

NUOVI ORIZZONTI PER IL RECUPERO SOSTENIBILE DEI FANGHI BIOLOGICI IN AGRICOLTURA
9 MAGGIO 2025 Palazzo Lombardia, Sala Belvedere «Silvio Berlusconi», Piazza Città di Lombardia, Milano

L'approccio modellistico: luci e ombre

Dott. Angelo Vittorio Berri e Dott. Filippo Robbiati



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



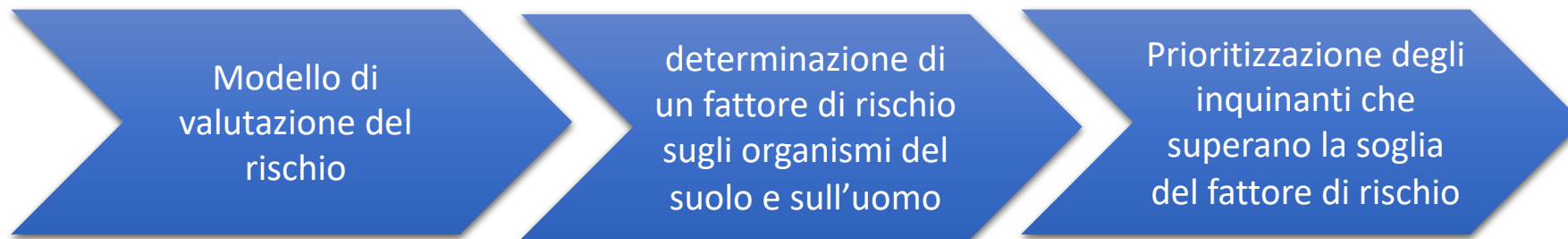
Regione
Lombardia



La necessità di uno studio specifico sui Modelli di Valutazione del Rischio

Una prima proposta di un modello di valutazione del rischio applicato ai fanghi di depurazione è stata formulata dal JRC, Centro Comune di Ricerca (Huygens D., García-Gutierrez P., Orveillon G., Schillaci C., Delre A., Orgiazzi A., Wojda P., Tonini D., Egle L., Jones A., Pistocchi A. & Lugato E, **Screening risk assessment of organic pollutants and environmental impacts from sewage sludge management** - Study to support policy development on the Sewage Sludge Directive (86/278/EEC), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/541579, JRC129690).

Nel Rapporto citato sono stati presi in considerazione ben 1350 potenziali contaminanti dei fanghi di depurazione, per tutti questi composti è stata effettuata una valutazione preliminare, in base alla quale sono stati individuati i composti sui quali approfondire l'indagine mediante l'applicazione di un Modello di Valutazione del Rischio.



La necessità di uno studio specifico sui Modelli di Valutazione del Rischio

Tra tutti i composti considerati nel Rapporto, il JRC ne individua 29 prioritari, ovvero che potrebbero essere in grado di porre un rischio per la salute degli organismi del suolo o per la salute umana, questi composti possono essere classificati come segue:

- **i prioritari con RCR >> 1:**

1. Alcani policlorurati: (SCCPs e MCCPs)
2. Diossine/Furani e PCB DL
3. PFAS: (PFOA, PFHxS, PFNA e PFOS)
4. IPA: (BbFA, CHR, BaP, BaA)

- **i composti con RCR >1:**

1. Alchil fenoli: (4- nonilfenolo e 4 terzottilfenolo)
2. Esteri dell'Ac. Ftalico: (DEHP, DINP)

- **i composti con RCR <1**

Ritardanti di Fiamma, Policloronaftaleni, Composti organostannici e Polidimetil silossani

Cosa è stato fatto:
E' stata incaricata una Società specializzata in Modelli ambientali della compilazione del Modello così come indicato al capitolo 13.1 della pubblicazione (Risk screening model calculations).

