS e PFHpS hanno tassi di trasferimento alle uova maggiori rispetto a PFOA, PFBS e PFHxA. Una volta cessata l'esposizione, i PFAS vengono eliminati dal tuorlo con tempi di dimezzamento in un intervallo temporale dai 2-4 giorni (PFBS) ai 7-6 giorni (PFHxS) (Kowalczyk et al., 2020; Wilson et al., 2020).

mangimi contaminati nelle vacche e la sua successiva eliminazione attraverso il latte. Le predizioni di questo modello indicano che, una volta raggiunto lo stato stazionario, quasi tutto il PFOS ingerito viene escreto attraverso il latte vaccino; inoltre, è stata osservata un'elevata correlazione tra le concentrazioni di PFOS nel siero sanguigno e nel latte.

Analogamente a quanto osservato nelle uova, anche nel latte il PFOS si trasferisce preferenzialmente rispetto agli altri composti. Kowalczyk et al. (2013) hanno stimato i tassi di trasferimento di PFBS, PFOS, PFHxS e PFOA nel latte di vacche alimentate per 28 giorni con mangime contaminato, riportando valori rispettivamente pari a 0,01%, 14%, 2,5% e 0,1%. Xiao et al. (2024) hanno osservato una tendenza simile nel latte crudo di vacche alimentate in condizioni normali per oltre 20 mesi. Il valore del PFOA rispetto al PFOS può essere influenzato dal fatto che la via principale di escrezione per i PFCA con catena carboniosa inferiore a dieci atomi, incluso il PFOA, è rappresentata dall'urina (EFSA CONTAM Panel, 2020). In molti studi, il PFOS nel latte presenta frequenze di rilevamento e concentrazioni più elevate rispetto agli altri composti (esempio, Barbarossa et al., 2014; Xing et al., 2016; Haug et al., 2010).

Il latte vaccino è un alimento che, anche per i livelli di consumo nei bambini, è considerato sensibile. La Raccomandazione (UE) 2022/1431 segnala livelli indicativi (il cui superamento indica l'opportunità di indagini di approfondimento) pari a 0,010 ng/g per PFOA, 0,020 ng/g per PFOS, 0,050 ng/g per PFNA e 0,060 per il PFHxS.

I dati di letteratura disponibili per il PFOS sono mostrati in Figura 6 e nella Tabella 22. Nel latte proveniente da aree non contaminate il PFOS è rilevato in concentrazioni normalmente inferiori 0,020 ng/g. I tenori medio (in MB) e massimo di PFOS misurati nella zona ad alta intensità sono risultati pari a 0,026 ng/g e 0,070 ng/g. In particolare, il PFOS è stato quantificato in cinque campioni nell'area ad alta intensità (0,02- 0,07 ng/g), e in un solo campione (0,03 ng/g) nell'area a media intensità. Viceversa, il PFOA è stato quantificato in due soli campioni, uno nell'area ad alta intensità (0,05 ng/g) e uno in quella a media intensità (0,04 ng/g).

Nel confrontare i dati con la letteratura occorre ricordare che il latte confezionato può risentire dell'impiego di PFAS e dei loro precursori nei materiali a contatto con gli alimenti e dei processi di lavorazione alimentare, che rappresentano una potenziale fonte di contaminazione durante le fasi di produzione e stoccaggio degli alimenti. Sebbene le concentrazioni nel latte pronto alla vendita siano generalmente basse, in alcuni casi sono stati osservati valori superiori a quelli del latte non lavorato. I processi di trasformazione alimentare, oltre a modificare la durata commerciale e la struttura degli alimenti, possono alterare la concentrazione di PFAS presenti attraverso diversi meccanismi, (i) l'assorbimento di acqua contaminata, nei processi che utilizzano vapore come la pastorizzazione; (ii) il calore e tutti i processi di riscaldamento come la cottura, la cottura al forno e la frittura; (iii) la centrifugazione o la zangolatura, che determinano una separazione di fase e una conseguente distribuzione dei PFAS, con una maggiore presenza dei congeneri a catena lunga nella fase lipidica; (iv) i processi enzimatici, che potrebbero aumentare il contenuto di PFAS a partire dai loro precursori, rappresentando una fonte indiretta d'esposizione; (v) i materiali a contatto con gli alimenti, attraverso la migrazione diretta dei PFAS o la migrazione e successiva degradazione dei loro precursori (Still et al., 2013). Tuttavia, in letteratura sono disponibili solo informazioni limitate sull'effetto della lavorazione degli alimenti sulle concentrazioni di PFAS e i dati riportati sono discordanti (Schepens et al., 2023). Ad esempio, Barbarossa et al. (2014) e Still et al. (2013) non

hanno trovato alcuna correlazione tra le concentrazioni di PFAS e la tipologia di latte, crudo e processato. EFSA nella sua opinione scientifica (EFSA CONTAM Panel, 2020) riporta che l'incoerenza dei dati disponibili, unita al fatto che la maggior parte degli alimenti è consumata dopo processi di lavorazione e/o cottura, evidenzia la necessità di ulteriori studi per chiarire i meccanismi coinvolti e valutare l'impatto reale sull'esposizione alimentare.

Figura 1 – Concentrazioni medie e valori massimi di PFOS (ng g⁻¹ peso fresco) nei campioni analitici (*n*) di muscolo di bovino, confronto tra dati di letteratura e risultati del piano di campionamento in zona ad alta intensità.

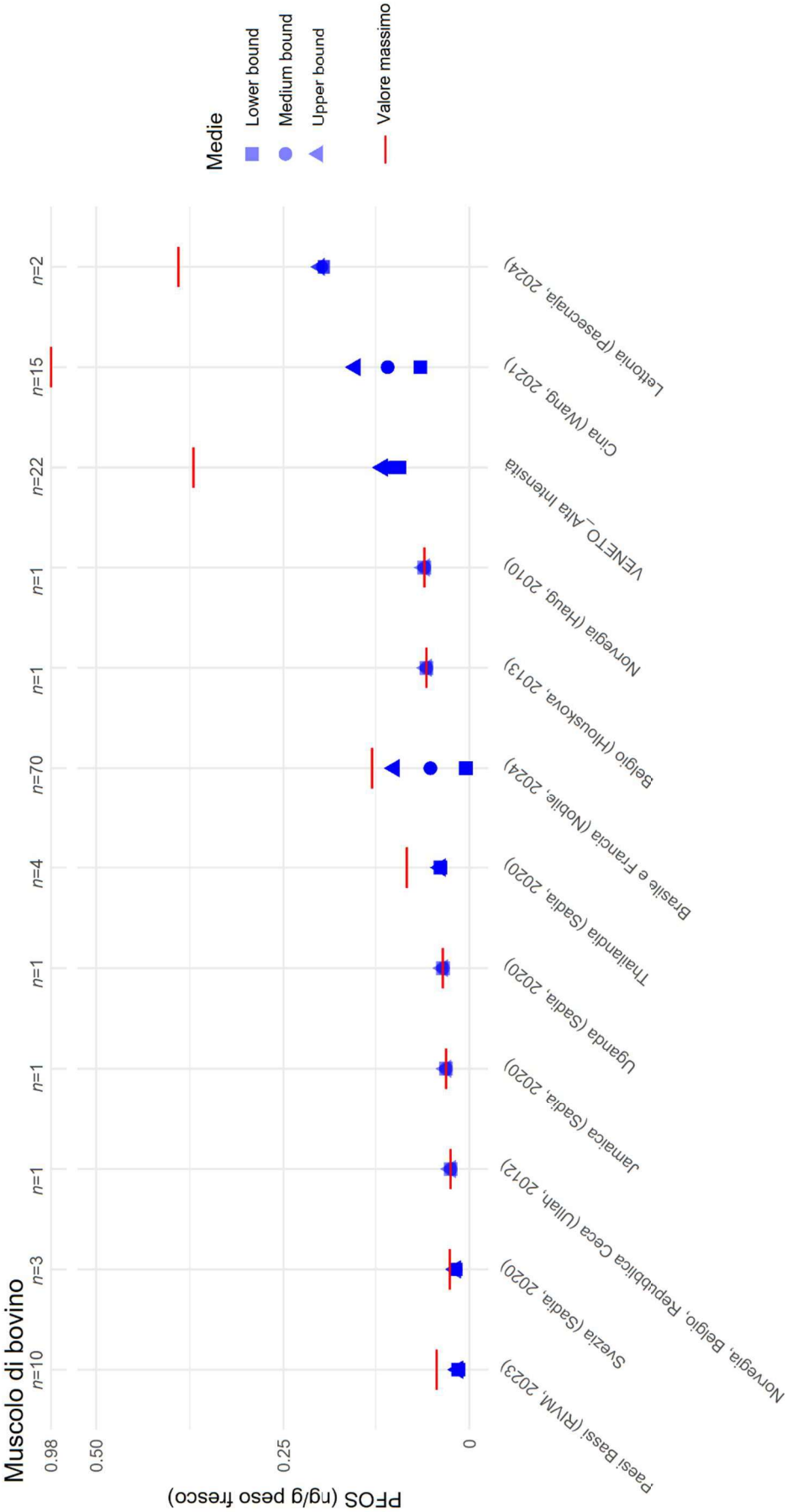


Figura 2 – Concentrazioni medie e valore massimo di PFBA (ng g⁻¹ peso fresco) nei campioni analitici (*n*) di muscolo di suino, confronto tra dati di letteratura e risultati del piano di campionamento in zona ad alta intensità.

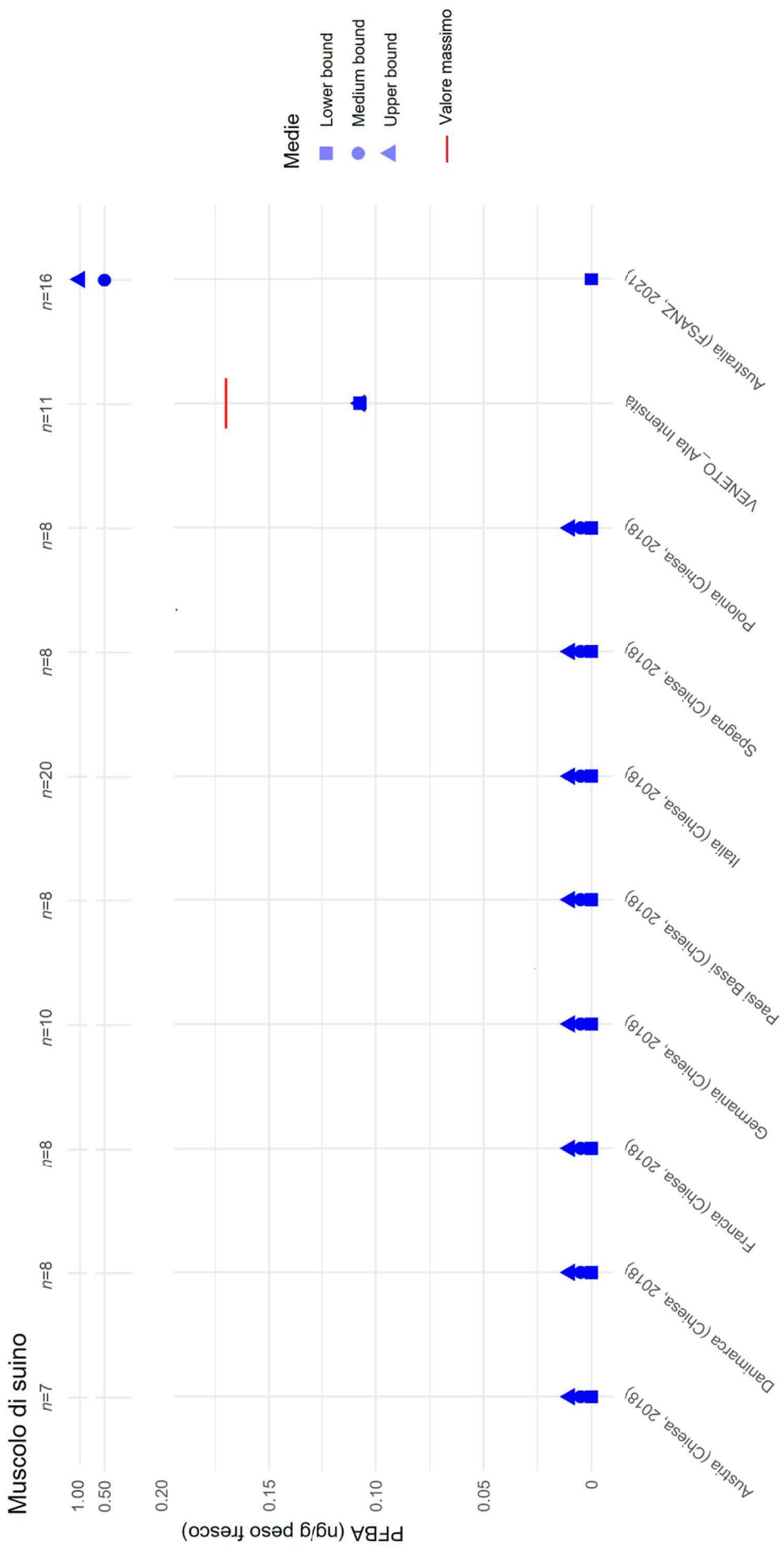


Figura 3 – Concentrazioni medie e valori massimi di PFOA (ng g⁻¹ peso fresco) nei campioni analitici (n) di muscolo di suino, confronto tra dati di letteratura e risultati del piano di campionamento in zona ad alta intensità.