13 Supplementary information – screening risk assessment

13.1 Risk screening model calculations

13.1.1 Soil model

13.1.1.1 Initial concentration in soil after a single application

$$C_{soil_{initial}} = \frac{Application\ rate * 1000}{DEPTH_{soil} * RHO_{soil} * 10\ 000}$$

Equation 1

Explanation of symbols			
DEPTHsoil	Mixing depth of soil	[m]	0.20
RHOsoil	Bulk density of wet soil	[kg m _{wwt} ⁻³]	1700
Application rate	Application rate for the pollutant	[g ha ⁻¹]	Input
10 000	Area of 1 ha	[m ²]	

Il Modello utilizzato dal JRC

La valutazione dell'esposizione ambientale locale è stata effettuata sulla base di uno strumento sviluppato dall'**Associazione Europea per la Protezione delle Colture (ECPA)**, il quale è stato ulteriormente adattato e convalidato dal JRC.

Lo strumento per l'ambiente locale **LET, Local Environment Tool** viene menzionato nel documento di orientamento REACH R.16 per mettere a punto i modelli per la valutazione delle sostanze (EUSES), poiché questi non tengono conto dei rilasci intermittenti diretti nel suolo in una valutazione locale.

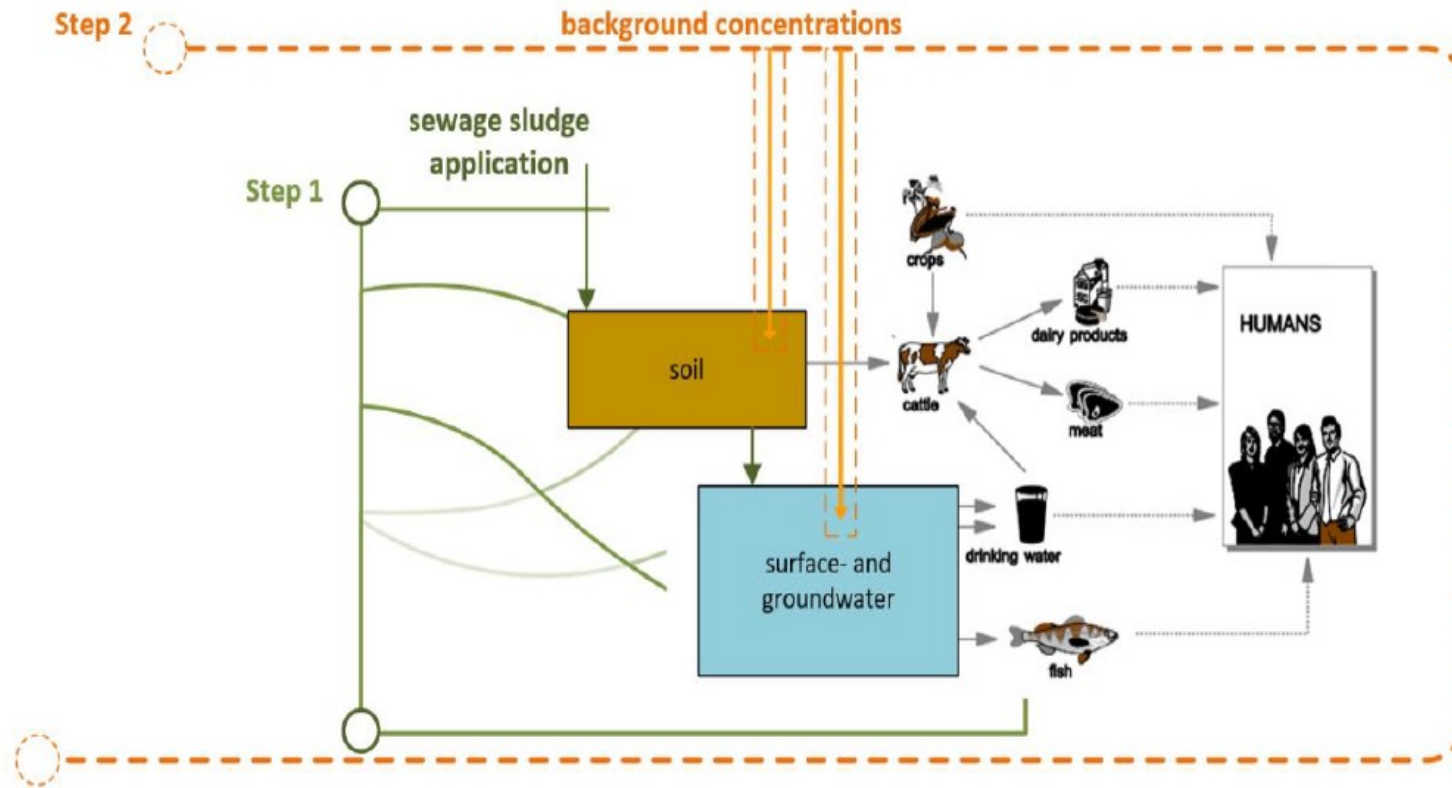
Espressione dei risultati

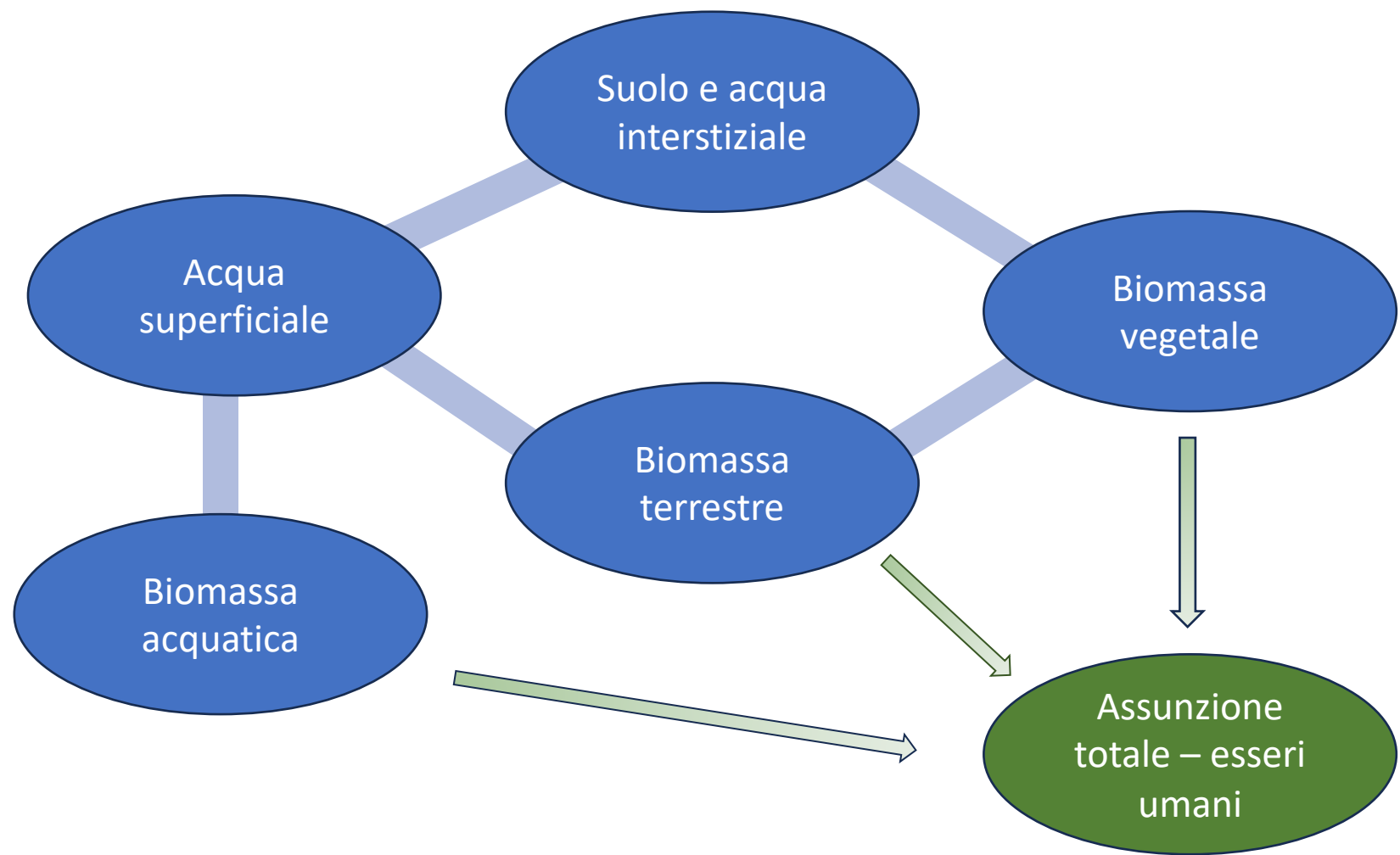
$$RCR_{soil} = \frac{PEC_{soil}}{PNEC_{soil}}$$

$$RCR_{human} = \frac{\left(\frac{TDI}{B_w}\right)}{SLHC}$$

In entrambi i casi il rapporto riflette il confronto tra il valore di concentrazione predetto dal modello e una soglia limite, $RCR > 1$, oltre la quale si sviluppano effetti di tossicità.

Se il rapporto di caratterizzazione del rischio nello **Step 1** è > 1 si procede a integrare i calcoli con dati di letteratura, dove disponibili, e con concentrazioni ambientali di fondo. Questo passaggio costituisce il secondo step del modello **Step 2**. Nello Step 1 inoltre il RCR è calcolato sulla base di uno scenario di medio termine (10 anni di applicazione), mentre nello step 2 si considerano anche uno scenario a breve (1 anno) e lungo termine (100 anni).





Foglio di calcolo: costanti

	A	B	C
1	Name	Value	U.M.
2	DEPTHsoil	0,2	m
3	Application rate (dw)	5	ton
4	Kas _{air}	90,72	//
5	F inf _{soil}	0,25	//
6	RAINrate	0,00192	m/d
7	Napp	10	//
8	t	180	d
9	R	8,314	(Pa*m ³)/(mol*K)
10	TEMP	285	K
11	Foc _{solid}	0,02	//
12	Fair _{soil}	0,2	//
13	Fwater _{soil}	0,2	//
14	Fsolid _{soil}	0,6	//
15	RHO _{solid}	2500	kg/m ³
16	RHO _{soil}	1700	kg/m ³
17	FW Ratio	10	//
18	Water Depth	30	cm
19	Eff Sed Depth	1	cm

Foglio di calcolo: dati di input

	A	G	H	I	J
1	Class	Chrysene	Benzo(a)pyrene	Benzo(a)anthracene	2,3,7,8-tetrachlorodibenzo p-dioxin
2	Csludge (g*kg ⁻¹ dm)	2,02E-03	1,48E-03	1,83E-03	1,00E-08
3	MW (g mol ⁻¹)	228,30	252,32	228,30	321,98
4	SOL(TEMP _{env}) [mg L ⁻¹]	2,00E-03	3,80E-03	0,01	0,02
5	VP(TEMP _{env}) (Pa)	8,40E-07	7,30E-07	2,80E-05	2,00E-07
6	Kow (log 10)	5,73	6,5	5,61	6,8
7	Koc (L kg ⁻¹)	200000	890000	790000	3980000
8	PNECaqua (µg L ⁻¹)	0,03	0,07	0,013	3,1E-09
9	PNECsoil (mg kg ⁻¹ ww)	0,108	1,1	0,0459	1,37E-07
10	Half-life in soil (days)	1241	1241	1241	3650
11	Half-life in water (days)	527292	527292	527292	263646
12	PEC regional in soil - no background conc.	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
13	PEC regional in surface water - no background conc.	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
16	BCF _{shoot-soil} (mg kg ⁻¹ plant ww)/(mg kg ⁻¹ soil ww)				
17	BCF _{root-soil} (mg kg ⁻¹ plant ww)/(mg kg ⁻¹ soil ww)				
18	BCF _{fish} [L kg _{wetfish} ⁻¹]				
19	BTF _{meat} (mg kg ⁻¹)/(mg d ⁻¹)				
20	BTF _{milk} (mg kg ⁻¹)/(mg d ⁻¹)				
21	BMF (biomagnification factor in fish)	10	10	10	10
22	Tolerable daily intake (EFSA. mg/kg bw)	8.50E-06	8.50E-06	8.50E-06	2.86E-10