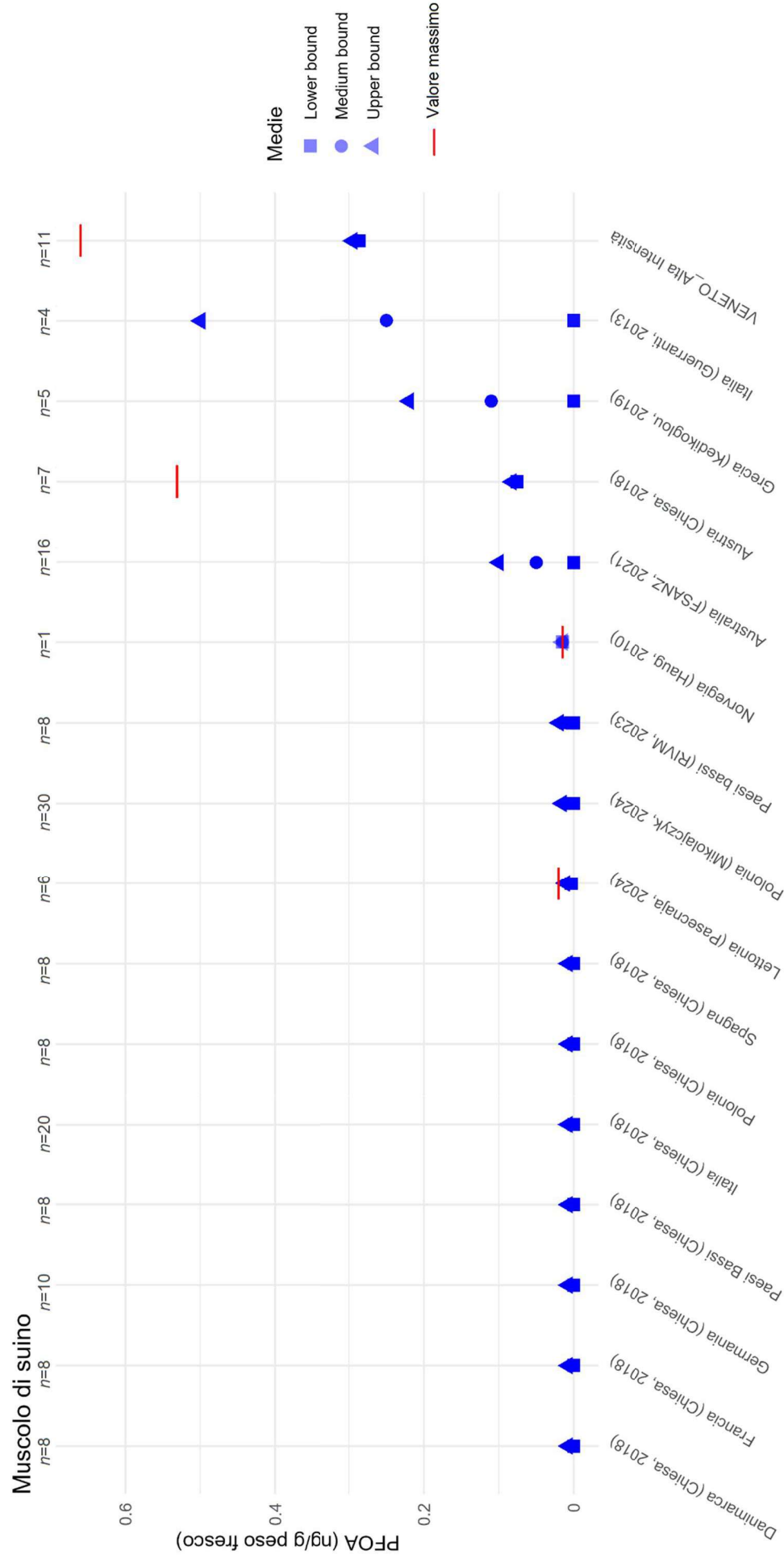


Figura 4 – Concentrazioni medie e valori massimi di PFOA (ng g⁻¹ peso fresco) nei campioni analitici (n) di uova di gallina, confronto tra dati di letteratura e risultati del piano di campionamento in zona ad alta intensità.

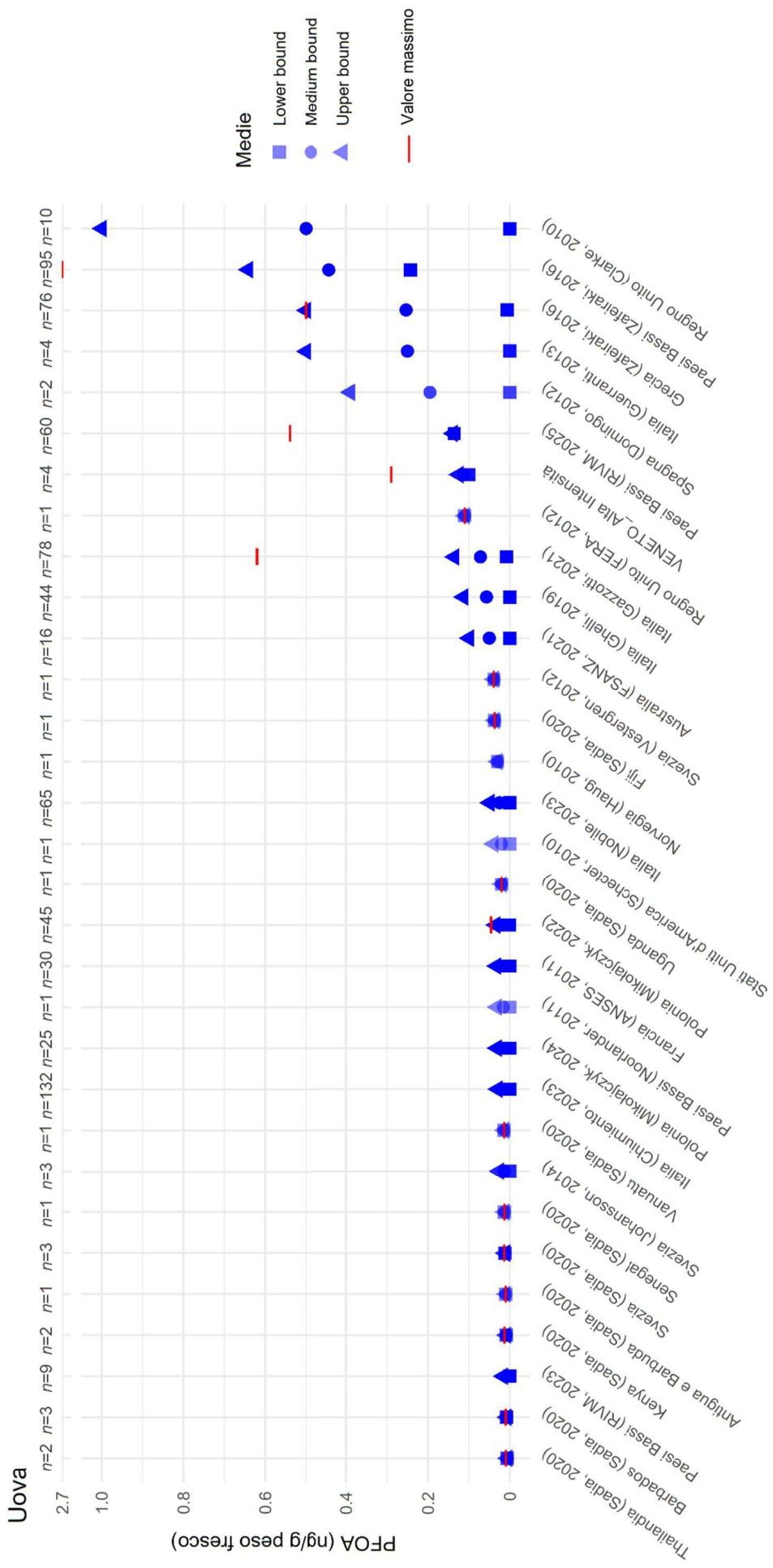


Figura 5 – Concentrazioni medie e valori massimi di PFOS (ng g⁻¹ peso fresco) nei campioni analitici (*n*) di uova di gallina, confronto tra dati di letteratura e risultati del piano di campionamento in zona ad alta intensità