Foglio di calcolo: risultati

	A	B	C	D	E	F
1	Formule	PFOA	PFNA	PFOS	PFHxS	Benzo(b)fluoranthene
2	Eq App rate for coformulant (g/ha)	1,90E-02	1,30E-02	2,33E-01	3,10E-03	9,60E+00
3	C _{soil} initial (mg/kg)	5,59E-06	3,82E-06	6,84E-05	9,12E-07	2,82E-03
4	K _{biosoil}	6,93E-07	6,93E-07	6,93E-07	6,93E-07	2,95E-04
5	K _{asI} _{soil}	1,32E-04	9,10E-05	3,62E-06	5,18E-06	1,69E-05
6	K _{volat}	5,97E-04	4,55E-04	2,00E-07	2,58E-05	2,74E-05
7	K _{leach}	6,59E-04	3,12E-04	1,27E-05	2,01E-05	5,71E-08
8	K	1,26E-03	7,67E-04	1,36E-05	4,66E-05	3,22E-04
9	C _{soil} max	1,50E-05	1,47E-05	6,69E-04	8,46E-06	1,76E-02
10	TWAC _{soil(t)}	1,35E-05	1,37E-05	6,68E-04	8,42E-06	1,71E-02
11	SOL(temp) _{env}	8,47E+03	7,84E-01	4,63E+02	2,05E+03	1,07E-03
12	VP(temp) _{env}	2,36E+00	2,87E+00	1,85E-04	3,31E+01	3,77E-05
13	HENRY (Pa*m^3)/mol	1,15E-01	1,70E+03	2,00E-04	6,46E+00	8,89E+00
14	K _{air-water}	4,87E-05	7,16E-01	8,45E-08	2,73E-03	3,75E-03
15	K _p _{soil}	2,30E+00	4,90E+00	1,26E+02	7,96E+01	2,80E+04
16	K _{soil-water}	3,64E+00	7,69E+00	1,90E+02	1,20E+02	4,20E+04
17	C _{liq} (milligrammi)	6,28E-06	3,03E-06	5,99E-06	1,20E-07	6,92E-07
18	Eq Rate Runoff Event	1,90E-02	1,30E-02	2,32E-01	3,10E-03	9,58E+00
19	Input Runoff (milligrammi/m^2)	9,50E-04	6,50E-04	1,16E-02	1,55E-04	4,79E-01
20	F.....runoff	8 67E-01	7 54E-01	1 06E-01	1 59E-01	5 35E-04

I dati che seguono non sono da assumersi come Valutazione di Rischio, sono da riferirsi unicamente al confronto tra i risultati pubblicati nelle conclusioni del documento JCR e a quelli da noi prodotti ricalcolando il modello. Questi ultimi sono da qui in poi nominati con la dicitura 13.1, dal numero del capitolo riservato alle conclusioni nel documento JRC.

Vengono inoltre riportate le variazioni di RCR applicando al modello 13.1 i valori di concentrazione degli inquinanti evidenziati nel Convegno odierno



Evento connesso al 6° Forum Regionale
per lo Sviluppo Sostenibile
Transizione Climatica: la nuova strada della Lombardia



**Sostenibilità
in Lombardia**



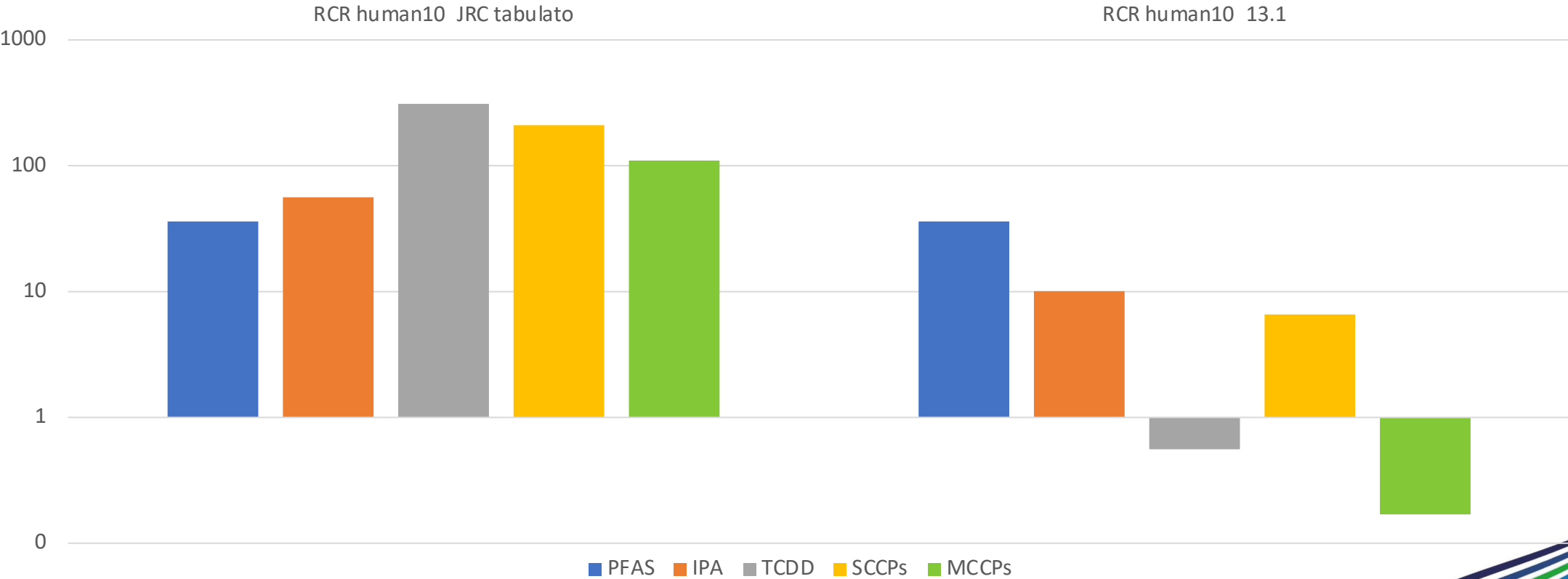
**Regione
Lombardia**

Alcune evidenze emerse dal confronto tra quanto pubblicato dal JRC ed i risultati del Modello 13.1 a 10 anni

	PFOA	PFNA	PFOS	PFHxS	B(a)P	Chrysene	B(a)P	B(a)A	TCDD ⁽¹⁾	SCCPs	MCCPs
Conc. input (g/kg ss)	6,70E-06	4,60E-06	6,64E-05	1,40E-06	1,92E-03	2,02E-03	1,48E-03	1,83E-03	1,00E-08	1,00E-01	1,00E-01
RCR soil ₁₀ JRC tabulato	7,00E-02	5,80E-03	3,30E+00	1,50E-04	2,10E-02	1,90E-01	1,30E-02	1,00E-01	6,20E-01	1,30E+00	1,30E+00
RCR soil ₁₀ 13.1 ricalcolato	2,10E-03	2,10E-03	3,66E-01	1,70E-03	6,68E-02	1,73E-01	1,24E-02	3,68E-01	7,19E-01	2,79E-01	1,37E-01
RCR human ₁₀ JRC tabulato	3,60E+01				5,60E+01				3,10E+02	2,10E+02	1,10E+02
RCR human ₁₀ 13.1 ricalcolato	3,61E+01				1,01E+01				5,60E-01	6,59E+00	1,70E-01

Nota ⁽¹⁾: la TCDD è usata come composto di riferimento per la classe delle diossine/furani e PCB DL; il Rapporto JRC assume pertanto una tossicità equivalente (TEQ) dell'intero gruppo corrispondente a 10 ng/kg ss di TCDD.

Confronto grafico tra quanto pubblicato dal JRC ed i risultati del Modello 13.1 a 10 anni



Evidenze emerse dal confronto tra i risultati conseguiti dal JRC e quanto è emerso compilando il Modello 13.1

I risultati riportati sono riferiti a 4 classi di composti, ovvero PFAS, IPA, D/F e PCB DL, SCCPs /MCCPs, che gli Autori della ricerca hanno individuato come **inquinanti organici prioritari presenti nei fanghi**.