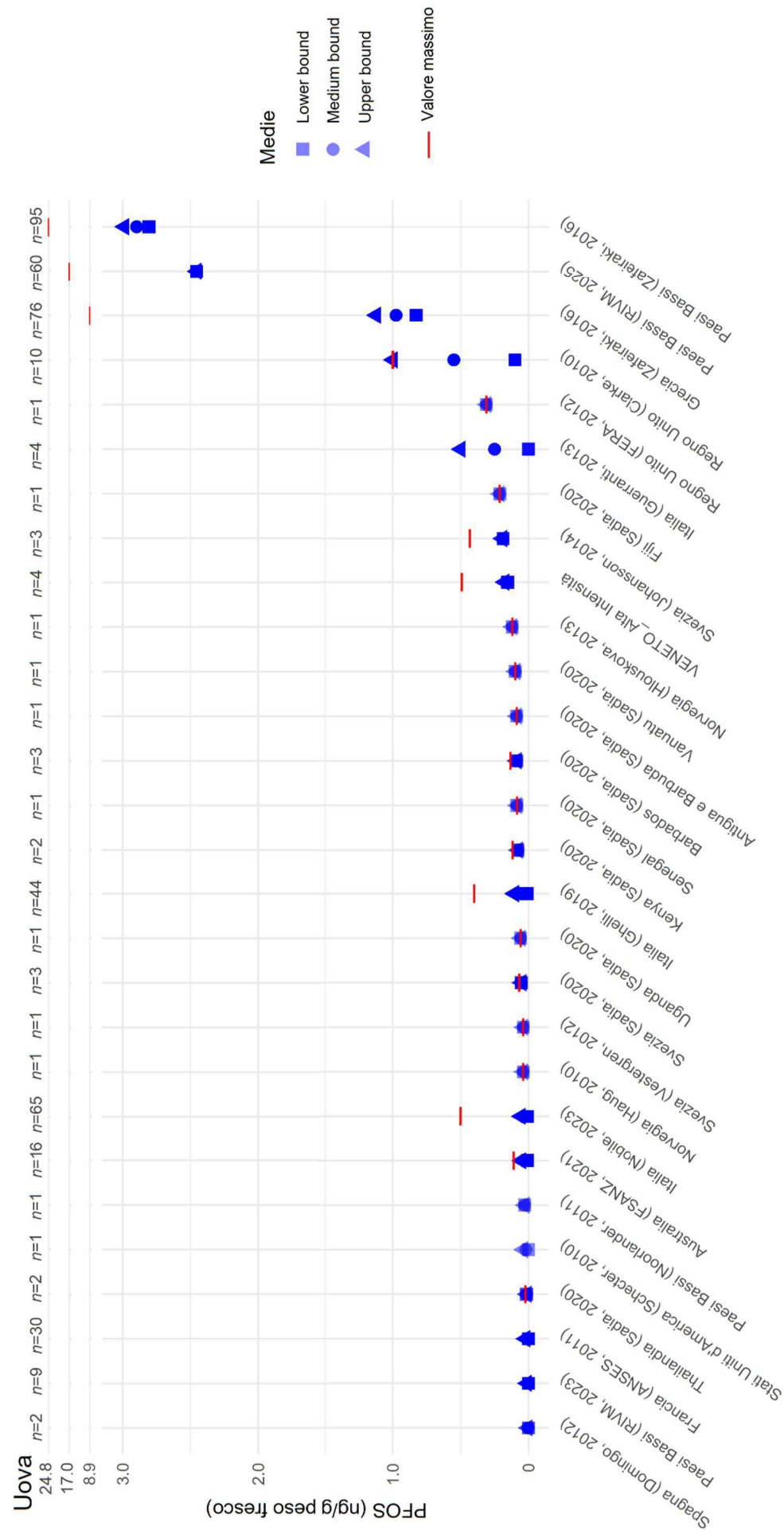
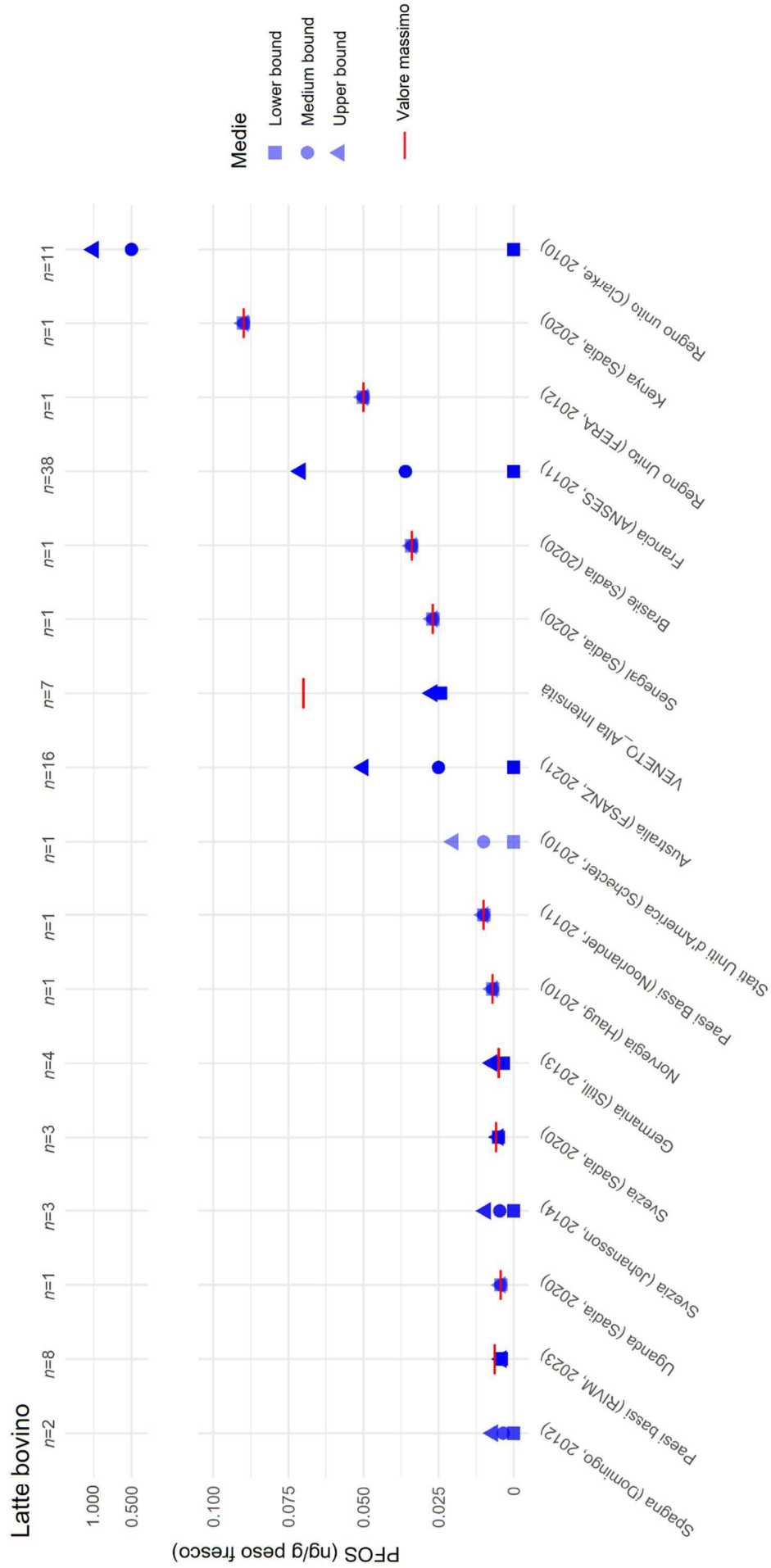


Figura 6 – Concentrazioni medie e valori massimi di PFOS (ng g⁻¹ peso fresco) nei campioni analitici (*n*) di latte bovino, confronto tra dati di letteratura e risultati del piano di campionamento in zona ad alta intensità.



Tabelle

Legenda

^a Media L.B. = media “lower bound”. Calcolata considerando tutti i valori non rilevabili (<LoD) e non quantificabili (<LoQ) uguali a zero

^b Media M.B. = media “medium bound”. Calcolata considerando tutti i valori non rilevabili (<LoD) pari a LoD/2 e tutti i valori non quantificabili (<LoQ) pari a LoQ/2

^c Media U.B. = media “upper bound”. Calcolata considerando tutti i valori non rilevabili (<LoD) pari al LoD e tutti i valori non quantificabili (<LoQ) pari a LoQ

^d Min= valore minimo; Max= valore massimo

^e=riferimento

§= area di studio comprendente anche o solo zone vicine a centri di produzione fluorochimica o fonti dichiarate di rilascio di PFAS

n=numero dei campioni analitici

N=numero dei campioni elementari

n.d.= informazione non disponibile

*valore stimato in riferimento alla numerosità campionaria elementare (*N*) o ai risultati, ottenuti da dati superiori al LoD ma inferiori al LoQ (n.d.)

Abbreviazioni

ANSES = Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Agenzia francese per la salute e sicurezza alimentare, ambientale e del lavoro); FDA= U.S. (United States) Food and Drug Administration (Agenzia per gli alimenti e i medicinali degli Stati Uniti); FERA = UK (United Kingdom) Food and Environment Research Agency (Agenzia per la ricerca alimentare e ambientale del Regno Unito); FSANZ = Food Standards Australia New Zealand (Agenzia per gli standard alimentari di Australia e Nuova Zelanda); GRULAC = Group of Latin America and the Caribbean (Gruppo dell'America Latina e dei Caraibi); PAC = Pacific Islands (Isole del Pacifico); RIVM = Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (Istituto nazionale olandese per la sanità pubblica e l'ambiente); UHT = Ultra High Temperature (trattamento a temperatura ultra-alta).

Tabella 1 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFOS (ng/g peso fresco) nel muscolo di bovino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Paesi Bassi	4	4	0,010	0,011	0,011	<LoQ (0,002)-0,020	Carne macinata, di manzo con/senza maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Paesi Bassi	10	10	0,015	0,015	0,015	<LoD (0,001)-0,044	Carne di manzo, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Svezia	3	3	0,018	0,018	0,018	0,013-0,026	Carne di manzo (tessuto muscolare), da mercati locali	Sadia et al., 2020
Norvegia, Belgio, Repubblica Ceca	1	n.d.	0,025	0,025	0,025	0,025	Carne bovina (muscolo), da supermercati	Ullah et al., 2012
Australia	16	48	0,000	0,025	0,050	<LoD (0,050)	Carne di manzo macinata, magra preparata per il consumo (cotta in padella)	FSANZ, 2021
VENETO_Bassa Intensità	32	110	0,002	0,026	0,050	<LoQ (0,050)-0,050	Muscolo di bovino da aziende	
Jamaica	1	1	0,031	0,031	0,031	0,031	Carne di manzo	Sadia et al., 2020
Uganda	1	1	0,035	0,035	0,035	0,035	Carne di manzo	Sadia et al., 2020
Thailandia	4	4	0,039	0,039	0,039	0,011- 0,083	Carne di manzo	Sadia et al., 2020
n.d.	70	70	0,000	0,050	0,100	<LoD (n.d.)-<LoQ (0,100)	Carne bovina in scatola	Nobile et al., 2024
Brasile e Francia	70	70	0,005	0,052	0,100	<LoD (n.d.)-0,130	Carne bovina precotta	Nobile et al., 2024
Belgio	1	n.d.	0,057	0,057	0,057	0,057	Carne di manzo da supermercati	Hlouskova et al., 2013
Norvegia	1	3	0,060	0,060	0,060	0,060	Carne di manzo, da negozi di alimentari	Haug et al., 2010 ²⁶
Belgio [§]	6	18	0,000	0,060	0,120	<LoQ (0,120)	Carne di bovino, da macellerie di varie località (nello studio)	Cornelis et al., 2012

²⁶ Valori osservati in presenza di basse percentuali di recupero (7%).

							un numero limitato di campioni proviene da zone nei pressi di un centro fluorochimico)	
Paesi Bassi	1	n.d.	0,082	0,082	0,082	0,082	Carne di manzo (carne macinata/hamburger di manzo/bistecca in umido/bistecca brasata/bistecca macinata da negozi al dettaglio con copertura nazionale)	Noorlander et al., 2011
VENETO_Media Intensità	29	110	0,079	0,098	0,117	<LoQ (0,050)-0,690	Muscolo di bovino da aziende	
VENETO_Alta Intensità	22	44	0,093	0,105	0,116	<LoQ (0,050)-0,370	Muscolo di bovino da aziende	
Cina	15	15	0,065	0,109	0,152	<LoD (0,093) ²⁷ -0,980	Manzo, da mercati generali e da un servizio di consegna di generi alimentari online	Wang et al., 2021
Lettonia	2	2	0,195	0,198	0,200	<LoQ (0,010)-0,390	Manzo	Pasecnaja & Zacs, 2024
Italia	4	16-20*	2,110	n.d.	n.d.	<LoD (0,500)-n.d.	Carne di manzo, da supermercati	Guerranti et al., 2013
Africa, Asia, GRULAC, PAC	9	9	0,038	n.d.	n.d.	<LoQ ²⁸ -0,084	Carne muscolare, compresa la carne macinata, da mercati locali o da supermercati	Fiedler et al., 2022
Grecia	8	8	0,110	n.d.	0,550	<LoQ (0,500)-0,900	Carne di manzo da mercati	Kedikoglou et al., 2019
Polonia	5	5	0,130	n.d.	n.d.	0,031-0,290	Carne cruda di manzo, da negozi di alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Polonia	30	30	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,009)-0,025	Carne bovina (muscolo), da macelli	Mikołajczyk et al., 2024
Cina §	43	43	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD ²⁹ -0,064	Muscolo di manzo, da mercati agricoli, fattorie locali o negozi al dettaglio,	Wang et al., 2018

²⁷ Valore di LoD in peso fresco calcolato assumendo il 75% di umidità.

²⁸ I valori di LoQ riferiti all'isomero lineare (L-PFOS) e all'isomero ramificato (Br-PFOS) sono pari a 0,006 ng/g e 0,001 ng/g, rispettivamente.

²⁹ I valori di LoD erano nel range 0,012-0,06 ng/g per la matrice muscolo.

							proveniente da aree fortemente o meno industrializzate (industrie petrolchimiche, della carta e tessili) e vicinanza a fiumi che contribuiscono alla trasmissione a lunga distanza dei PFAS	
Cina [§]	176	176	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,013)-0,082	Muscolo di manzo da supermercati locali, negozi al dettaglio, mercati agricoli o fattorie, proveniente da aree maggiormente o meno industrializzate (industrie petrolchimiche e chimiche)	Wang et al., 2017
Stati Uniti d'America	10	n.d.	-	-	-	<LoD ³⁰ - 0,086	Bistecca di manzo, lombata/controfiletto, alla griglia; carne di manzo macinata cotta in padella	FDA, 2021-2024

³⁰ I valori di LoD sono variati negli anni di analisi dei campioni (0,036 ng/g; 0,028 ng/g; 0,082 ng/g).

Tabella 2 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFOS (ng/g peso fresco) nel fegato di bovino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Lettonia	2	2	0,025	0,025	0,025	0,020-0,030	Fegato di manzo	Pasecnaja & Zacs, 2024
VENETO_ Bassa Intensità	32	110	0,217	0,217	0,217	<LoQ (0,050)-0,730	Fegato di bovino da aziende	
Paesi Bassi	22	22	0,445	0,593	0,701	<LoQ (0,500)-3,000	Fegato di bovino da mercati locali e da macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016
VENETO_Alta Intensità	21	44	1,588	1,588	1,588	0,120-3,600	Fegato di bovino da aziende	
VENETO_Media Intensità	29	110	1,649	1,649	1,649	0,060-12,500	Fegato di bovino da aziende	
Polonia	10	10	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,009)-0,900	Fegato di bovino	Mikołajczyk et al., 2024
Cina [§]	27	27	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD ³¹ -2,543	Fegato di manzo, da mercati agricoli, fattorie locali e negozi al dettaglio, proveniente da aree fortemente o meno industrializzate (industrie petrolchimiche, della carta e tessili) e vicinanza a fiumi che contribuiscono alla trasmissione a lunga distanza dei PFAS	Wang et al., 2018
Repubblica Ceca, Belgio, Italia, Norvegia	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,204-2,600	Fegato di bovino e di maiale da supermercati	Hlouskova et al., 2013
Cina [§]	117	117	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,009)-4,221	Fegato di manzo da supermercati locali, negozi al dettaglio, mercati agricoli o fattorie, proveniente da aree maggiormente o meno industrializzate (industrie petrolchimiche e	Wang et al., 2017

³¹ I valori di LoD erano nel range 0,003-0,036 ng/g per la matrice fegato.

Tabella 3 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFNA (ng/g peso fresco) nel fegato di bovino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
VENETO_Bassa Intensità	32	110	0,024	0,039	0,054	<LoQ (0,050)- 0,090	Fegato di bovino da aziende	
VENETO_Media Intensità	29	110	0,042	0,054	0,067	<LoQ (0,050)- 0,250	Fegato di bovino da aziende	
VENETO_Alta Intensità	21	44	0,064	0,071	0,079	<LoQ (0,050)- 0,290	Fegato di bovino da aziende	
Lettonia	2	2	0,115	0,118	0,120	<LoQ (0,010)- 0,230	Fegato di manzo	Pasecnaja & Zacs, 2024
Paesi Bassi	22	22	0,000	0,250	0,500	<LoQ (0,500)	Fegato di bovino da mercati locali e da macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016
Polonia	10	10	n.d.	n.d.	n.d.	< LoQ (0,010)- 0,400	Fegato di bovino	Mikołajczyk et al., 2024
Cina [§]	117	117	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,008)- 1,243	Fegato di manzo da supermercati locali, negozi al dettaglio, mercati agricoli o fattorie, proveniente da aree maggiormente o meno industrializzate (industrie petrolchimiche e chimiche)	Wang et al., 2017
Cina [§]	27	27	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD ³² -1,243	Fegato di manzo, da mercati agricoli, fattorie locali e negozi al dettaglio, proveniente da aree fortemente o meno industrializzate (industrie petrolchimiche, della carta e tessili) e vicinanza a fiumi che contribuiscono alla trasmissione a lunga distanza dei PFAS	Wang et al., 2018

³² I valori di LoD erano nel range 0,003-0,036 ng/g per la matrice fegato.

Tabella 4 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFDeA (ng/g peso fresco) nel fegato di bovino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
VENETO_Bassa Intensità	32	110	0,064	0,068	0,073	<LoQ (0,050)- 0,180	Fegato di bovino da aziende	
VENETO_Alta Intensità	21	44	0,209	0,210	0,211	<LoQ (0,050)- 0,530	Fegato di bovino da aziende	
VENETO_Media Intensità	29	110	0,213	0,217	0,220	<LoQ (0,050)- 1,200	Fegato di bovino da aziende	
Paesi Bassi	22	22	0,000	0,250	0,500	<LoQ (0,500)	Fegato di bovino da mercati locali e da macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016
Cina [§]	27	27	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD ³³ -0,375	Fegato di manzo, da mercati agricoli, fattorie locali e negozi al dettaglio, proveniente da aree fortemente o meno industrializzate (industrie petrolchimiche, della carta e tessili) e vicinanza a fiumi che contribuiscono alla trasmissione a lunga distanza dei PFAS	Wang et al., 2018
Polonia	10	10	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,014)- 0,620	Fegato di bovino	Mikołajczyk et al., 2024
Cina [§]	117	117	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,014)- 0,847	Fegato di manzo da supermercati locali, negozi al dettaglio, mercati agricoli o fattorie, proveniente da aree maggiormente o meno industrializzate (industrie petrolchimiche e chimiche)	Wang et al., 2017

³³ I valori di LoD erano nel range 0,003-0,036 ng/g per la matrice fegato.

Tabella 5 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFBA (ng/g peso fresco) nel muscolo di suino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Austria	7	7	0,000	0,005	0,010	<LoD (0,010)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Danimarca	8	8	0,000	0,005	0,010	<LoD (0,010)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Francia	8	8	0,000	0,005	0,010	<LoD (0,010)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Germania	10	10	0,000	0,005	0,010	<LoD (0,010)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Paesi Bassi	8	8	0,000	0,005	0,010	<LoD (0,010)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Italia	20	20	0,000	0,005	0,010	<LoD (0,010)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Spagna	8	8	0,000	0,005	0,010	<LoD (0,010)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Polonia	8	8	0,000	0,005	0,010	<LoD (0,010)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
VENETO_Media Intensità	4	6*	0,013	0,031	0,050	<LoQ (0,050)-0,050	Muscolo di suino da aziende	
Paesi Bassi	1	n.d.	0,000	0,056	0,112	<LoD (0,112)	Carne di maiale (salsiccia/fetta di pancetta/braciola di maiale/pancetta/carne macinata avvolta nella pancetta da negozi al dettaglio con copertura nazionale)	Noorlander et al., 2011
VENETO_Alta Intensità	11	13*	0,107	0,107	0,107	0,060-0,170	Muscolo di suino da aziende	
VENETO_Bassa Intensità	3	3*	0,180	0,180	0,180	0,130-0,230	Muscolo di suino da aziende	
Australia	16	48	0,000	0,500	1,000	<LoD (1)	Bistecca di lombo di maiale, pronta al consumo (cotta in padella)	FSANZ, 2021
Cina	20	20	0,007	n.d.	n.d.	<LoD (0,018)-0,097	Lonza di maiale cruda, da mercati	Wang et al., 2010b
Polonia	5	5	1,400	n.d.	n.d.	0,300-3,900	Carne di maiale cruda, da negozi di alimentari	Surma et al., 2023

							locali e punti vendita al dettaglio	
Norvegia	1	3	0,000	n.d.	n.d.	<LoD (n.d.)	Carne di maiale da negozi di alimentari	Haug et al., 2010
Repubblica Ceca, Italia, Belgio, Norvegia	4	n.d	n.d.	n.d.	n.d.	0,027-0,050	Carne di maiale cruda da supermercati	Hlouskova et al., 2013
Stati Uniti d'America	15	n.d	0,000	-	-	<LoD ³⁴	Salsiccia di maiale (intera o a polpetta), cotta al forno; pancetta di maiale cotta al forno; braciola di maiale cotta al forno (con olio)	FDA, 2021-2024

³⁴ I valori di LoD sono variati negli anni di analisi dei campioni (0,602 ng/g; 0,345 ng/g; 0,066 ng/g).

Tabella 6 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFOA (ng/g peso fresco) nel muscolo di suino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Danimarca	8	8	0,000	0,004	0,008	<LoD (0,008)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Francia	8	8	0,000	0,004	0,008	<LoD (0,008)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Germania	10	10	0,000	0,004	0,008	<LoD (0,008)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Paesi Bassi	8	8	0,000	0,004	0,008	<LoD (0,008)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Italia	20	20	0,000	0,004	0,008	<LoD (0,008)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Polonia	8	8	0,000	0,004	0,008	<LoD (0,008)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Spagna	8	8	0,000	0,004	0,008	<LoD (0,008)	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Lettonia	6	6	0,003	0,008	0,012	<LoQ (0,010)-0,020	Maiale	Pasecnaja & Zacs, 2024
Polonia	30	30	0,000	0,008	0,016	<LoQ (0,016)	Carne muscolare di maiale, da macelli	Mikolajczyk et al., 2024
Paesi bassi	8	8	0,000	0,010	0,020	<LoD (0,020)	Carne di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Norvegia	1	3	0,015	0,015	0,015	0,015	Carne di maiale da negozi alimentari	Haug et al., 2010
Paesi Bassi	1	n.d.	0,015*	0,015*	0,015*	0,015*	Carne di maiale (salsiccia/fetta di pancetta/braciola di maiale/pancetta/carne macinata avvolta nella pancetta da negozi al dettaglio con copertura nazionale)	Noorlander et al., 2011
VENETO_Bassa Intensità	3	3*	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Muscolo di suino da aziende	

Australia	16	48	0,000	0,050	0,100	<LoD (0,100)	Bistecca di lombo di maiale, pronta al consumo (cotta in padella)	FSANZ, 2021
Belgio [§]	6	18	0,000	0,060	0,120	<LoQ (0,120)	Carne di suino, da macellerie di varie località (nello studio un numero limitato di campioni proviene da zone nei pressi di un centro fluorochimico)	Cornelis et al., 2012
VENETO_Media Intensità	4	6*	0,053	0,065	0,078	<LoQ (0,050)-0,120	Muscolo di suino da aziende	
Austria	7	7	0,076	0,079	0,083	<LoD (0,008)-0,531	Carne di maiale (muscolo)	Chiesa et al., 2018
Grecia	5	5	0,000	0,110	0,220	<LoD (0,150)-<LoQ (0,500)	Carne di maiale, da mercati	Kedikoglou et al., 2019
Italia	4	16-20*	0,000	0,250	0,500	<LoD (0,500)	Carne di maiale dai supermercati	Guerranti et al., 2013
VENETO_Alta Intensità	11	13*	0,286	0,291	0,295	<LoQ (0,050)-0,660	Muscolo di suino da aziende	
Polonia	5	5	0,067	n.d.	n.d.	0,054-0,087	Carne di maiale cruda, da negozi di alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Repubblica Ceca, Belgio, Italia, Norvegia	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,003-0,028 ³⁵	Carne di maiale cruda da supermercati	Hlouskova et al., 2013
Stati Uniti d'America	15	n.d.	0,000	-	-	<LoD ³⁶	Salsiccia di maiale (intera o a polpetta), cotta al forno; pancetta di maiale cotta al forno; braciola di maiale cotta al forno (con olio)	FDA, 2021-2024

³⁵ Il range comprende anche i valori misurati di PFOS.

³⁶ I valori di LoD sono variati durante il periodo di analisi dei campioni (0,090 ng/g; 0,024 ng/g; 0,034 ng/g).