Il confronto tra i risultati riportati nel Rapporto ed i risultati conseguiti con la compilazione del Modello descritto al punto 13.1 della pubblicazione (che chiameremo Modello 13.1) **non convergono tra loro nel dare un risultato univoco:**

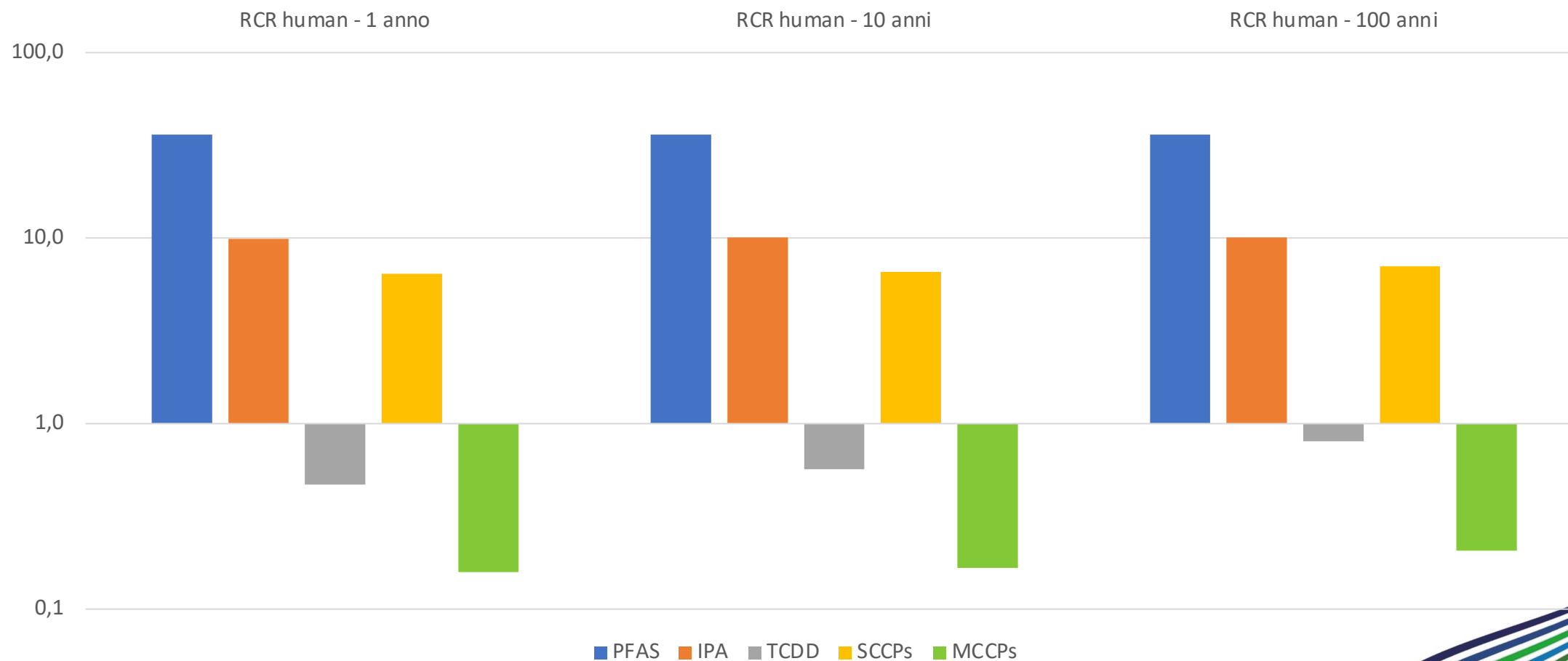
- I valori di RCR_{soil} per gli organismi del suolo divergono tra loro, anche se l'ordine di grandezza è spesso rispettato;
- Il valore di RCR_{human} risulta per i PFAS coerente tra quanto riportato nella pubblicazione e quanto emerge dall'applicazione del modello 13.1. Per gli IPA l' RCR_{human} risulta circa 5 volte inferiore nel Modello 13.1 rispetto al valore riportato nella pubblicazione. Per le diossine/furani e alcani policlorurati la differenza è di 2-3 ordini di grandezza inferiore nel Modello 13.1 rispetto agli RCR_{human} pubblicati.
- **Di queste discrepanze abbiamo dato tempestiva comunicazione agli Autori della ricerca fornendo loro anche il foglio di calcolo del Modello da noi compilato seguendo quanto riportato nel capitolo 13.1.**