Tabella 7 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFBA (ng/g peso fresco) nel fegato di suino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Norvegia, Belgio, Repubblica Ceca	1	n.d.	0,000	0,010	0,020	<LoD (0,020)	Fegato di maiale da supermercati	Ullah et al., 2012
VENETO_Media Intensità	4	6*	0,080	0,086	0,093	<LoQ (0,050)-0,170	Fegato di suino da aziende	
VENETO_Bassa Intensità	3	3*	0,290	0,290	0,290	0,240-0,360	Fegato di suino da aziende	
VENETO_Alta Intensità	11	13*	0,315	0,315	0,315	0,050-1,14	Fegato di suino da aziende	
Polonia	5	5	14	n.d.	n.d.	<LoQ (0,025)- 35	Fegato di maiale, da negozi di alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Repubblica Ceca, Belgio, Italia, Norvegia	4	n.d.	0,000	n.d.	n.d.	<LoD (n.d.)	Fegato di maiale e bovino da supermercati	Hlouskova et al., 2013

Tabella 8 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFBS (ng/g peso fresco) nel fegato di suino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Norvegia, Belgio, Repubblica Ceca	1	n.d.	0,000	0,002	0,005	<LoD (0,005)	Fegato di maiale da supermercati	Ullah et al., 2012)
Paesi Bassi	5	5	0,000	0,003	0,005	<LoD (0,005)	Paté, fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Paesi Bassi	5	5	0,000	0,004	0,007	<LoD (0,005)-<LoQ (0,010)	Salsiccia di fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Polonia	5	5	0,000	0,007	0,013	<LoQ (0,013)	Fegato di maiale, da negozi di alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
VENETO_ Bassa Intensità	3	3*	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Fegato di suino da aziende	
Repubblica Ceca, Belgio, Italia, Norvegia	4	n.d.	0,000	n.d.	n.d.	<LoD (n.d.)	Fegato di maiale e bovino da supermercati	Hlouskova et al., 2013
VENETO_Media Intensità	4	6*	0,068	0,080	0,093	<LoQ (0,050)-0,210	Fegato di suino da aziende	
VENETO_Alta Intensità	11	13*	0,186	0,198	0,209	<LoQ (0,050)-0,730	Fegato di suino da aziende	
Paesi Bassi	20	20	0,000	0,250	0,500	<LoQ (0,500)	Fegato di maiale da mercati locali e dai macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016

Tabella 9 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFHxS (ng/g peso fresco) nel fegato di suino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Paesi bassi	5	5	0,002	0,002	0,002	<LoD (0,001)- 0,003	Salsiccia di fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Paesi bassi	5	5	0,001	0,001	0,002	<LoD (0,001)- 0,003	Paté, fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Norvegia, Belgio, Repubblica Ceca	1	n.d.	0,000	0,005	0,009	<LoQ (0,009)	Fegato di maiale da supermercati	Ullah et al., 2012
Lettonia	1	1	0,000	0,005	0,010	<LoQ (0,010)	Fegato di maiale	Pasecnaja & Zacs, 2024
VENETO_ Bassa Intensità	3	3*	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Fegato di suino da aziende	
VENETO_Alta Intensità	11	13*	0,085	0,094	0,103	<LoQ (0,050)-0,190	Fegato di suino da aziende	
VENETO_Media Intensità	4	6*	0,088	0,100	0,113	<LoQ (0,050)-0,180	Fegato di suino da aziende	
Paesi Bassi	20	20	0,000	0,250	0,500	<LoQ (0,500)	Fegato di maiale da mercati locali e dai macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016
Cina	20	n.d.	0,000	0,290	0,580	<LoD (0,580)	Fegato di maiale, da mercati locali o negozi di alimentari	Zhang et al., 2010 ³⁷
Cina	20	20	0,002	n.d.	n.d.	<LoD (0,002)- 0,020	Fegato di maiale crudo, da mercati	Wang et al., 2010b
Polonia	5	5	0,360	n.d.	n.d.	<LoQ (0,021)-1,300	Fegato di maiale, da negozi di alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023

³⁷ Valori osservati in presenza di basse percentuali di recupero (34%).

Tabella 10 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFOA (ng/g peso fresco) nel fegato di suino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Paesi bassi	5	5	0,000	0,010	0,020	<LoD (0,020)	Paté, fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Lettonia	1	1	0,010	0,010	0,010	0,010	Fegato di maiale	Pasecnaja & Zacs, 2024
Paesi bassi	5	5	0,010	0,020	0,030	<LoD (0,020)-0,049	Salsiccia di fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Norvegia, Belgio, Repubblica Ceca	1	n.d.	0,039	0,039	0,039	0,039	Fegato di maiale da supermercati	Ullah et al., 2012
VENETO_Bassa Intensità	3	3*	0,077	0,085	0,093	<LoQ (0,050)-0,160	Fegato di suino da aziende	
Paesi Bassi	20	20	0,000	0,250	0,500	<LoQ (0,500)	Fegato di maiale da mercati locali e dai macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016
VENETO_Media Intensità	4	6*	0,460	0,473	0,485	<LoQ (0,050)-1,190	Fegato di suino da aziende	
Regno Unito	5	5	n.d.	n.d.	1,200	<LoQ (1,000)-2,000	Fegato di maiale da supermercati grandi e piccoli e negozi indipendenti	Clarke et al., 2010
VENETO_Alta Intensità	11	13*	2,082	2,082	2,082	0,130-4,800	Fegato di suino da aziende	
Polonia	5	5	0,170	n.d.	n.d.	<LoQ (0,021)-0,470	Fegato di maiale, da negozi di alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Cina	20	20	0,241	n.d.	n.d.	0,034-1,790	Fegato di maiale crudo, da mercati	Wang et al., 2010b

Tabella 11 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFOS (ng/g peso fresco) nel fegato di suino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Paesi bassi	5	5	0,016	0,017	0,018	<LoQ (0,002)- 0,061	Salsiccia di fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Paesi bassi	5	5	0,021	0,021	0,022	0,019- 0,035	Paté, fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Lettonia	1	1	0,170	0,170	0,170	0,170	Fegato di maiale	Pasecnaja & Zacs, 2024
Norvegia, Belgio, Repubblica Ceca	1	n.d.	0,182	0,182	0,182	0,182	Fegato di maiale da supermercati	Ullah et al., 2012
VENETO_ Bassa Intensità	3	3*	0,190	0,190	0,190	0,120-0,270	Fegato di suino da aziende	
Paesi Bassi	20	20	0,210	0,448	0,685	<LoQ (0,500)- 4,200	Fegato di maiale da mercati locali e dai macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016
VENETO_Med ia Intensità	4	6*	0,728	0,728	0,728	0,070-1,410	Fegato di suino da aziende	
VENETO_Alta Intensità	11	13*	2,731	2,731	2,731	0,350-8,400	Fegato di suino da aziende	
Polonia	5	5	1,100	n.d.	n.d.	<LoQ (0,019)- 3,600	Fegato di maiale, da negozi di alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Cina	20	20	2,163	n.d.	n.d.	0,094-11,300	Fegato di maiale crudo, da mercati	Wang et al., 2010b
Repubblica Ceca, Belgio, Italia, Norvegia	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,204-2,600	Fegato di bovino e di maiale da supermercati	Hlouskova et al., 2013
Regno Unito	5	5	n.d.	n.d.	2,200	<LoQ (1,000)-4,000	Fegato di maiale da supermercati grandi e piccoli e negozi indipendenti	Clarke et al., 2010

Tabella 12 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFNA (ng/g peso fresco) nel fegato di suino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Paesi bassi	5	5	0,000	0,003	0,006	<LoD (0,005)-<LoQ (0,010)	Salsiccia di fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Paesi bassi	5	5	0,000	0,003	0,006	<LoD (0,005)-<LoQ (0,010)	Paté, fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Polonia	5	5	0,000	0,014	0,027	<LoQ (0,027)	Fegato di maiale, da negozi di alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Lettonia	1	1	0,020	0,020	0,020	0,020	Fegato di maiale	Pasecnaja & Zacs, 2024
Norvegia, Belgio, Repubblica Ceca	1	n.d.	0,021	0,021	0,021	0,021	Fegato di maiale da supermercati	Ullah et al., 2012
VENETO_Bassa Intensità	3	3*	0,020	0,037	0,053	<LoQ (0,050)-0,060	Fegato di suino da aziende	
VENETO_Media Intensità	4	6*	0,040	0,053	0,065	<LoQ (0,050)-0,080	Fegato di suino da aziende	
VENETO_Alta Intensità	11	13*	0,074	0,080	0,087	<LoQ (0,050)-0,150	Fegato di suino da aziende	
Paesi Bassi	20	20	0,000	0,250	0,500	<LoQ (0,500)	Fegato di maiale da mercati locali e dai macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016
Cina	20	20	0,161	n.d.	n.d.	<LoD (0,027)- 0,528	Fegato di maiale crudo, da mercati	Wang et al., 2010b

Tabella 13 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFDeA (ng/g peso fresco) nel fegato di suino.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Paesi Bassi	5	5	0,000	0,002	0,004	<LoQ (0,004)	Paté, fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Paesi Bassi	5	5	0,002	0,003	0,003	<LoD (0,002)-0,005	Salsiccia di fegato di maiale, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Polonia	5	5	0,000	0,013	0,025	<LoQ (0,025)	Fegato di maiale, da negozi di alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023)
Norvegia, Belgio, Repubblica Ceca	1	n.d.	0,016	0,016	0,016	0,016	Fegato di maiale da supermercati	Ullah et al., 2012
VENETO_Bassa Intensità	3	3*	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Fegato di suino da aziende	
VENETO_Media Intensità	4	6*	0,013	0,031	0,050	<LoQ (0,050)-0,050	Fegato di suino da aziende	
VENETO_Alta Intensità	11	13*	0,128	0,130	0,133	<LoQ (0,050)-0,240	Fegato di suino da aziende	
Paesi Bassi	20	20	0,000	0,250	0,500	<LoQ (0,500)	Fegato di maiale da mercati locali e dai macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016
Cina	20	n.d.	0,000	0,380	0,760	<LoD (0,760)	Fegato di maiale, da mercati locali o negozi di alimentari	Zhang et al., 2010
Cina	20	20	0,150	n.d.	n.d.	<LoD (0,015)-0,614	Fegato di maiale crudo, da mercati	Wang et al., 2010b

Tabella 14 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFBA (ng/g peso fresco) nel muscolo di broiler.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Norvegia, Belgio, Repubblica Ceca	1	n.d.	0,000	0,010	0,020	<LoD (0,020)	Carne di pollo (muscolo) da supermercati	Ullah et al., 2012
VENETO_Bassa Intensità	21	66*	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Muscolo di broiler da aziende	
VENETO_Alta Intensità	4	29*	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Muscolo di broiler da aziende	
VENETO_Media Intensità	21	80*	0,007	0,030	0,052	<LoQ (0,050)-0,100	Muscolo di broiler da aziende	
Paesi Bassi	1	n.d.	0,000	0,046	0,091	<LoD (0,091)	Pollo/pollame (coscia di pollo, quarto di pollo, filetto di pollo, hamburger di pollo, pollo marinato o speziato) da punti vendita al dettaglio	Noorlander et al., 2011
Norvegia	1	3	0,000	n.d.	n.d.	<LoD (n.d.)	Carne di pollo da negozi di alimentari	Haug et al., 2010
Africa, Asia, GRULAC, PAC	14	14	0,027	n.d.	n.d.	<LoQ (0,006)-0,135	Pollo (carne muscolare, filetto di petto, senza pelle) da mercato locale o supermercato	Fiedler et al., 2022
Polonia	5	5	0,250	n.d.	n.d.	<LoQ (0,025)-0,740	Carne cruda di pollo, da negozi di alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Cina	16	16	n.d.	n.d.	n.d.	1,110-3,100	Pollo, da mercati generali e da un servizio di consegna di generi alimentari online	Wang et al., 2021
Stati Uniti d'America	21	n.d.	0,000	-	-	<LoD ³⁸	Petto di pollo fritto (fast-food) con pelle; petto di pollo arrosto al forno (pelle rimossa); coscia di pollo fritta (fast-food)	FDA, 2021-2024

³⁸ I valori di LoD sono variati negli anni di analisi dei campioni (0,602 ng/g; 0,345 ng/g; 0,066 ng/g).

con pelle e cotta
arrosto (pelle
rimossa); petto di
pollo arrosto

Tabella 15 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFBA (ng/g peso fresco) nel fegato di broiler.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
VENETO_Bassa Intensità	21	66*	0,013	0,034	0,054	<LoQ (0,050)- 0,110	Fegato di broiler da aziende	
VENETO_Media Intensità	21	80*	0,021	0,039	0,057	<LoQ (0,050)- 0,120	Fegato di broiler da aziende	
VENETO_Alta Intensità	4	29*	0,073	0,085	0,098	<LoQ (0,050)- 0,150	Fegato di broiler da aziende	
Australia	16	48	0,000	0,500	0,100	<LoD (0,100)	Fegato di pollo preparato per il consumo (cotto in padella)	FSANZ, 2021
Polonia	5	5	15	n.d.	n.d.	4,500-25	Fegato di pollo, da negozi alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023

Tabella 16 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFHxS (ng/g peso fresco) nel fegato di broiler.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Polonia	7	7	0,007	0,009	0,011	<LoQ (0,005)-0,047	Fegato di pollo da fattoria	Mikołajczyk et al., 2024
Polonia	5	5	0,007	0,016	0,024	<LoQ (0,021)-0,036	Fegato di pollo, da negozi alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
VENETO_Bassa Intensità	21	66*	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Fegato di broiler da aziende	
Australia	16	48	0,000	0,025	0,050	<LoD (0,050)	Fegato di pollo preparato per il consumo (cotto in padella)	FSANZ, 2021
VENETO_Media Intensità	21	80*	0,002	0,026	0,050	<LoQ (0,050)-0,050	Fegato di broiler da aziende	
VENETO_Alta Intensità	4	29*	0,033	0,045	0,058	<LoQ (0,050)-0,070	Fegato di broiler da aziende	
Paesi Bassi	20	20	0,000	0,250	0,500	<LoQ (0,500)	Fegato di pollo da mercati locali e da macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016

Tabella 17 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFOA (ng/g peso fresco) nel fegato di broiler.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Polonia	5	5	0,000	0,011	0,021	<LoQ (0,021)	Fegato di pollo da negozi alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
VENETO_Bassa Intensità	21	66*	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Fegato di broiler da aziende	
Polonia	7	7	0,024	0,031	0,038	<LoQ (0,016)-0,170	Fegato di pollo da fattoria	Mikołajczyk et al., 2024)
Australia	16	48	0,000	0,050	0,100	<LoD (0,100)	Fegato di pollo preparato per il consumo (cotto in padella)	FSANZ, 2021
VENETO_Media Intensità	21	80*	0,057	0,075	0,093	<LoQ (0,050)-0,450	Fegato di broiler da aziende	
VENETO_Alta Intensità	4	29*	0,190	0,196	0,203	<LoQ (0,050)-0,390	Fegato di broiler da aziende	
Paesi Bassi	20	20	0,000	0,250	0,500	<LoQ (0,500)	Fegato di pollo da mercati locali e macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016
Regno Unito	2	2	0,000	0,500	1,000	<LoQ (1,000)	Fegato di pollo da supermercati grandi e piccoli e negozi indipendenti	Clarke et al., 2010
Cina	19	≥ 57 *	0,009	n.d.	n.d.	<LoD (0,018)-0,061	Fegato di pollo crudo da mercati	Wang et al., 2010b

Tabella 18 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFOS (ng/g peso fresco) nel fegato di avicoli (tacchino e broiler).

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
VENETO_Media Intensità	5	80*	0,004	0,024	0,044	<LoQ (0,050)	Fegato di tacchino da aziende	
VENETO_Bassa Intensità	1	66*	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Fegato di tacchino da aziende	
VENETO_Bassa Intensità	21	66*	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Fegato di broiler da aziende	
Australia	16	48	0,000	0,025	0,050	<LoD (0,050)	Fegato di pollo preparato per il consumo (cotto in padella)	FSANZ, 2021
VENETO_Media Intensità	21	80*	0,011	0,032	0,054	<LoQ (0,050)-0,110	Fegato di broiler da aziende	
VENETO_Alta Intensità	4	29*	0,033	0,045	0,058	<LoQ (0,050)- 0,070	Fegato di tacchino da aziende	
VENETO_Alta Intensità	4	29*	0,113	0,113	0,113	0,060-0,160	Fegato di broiler da aziende	
Paesi Bassi	20	20	0,025	0,263	0,500	<LoQ (0,500)-0,500	Fegato di pollo da mercati locali e da macelli	Zafeiraki, Vassiliadou, et al., 2016
Regno Unito	2	n.d.	0,000	0,500	1,000	<LoQ (1,000)	Fegato di pollo da supermercati grandi e piccoli e negozi indipendenti	Clarke et al., 2010
Cina	19	^{≥57} *	0,063	n.d.	n.d.	<LoD (0,007)-0,288	Fegato di pollo crudo da mercati	Wang et al., 2010b
Polonia	5	5	0,390	n.d.	n.d.	<LoQ (0,019)-1,400	Fegato di pollo, da negozi alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Polonia	7	7	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,009)-0,150	Fegato di pollo da fattoria	Mikołajczyk et al., 2024
Polonia	5	5	1,600	n.d.	n.d.	0,710-4,300	Fegato di tacchino da negozi alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023

Tabella 19 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFBA (ng/g peso fresco) nelle uova di gallina.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Polonia	5	5	0,000	0,013	0,025	<LoQ (0,025)	Uova da negozi alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Repubblica Ceca	1	n.d.	0,042	0,042	0,042	0,042	Uova da supermercato	Hlouskov a et al., 2013
Francia	30	450	0,000	0,055	0,109	<LoD (0,109)	Uova pronte per il consumo (sodo/strapazzato)	ANSES, 2011
Spagna	2	24	0,000	0,060	0,120	<LoD (0,120)	Uova da mercati locali, supermercati, piccoli negozi e negozi alimentari	Domingo et al., 2012
VENETO_Bassa Intensità	12	144	0,083	0,083	0,083	0,060-0,120	Uova da allevamenti di galline ovaiole	
VENETO_Media Intensità	2	24	0,085	0,085	0,085	0,060- 0,110	Uova da allevamenti di galline ovaiole	
VENETO_Alta Intensità	4	39	0,073	0,085	0,098	<LoQ (0,050)-0,190	Uova da allevamenti di galline ovaiole	
Italia	1	n.d.	0,092	0,092	0,092	0,092	Uova da supermercato	Hlouskov a et al., 2013
Belgio	1	n.d.	0,099	0,099	0,099	0,099	Uova da supermercato	Hlouskov a et al., 2013
Italia	65	65	0,088	0,106	0,124	<LoD (n.d.)-0,670	Uova commerciali da allevamento in gabbia e libero all'aperto, al chiuso e biologico	Nobile et al., 2023

Australia	16	48	0,000	0,500	1,000	<LoD (1)	Uova preparate per il consumo (bollite)	FSANZ, 2021
Paesi Bassi	1	30	0,000	2,000	4,000	<LoD (4)	Uova da negozi al dettaglio	Noorlander et al., 2011
Cina §	48	48	4,839	4,932	5,026	<LoQ (0,500)-110	Uova da proprietà private e commerciali (tuorlo, albume e uovo intero) prelevate in aree vicine ad un centro fluorochimico	Su et al., 2017
Norvegia	1	3	0,000	n.d.	n.d.	<LoD (n.d.)	Uova da negozi alimentari	Haug et al., 2010
Africa, Asia, GRULAC, PAC	36	36	0,075	n.d.	n.d.	<LoQ (0,006)-0,212	Uova da mercati locali o supermercati	Fiedler et al., 2022
Polonia	45	45	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,127)-0,420	Uova da allevamento biologico, all'aperto o in gabbia	Mikolajczyk et al., 2022
Belgio §	102	204	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,080)-3,730	Uova da proprietà private a differenti distanze da un centro fluorochimico	Lasters et al., 2024
Belgio §	70	70	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (n.d.)-9,100	Uova da proprietà privata (allevamento all'aperto) a differenti distanze da un centro fluorochimico	Lasters et al., 2022
Cina §	9	18	n.d.	n.d.	n.d.	24-52	Uova da proprietà privata (tuorlo, albume e uovo intero) nelle vicinanze di un centro fluorochimico	Bao et al., 2019 ³⁹
Cina §	128	128	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD ⁴⁰ -1697,530	Uova da allevamenti di	Wang et al., 2019

³⁹ Il range non è riferito ai valori puntuali ma alle medie di campioni duplicati utilizzati per le analisi. Per il calcolo delle medie, è stato utilizzato $LoQ/2$ se il valore era $<LoQ$ e $LoD/\sqrt{2}$ se $<LoD$.

							polli e da allevamenti all'aperto (tuorlo, albume e uovo intero)	
Stati Uniti d'America	5	n.d.	0,000	-	-	<LoD ⁴¹	Uova pronte per il consumo	FDA, 2021- 2024

⁴⁰ Il LoD riferito alla matrice “tuorlo” è pari a 0,02 ng/g, mentre quello riferito alla matrice “albume” è pari a 0,01 ng/g.

⁴¹ I valori di LoD sono variati negli anni di analisi dei campioni (0,602 ng/g; 0,345 ng/g; 0,066 ng/g).

Tabella 20 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFOA (ng/g peso fresco) nelle uova di gallina.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Thailandia	2	2	0,006	0,006	0,006	0,004-0,009	Uova intere	Sadia et al., 2020
Barbados	3	3	0,008	0,008	0,008	0,006-0,010	Uova intere	Sadia et al., 2020
Paesi Bassi	9	9	0,000	0,008	0,017	<LoD (0,015)- <LoQ (0,030)	Uova da supermercati e mercati locali	RIVM, 2023
Kenya	2	2	0,009	0,009	0,009	0,005-0,013	Uova intere	Sadia et al., 2020
Antigua e Barbuda	1	1	0,010	0,010	0,010	0,010	Uova intere	Sadia et al., 2020
Svezia	3	3	0,012	0,012	0,012	0,009-0,014	Uova da supermercati locali	Sadia et al., 2020
Senegal	1	1	0,013	0,013	0,013	0,013	Uova intere	Sadia et al., 2020
Lettonia	20	20	0,010	0,013	0,017	<LoQ (0,010)- 0,050	Uova di gallina e di quaglia	Pasecnaj a & Zacs, 2024
Svezia	3	200-300*	0,000	0,013	0,027	<LoD (0,014)- <LoQ (0,033)	Uova da allevamento convenzionale o biologico (tuorlo)	Johanss on et al., 2014
Vanuatu	1	1	0,014	0,014	0,014	0,014	Uova intere	Sadia et al., 2020
Italia	132	132	0,000	0,015	0,030	<LoD (0,030)	Uova da supermercato (biologiche e convenzionali allevate in gabbia o a terra)	Chiumie nto et al., 2023
Polonia	25	25	0,000	0,016	0,032	<LoQ (0,032)	Uova da allevamento all'aperto e in gabbia	Mikołajc zyk et al., 2024
Paesi Bassi	1	30	0,000	0,016	0,032	<LoD (0,032)	Uova da negozi al dettaglio	Noorland er et al., 2011

Francia	30	450	0,000	0,017	0,033	<LoD (0,033)	Uova preparate per il consumo (sodo/strapazzato)	ANSES, 2011
Polonia	45	45	0,001	0,018	0,035	<LoQ (0,035)-0,046	Uova da allevamento biologico, all'aperto o in gabbia	Mikolajczyk et al., 2022
Norvegia	1	3	0,030*	0,030*	0,030*	0,030*	Uova da negozi di alimentari	Haug et al., 2010 ⁴²
Uganda	1	1	0,020	0,020	0,020	0,020	Uova intere	Sadia et al., 2020
Stati Uniti d'America	1	10	0,000	0,020	0,040	<LoD (0,040)	Uova da negozi di alimentari	Schecter et al., 2010
VENETO_								
Bassa Intensità	12	144	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Uova da allevamenti di galline ovaiole	
Italia	65	65	0,000	0,025	0,050	<LoD (n.d.) - <LoQ (0,050)	Uova commerciali da allevamento in gabbia e libero all'aperto, al chiuso e biologico	Nobile et al., 2023
Fiji	1	1	0,037	0,037	0,037	0,037	Uova intere	Sadia et al., 2020
Svezia	1	n.d.	0,039	0,039	0,039	0,039	Uova da negozi di alimentari	Vestergr en et al., 2012
Australia	16	48	0,000	0,050	0,100	<LoD (0,100)	Uova preparate per il consumo (bollite)	FSANZ, 2021
Italia	44	132	0,000	0,057	0,114	<LoD (0,100)-<LoQ (0,250)	Uova commerciali da allevamento organico, in gabbia, in voliera (tuorlo, bollito)	Ghelli et al., 2019
Italia	78	208	0,008	0,072	0,136	<LoD (0,100)-0,620	Uova da allevamento in cortile (tuorlo,	Gazzotti et al., 2021

⁴² Valori osservati in presenza di basse percentuali di recupero (34%).

							bollito)	
Paesi Bassi §	2	2	0,070	0,076	0,083	<0,025-0,140	Uova intere da aree “hotspot”	Berendse n et al., 2020
Indonesia §	7	36	0,103	0,104	0,106	<LoQ (0,010)-0,390	Uova da un supermercato e allevate a terra vicino a siti di stoccaggio e incenerimento di rifiuti plastici e di produzione di alluminio secondario	Petrlik et al., 2020
Regno Unito	1	34	0,110	0,110	0,110	0,110	Uova preparate per il consumo	FERA, 2012
VENETO_Alta Intensità	4	39	0,100	0,113	0,125	<LoQ (0,050)-0,290	Uova da allevamenti di galline ovaiole	
Paesi Bassi	60	≥288 */582 *	0,136	0,137	0,139	<LoD (0,013)-0,540	Uova intere da proprietà private	RIVM, 2025
VENETO_Media Intensità	2	24	0,145	0,158	0,170	<LoQ (0,050)-0,290	Uova da allevamenti di galline ovaiole	
Cina	24	222	n.d.	0,180	n.d.	<LoD (0,001)-2,790	Uova da mercati locali, negozi di alimentari e abitazioni, pronte per il consumo	Wang et al., 2022
Spagna	2	24	0,000	0,195	0,390	<LoD (0,390)	Uova da mercati locali, supermercati, piccoli negozi e negozi alimentari	Domingo et al., 2012
Italia	4	16-20*	0,000	0,250	0,500	<LoD (0,500)	Uova da supermercato	Guerranti et al., 2013
Grecia	76	1520*	0,007	0,253	0,500	<LoQ (0,500)-0,500	Uova da supermercato o prodotte in casa (tuorlo, bollito)	Zafeiraki, Costopoulou, et al., 2016
Paesi Bassi	95	1900	0,242	0,442	0,642	<LoQ (0,500)-	Uova da supermercato o	Zafeiraki,

		*				2,700	prodotte in casa (tuorlo, bollito)	Costopoulou, et al., 2016
Regno Unito	10	10	0,000	0,500	1,000	<LoQ (1,000)	Uova da supermercati grandi e piccoli e negozi indipendenti	Clarke et al., 2010
Africa, Asia, GRULAC, PAC	36	36	0,008	n.d.	n.d.	<LoQ (0,006)-0,028	Uova da mercati locali o supermercati	Fiedler et al., 2022
Cina	3200	3200	0,051	n.d.	n.d.	<LoD (0,032)-3,300	Uova da supermercati e fattorie	Wang et al., 2022
Polonia	5	5	0,130	n.d.	n.d.	0,100- 0,180	Uova da negozi alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Belgio [§]	7	n.d.	n.d.	0,980	n.d.	<LoQ (0,055)-5	Uova da fattorie di varie località (nello studio un numero limitato di campioni proviene da zone nei pressi di un centro fluorochimico)	Cornelis et al., 2012
Australia [§]	8	8	0,950	n.d.	n.d.	7,600	Uova allevate presso caserme dei pompieri	Mesfin Tefera et al., 2022
Cina [§]	48	48	15,843	15,845	15,847	<LoD (0,010)-368	Uova da proprietà private e commerciali (tuorlo, albume e uovo intero), prelevate in aree vicine ad un centro fluorochimico	Su et al., 2017
Stati Uniti d'America	5	n.d.	0,000	-	-	<LoD ⁴³	Uova pronte per il consumo (bollite)	FDA, 2021-2024
Germania	56	56	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,002)-	Uova da	Aßhoff et al.,

⁴³ I valori di LoD sono variati durante il periodo di analisi dei campioni (0,090 ng/g; 0,024 ng/g; 0,034 ng/g).

						0,194	rivenditori	2024
Belgio [§]	70	70	n.d.	n.d.	n.d.	0,130-2,400	Uova da proprietà private (allevamento all'aperto), a differenti distanze da un centro fluorochimico	Lasters et al., 2022
Belgio [§]	102	204	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,076)-8,130	Uova da proprietà private, a differenti distanze da un centro fluorochimico	Lasters et al., 2024
Cina [§]	9	18	n.d.	n.d.	n.d.	1,200- 43	Uova da proprietà private (tuorlo, albume e uovo intero) nelle vicinanze di un centro fluorochimico	Bao et al., 2019 ⁴⁴
Cina [§]	128	128	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,001) ⁴⁵ -69,690	Uova da allevamenti di polli e da allevamenti all'aperto (tuorlo, albume e uovo intero) prelevate nelle vicinanze di un centro fluorochimico	Wang et al., 2019

⁴⁴ Il range non è riferito ai valori puntuali ma alle medie di campioni duplicati utilizzati per le analisi. Per il calcolo delle medie, è stato utilizzato LoQ/2 se il valore era <LoQ e LoD/ $\sqrt{2}$ se <LoD.

⁴⁵ Il LoD indicato si riferisce alla matrice “tuorlo”.

Tabella 21 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFOS (ng/g peso fresco) nelle uova di gallina.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Spagna	2	24	0,000	0,003	0,005	<LoD (0,005)	Uova da mercati locali, supermercati, piccoli negozi e negozi alimentari	Domingo et al., 2012
Paesi Bassi	9	9	0,000	0,006	0,012	<LoD (0,012)	Uova da supermercati e mercati locali	RIVM, 2023
Francia	30	450	0,000	0,012	0,024	<LoD (0,024)	Uova preparate per il consumo (sodo/strapazzato)	ANSES, 2011
Thailandia	2	2	0,014	0,014	0,014	0,006-0,023	Uova intere	Sadia et al., 2020
Stati Uniti d'America	1	10	0,000	0,020	0,040	<LoD (0,040)	Uova da negozi di alimentari	Schecter et al., 2010
Lettonia	20	20	0,018	0,022	0,025	<LoQ (0,010)-0,060	Uova di gallina e di quaglia	Pasecnaja & Zacs, 2024
VENETO_Bassa Intensità	12	144	0,000	0,025	0,050	<LoQ (0,050)	Uova da allevamenti di galline ovaiole	
Paesi Bassi	1	30	0,029*	0,029*	0,029*	0,029*	Uova da negozi al dettaglio	Noorlander et al., 2011
Australia	16	48	0,007	0,030	0,054	<LoD (0,050)-0,110	Uova preparate per il consumo (bollite)	FSANZ, 2021
Italia	65	65	0,008	0,033	0,057	<LoD (n.d.)-0,500	Uova commerciali da allevamento in gabbia e libero all'aperto, al chiuso e biologico	Nobile et al., 2023
Norvegia	1	3	0,039	0,039	0,039	0,039	Uova da negozi di alimentari	Haug et al., 2010) ⁴⁶
Svezia	1	n.d.	0,039	0,039	0,039	0,039	Uova da negozi	Vestergre

⁴⁶ Valori osservati in presenza di basse percentuali di recupero (48%).

							di alimentari	n et al., 2012
Svezia	3	3	0,053	0,053	0,053	0,029-0,069	Uova da supermercati locali	Sadia et al., 2020
Uganda	1	1	0,058	0,058	0,058	0,058	Uova intere	Sadia et al., 202
Italia	44	132	0,009	0,058	0,107	<LoD (0,100)-0,400	Uova commerciali da allevamento organico, in gabbia, in voliera (tuorlo, bollito)	Ghelli et al., 2019
Cina	24	222	n.d.	0,070	n.d.	<LoD (0,002)-0,190	Uova da mercati locali, negozi di alimentari e abitazioni pronte per il consumo	Wang et al., 2022
Kenya	2	2	0,077	0,077	0,077	0,037-0,117	Uova intere	Sadia et al., 2020
Senegal	1	1	0,085	0,085	0,085	0,085	Uova intere	Sadia et al., 2020
Barbados	3	3	0,087	0,087	0,087	0,049-0,133	Uova intere	Sadia et al., 2020
Antigua e Barbuda	1	1	0,087	0,087	0,087	0,087	Uova intere	Sadia et al., 2020
Vanuatu	1	1	0,098	0,098	0,098	0,098	Uova intere	Sadia et al., 2020
Norvegia	1	n.d.	0,120	0,120	0,120	0,120	Uova da supermercato	Hlouskov a et al., 2013
VENETO_A Ita Intensità	4	39	0,153	0,165	0,178	<LoQ (0,050)-0,490	Uova da allevamenti di galline ovaiole	
Svezia	3	200-300*	0,187	0,191	0,195	<LoD (0,026)-0,432	Uova da allevamento convenzionale o biologico (tuorlo)	Johansso n et al., 2014
VENETO_Media Intensità	2	24	0,185	0,198	0,210	<LoQ (0,050)-0,370	Uova da allevamenti di galline ovaiole	
Fiji	1	1	0,212	0,212	0,212	0,212	Uova intere	Sadia et al., 2020
Italia	4	16-20*	0,000	0,250	0,500	<LoD (0,500)	Uova da supermercato	Guerranti et al.,

								2013
Regno unito	1	34	0,310	0,310	0,310	0,310	Uova preparate per il consumo	FERA, 2012
Cina §	48	48	0,496	0,499	0,502	<LoD (0,020)-1,680	Uova da proprietà private e commerciali (tuorlo, albume e uovo intero) prelevate in aree vicine ad un centro fluorochimico	Su et al., 2017
Regno Unito	10	10	0,100	0,550	1,000	<LoQ (1,000)-1,000	Uova da supermercati grandi e piccoli e negozi indipendenti	Clarke et al., 2010
Grecia	76	1520 *	0,828	0,976	1,124	<LoQ (0,500)-8,900	Uova da supermercato o prodotte in casa (tuorlo, bollito)	Zafeiraki, Costopoulou, et al., 2016
Paesi Bassi	60	≥ 288 */582 *	2,455	2,455	2,455	<LoD (0,025)-17	Uova intere da proprietà private	RIVM, 2025
Paesi Bassi	95	1900 *	2,805	2,897	2,989	<LoQ (0,500)-24,800	Uova da supermercato o prodotte in casa (tuorlo, bollito)	Zafeiraki, Costopoulou, et al., 2016
Africa, Asia, GRULAC, PAC	36	36	0,046	n.d.	n.d.	<LoQ ⁴⁷ - 0,326	Uova da mercati locali o supermercati	Fiedler et al., 2022
Cina	3200	3200	0,054	n.d.	n.d.	<LoD (0,028)-1,900	Uova da supermercati e fattorie	Wang et al., 2022
Italia	78	208	0,660	n.d.	0,730	<LoD (0,100)-3,470	Uova da allevamento in cortile (tuorlo, bollito)	Gazzotti et al., 2021
Italia	132	132	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,006)-<LoQ (0,050)	Uova da supermercato (biologiche e convenzionali allevate in gabbia o a terra)	Chiumiento et al., 2023
Polonia	45	45	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,005)-	Uova da allevamento	Mikolajczyk et al.,

⁴⁷ I valori di LoQ riferiti all'isomero lineare (L-PFOS) e all'isomero ramificato (Br-PFOS) sono pari a 0,006 ng/g e 0,001 ng/g, rispettivamente.

						0,740	biologico, all'aperto o in gabbia	2022
Germania	56	56	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,002)- 0,772	Uova da rivenditori	Aßhoff et al., 2024
Polonia	25	25	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,017)- 0,095	Uova da allevamento all'aperto e in gabbia	Mikołajcz yk et al., 2024
Cina [§]	9	18	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,100)- 2,100	Uova da proprietà private (tuorlo, albume e uovo intero) nelle vicinanze di un centro fluorochimico	Bao et al., 2019 ⁴⁸
Polonia	5	5	2,400	n.d.	n.d.	0,064-5,700	Uova da negozi alimentari locali e punti vendita al dettaglio	Surma et al., 2023
Belgio [§]	7	n.d.	n.d.	7,800	n.d.	<LoQ (0,120)- 22	Uova da fattorie di varie località (nello studio un numero limitato di campioni proviene da zone nei pressi di un centro fluorochimico)	Cornelis et al., 2012
Varie ^{§49}	14	60	7,933	7,933	7,934	<LoQ (0,010)- 76	Uova da un supermercato e allevate a terra vicino a siti di smaltimento di rifiuti plastici	Petrlik et al., 2021
Indonesia [§]	7	36	16,187	16,188	16,189	<LoQ (0,010)- 92,100	Uova da un supermercato e allevate a terra vicino a siti di stoccaggio e incenerimento di rifiuti plastici e di produzione di alluminio secondario	Petrlik et al., 2020

⁴⁸ Il range non è riferito ai valori puntuali ma alle medie di campioni duplicati utilizzati per le analisi. Per il calcolo delle medie, è stato utilizzato LoQ/2 se il valore era <LoQ e LoD/√2 se <LoD.

⁴⁹ Guadalajara (Messico), Bangun (Indonesia), Tangerang (Indonesia), Bagong Silang (Filippine), Tropodo (Indonesia), Anguado (Filippine), Nairobi – Mirema (Kenya), Colle di Montevideo (Uruguay), Minas (Uruguay), Pugu Kinyamwezi (Tanzania), Jakarta (Indonesia). I risultati si riferiscono al solo isomero lineare (L-PFOS).

Belgio [§]	70	70	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,130)- 241	Uova da proprietà private (allevamento all'aperto), a differenti distanze da un centro fluorochimico	Lasters et al., 2022
Belgio [§]	102	204	n.d.	n.d.	n.d.	0,856- 571	Uova da proprietà private, a differenti distanze da un centro fluorochimico	Lasters et al., 2024
Cina [§]	128	128	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD ⁵⁰ - 1061,700	Uova da allevamenti di polli e da allevamenti all'aperto (tuorlo, albume e uovo intero), prelevate nelle vicinanze di un centro fluorochimico	Wang et al., 2019
Australia [§]	8	8	n.d.	n.d.	n.d.	320-1700	Uova allevate presso caserme dei pompieri	Mesfin Tefera et al., 2022
Belgio [§]	87	87	n.d.	n.d.	n.d.	0,400- 3472,800	Uova domestiche prelevate in varie località (anche nelle vicinanze di un centro fluorochimico)	D'Hollan der et al., 2011 ⁵¹
Stati Uniti d'America	5	n.d.	0,000	-	-	<LoD ⁵²	Uova pronte per il consumo (bollite)	FDA, 2021- 2024

⁵⁰ Il LoD riferito alla matrice “tuorlo” è pari a 0,02 ng/g, mentre quello riferito alla matrice “albume” è pari a 0,002 ng/g.

⁵¹ Il range è riferito alle medie (n=3 per città campionata), non ai valori puntuali.

⁵² I valori di LoD sono variati negli anni di analisi dei campioni (0,036 ng/g; 0,028 ng/g; 0,082 ng/g).

Tabella 22 – Sommario della letteratura (2010-2025) sulle concentrazioni di PFOS (ng/g peso fresco) nel latte.

Area Geografica	<i>n</i>	<i>N</i>	Media L.B. ^a	Media M.B. ^b	Media U.B. ^c	Min-Max ^d	Matrice	Rif. ^e
Spagna	2	24	0,000	0,003	0,007	<LoD (0,007)	Latte (intero e parzialmente scremato)	Domingo et al., 2012
Paesi bassi	8	8	0,004	0,004	0,004	0,003-0,006	Latte vaccino parzialmente scremato, da supermercati, negozi specializzati e mercati locali	RIVM, 2023
Uganda	1	1	0,004	0,004	0,004	0,004	Latte bovino	Sadia et al., 2020
Svezia	3	10-25*	0,000	0,005	0,009	<LoD (0,004)-<LoQ (0,012)	Latte fresco di vacca, da cisterne di stoccaggio di aziende lattiero-casearie	Johansson et al., 2014
Svezia	3	3	0,005	0,005	0,005	0,005-0,006	Latte bovino da mercati locali	Sadia et al., 2020
Germania	4	4	0,003*	0,005*	0,007*	<LoD (0,007)-0,009*	Latte crudo (3,5% grassi), latte fresco (1,5% grassi), latte fresco intero, latte UHT	Still et al., 2013 ⁵³
Norvegia	1	3	0,007	0,007	0,007	0,007	Latte da negozi di alimentari	Haug et al., 2010 ⁵⁴
Isole Faroe	6	6	0,008	0,008	0,008	0,004-0,012	Latte di vacca crudo, latte magro (0,5% di grasso) e latte parzialmente scremato (1,5% di grasso)	Eriksson et al., 2013 ⁵⁵
VENETO_Media Intensità	6	6	0,005	0,009	0,013	<LoQ (0,010)- 0,030	Latte crudo da allevamenti bovini misti	
Paesi Bassi	1	n.d.	0,010	0,010	0,010	0,010	Latte parzialmente scremato proveniente da	Noorlander et

⁵³ I valori medi (LB, MB, UB) e massimo (>LoD ma <LoQ, con LoQ non disponibile) sono stimati. Solo un campione corrispondente alla matrice “latte UHT” è stato quantificato (0,005 ng/g).

⁵⁴ Valori osservati in presenza di basse percentuali di recupero (15%).

⁵⁵ I risultati si riferiscono al solo isomero in forma lineare (L-PFOS). In 4/6 campioni, l'analita non è stato confermato dallo ione qualificatore.

							negozi al dettaglio con copertura nazionale	al., 2011 ⁵⁶
Stati Uniti d'America	1	10	0,000	0,010	0,020	<LoD (0,020)	Latte intero da negozi di alimentari	Schechter et al., 2010
Cina §	92	92	n.d.	0,020	n.d.	<LoD (0,010)-0,160	Latte bovino crudo da diverse località tra cui aree fortemente industrializzate (trattamenti tessili, placcatura di metalli e produzione schiume antiincendio)	Xiao et al., 2024
Australia	16	48	0,000	0,025	0,050	<LoD (0,050)	Latte intero	FSANZ, 2021
VENETO_Alta Intensità	7	7	0,024	0,026	0,027	<LoQ (0,010)- 0,070	Latte crudo da allevamenti bovini misti	
Senegal	1	1	0,027	0,027	0,027	0,027	Latte bovino	Sadia et al., 2020
Brasile	1	1	0,034	0,034	0,034	0,034	Latte bovino	Sadia et al., 2020
Francia	38	570	0,000	0,036	0,071	<LoD (0,071)	Latte (intero, scremato, parzialmente scremato)	ANSES, 2011
Regno Unito	1	44	0,050	0,050	0,050	0,050	Latte (1,97% grasso)	FERA, 2012
Stati Uniti d'America §	61	61	0,003	0,067	0,130	<LoD (0,130)-0,160	Latte crudo di vacca da fattorie e latte intero pastorizzato da negozi (due campioni di latte crudo provenivano da una fattoria che aveva applicato fanghi di depurazione contenenti PFAS ai loro campi)	Young et al., 2012
Kenya	1	1	0,090	0,090	0,090	0,090	Latte bovino	Sadia et al., 2020
Belgio §	6	n.d.	n.d.	0,300	n.d.	<LoQ (0,590)-0,640	Latte da fattorie di varie località (nello studio un	Cornelis et al.,

⁵⁶ 0,010 ng/g è il risultato medio di due misurazioni separate fatte sullo stesso campione.

							numero limitato di campioni proviene da zone nei pressi di un centro fluorochimico)	2012
Regno Unito	11	11	0,000	0,500	1,000	<LoD (1,000)	Latte da supermercati grandi e piccoli e negozi indipendenti	Clarke et al., 2010
Italia	4	16-20*	0,360	n.d.	n.d.	<LoD (0,500)-n.d.	Latte da supermercato	Guerranti et al., 2013
Africa, Asia, GRULAC	7	7	0,022	n.d.	n.d.	<LoD ⁵⁷ - 0,074	Latte da mercati locali e supermercati	Fiedler et al., 2022
Cina	84	84	0,024	n.d.	n.d.	<LoD (0,005)-0,695	Latte bovino da mercati (intero e scremato)	Wang et al., 2010a
Grecia	21	21	0,070	n.d.	0,520	<LoQ (0,500)-0,730	Latte di vacca e di pecora	Kedikoglou et al., 2019
Polonia	38	38	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,001)-0,003	Latte bovino crudo	Mikołajczyk et al., 2023
Germania	10	10	n.d.	n.d.	n.d.	<LoQ (0,001)-0,013	Latte crudo e un prodotto da latte	Aßhoff et al., 2024
Repubblica Ceca, Italia, Belgio, Norvegia, Paesi Bassi	8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,005-0,031	Latte vaccino intero UHT e latte vaccino scremato UHT da supermercato	Hlouskova et al., 2013 ⁵⁸
Italia	67	67	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,005)-0,097	Latte bovino intero, scremato, biologico, crudo e di alta qualità	Barbarossa et al., 2014 ⁵⁹
Cina §	46	46	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,010)-0,120	Latte vaccino (delle grandi marche)	Yu et al., 2015
Cina §	115	479-934*	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,010)-0,173	Latte crudo di vacca proveniente da fattorie e da negozi di vendita al dettaglio (prodotto)	Xing et al., 2016

⁵⁷ I valori di LoQ riferiti all'isomero lineare (L-PFOS) e all'isomero ramificato (Br-PFOS) sono pari a 0,006 ng/g e 0,001 ng/g, rispettivamente.

⁵⁸ Il range riportato comprende anche i valori di PFBA.

⁵⁹ Latte di alta qualità, in accordo con il Decreto Ministeriale 185/91.

							localmente) presso zone maggiormente o meno industrializzate (industrie chimiche e petrolchimiche), anche in vicinanza ad una città nella quale erano frequentemente utilizzati PFAS come additivo per la pulizia di un'industria petrolchimica	
Polonia	5	≥5*	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD (0,004)-0,470	Latte (1,5% grasso) da mercati	Sznajder - Katarzyńska et al., 2019
Cina §	107	107	n.d.	n.d.	n.d.	<LoD- 1,150 ⁶⁰	Latte crudo bovino da differenti località, tra queste una è collocata nelle vicinanze di un fiume che riceve emissioni da parte di un centro fluorochimico e un'altra è una località di produzione dell'acciaio	Liu et al., 2022
Stati Uniti d'America	15	n.d.	0,000	-	-	<LoD ⁶¹	Latte parzialmente scremato (2%), latte intero, latte scremato	FDA, 2021-2024

⁶⁰ Valore in peso fresco calcolato assumendo l'87,5% di umidità.

⁶¹ I valori di LoD sono variati negli anni di analisi dei campioni (0,036 ng/g; 0,028 ng/g; 0,024 ng/g).