Risultati della compilazione del Modello 13.1 utilizzando le concentrazioni proposte dal JRC e le concentrazioni degli inquinanti determinati nella presente ricerca

Modello previsionale di rischio - 13.1	PFOA	PFNA	PFOS	PFHxS	B(a)P	Chrysene	B(a)P	B(a)A	TCDD	SCCP	MCCP
Conc. iniz. JRC (g/Kg ss)	6,70E-06	4,60E-06	6,64E-05	1,40E-06	1,92E-03	2,02E-03	1,48E-03	1,83E-03	1,00E-08	1,00E-01	1,00E-01
RCR soil - 1,10,100 anni – conc. JRC Mod. 13.1	8,56E-04	5,92E-04	3,74E-02	1,82E-04	1,10E-02	2,74E-02	1,97E-03	5,84E-02	8,49E-02	2,83E-02	1,39E-02
	2,30E-03	2,28E-03	3,66E-01	1,69E-03	6,84E-02	1,76E-01	1,27E-02	3,76E-01	7,24E-01	2,54E-01	1,27E-01
	2,33E-03	2,42E-03	2,96E+00	8,83E-03	9,90E-02	2,67E-01	1,93E-02	5,68E-01	2,30E+00	1,08E+00	6,16E-01
RCR human - 1,10,100 anni – conc. JRC Mod. 13.1	3,61E+01				9,93E+00				4,70E-01	6,44E+00	1,58E-01
	3,61E+01				1,01E+01				5,67E-01	6,57E+00	1,67E-01
	3,61E+01				1,01E+01				8,02E-01	7,05E+00	2,07E-01
Conc. iniz. Ricerca (g/Kg ss)	6,30E-07	7,00E-07	7,03E-06	6,60E-07	2,10E-05	2,40E-05	7,50E-06	2,50E-05	1,00E-08	5,00E-04	2,00E-03
RCR soil - 1,10,100 anni – conc. Ricerca Mod.13.1	8,05E-05	9,01E-05	3,96E-03	8,58E-05	1,20E-04	3,25E-04	9,98E-06	7,97E-04	8,49E-02	1,41E-04	2,77E-04
	2,17E-04	3,46E-04	3,87E-02	7,96E-04	7,48E-04	2,10E-03	6,45E-05	5,14E-03	7,24E-01	1,27E-03	2,54E-03
	2,19E-04	3,69E-04	3,13E-01	4,16E-03	1,08E-03	3,17E-03	9,78E-05	7,76E-03	2,30E+00	5,42E-03	1,23E-02
RCR human - 1,10,100 anni – conc. Ricerca Mod. 13.1	2,50E+01				1,01E-01				4,70E-01	3,22E-02	3,16E-03
	2,50E+01				1,03E-01				5,67E-01	3,29E-02	3,35E-03
	2,50E+01				1,03E-01				8,02E-01	3,52E-02	4,14E-03

I risultati sono assunti rispettivamente a partire dalle concentrazioni iniziali riportate nel 13.3 del documento (JRC) e dalla campagna di monitoraggio della presente Ricerca.

Risultati della compilazione del Modello 13.1 utilizzando le concentrazioni proposte dal JRC



Risultati della compilazione del Modello 13.1 utilizzando le concentrazioni degli inquinanti determinati nella presente ricerca



Si segnala, come da tabella precedente, a proposito dei PFAS, il comportamento anomalo dovuto al fatto che per le concentrazioni inferiori l'RCR_{soil} varia significativamente, mentre l'RCR_{human} resta invariato a 1, 10 e 100 anni.

Risultati della compilazione del modello

Occorre premettere che le concentrazioni effettivamente determinate nella ricerca che viene presentata oggi sono significativamente inferiori ai valori assunti dal JRC nella propria pubblicazione, ad eccezione del TCDD.

Applicando il Modello 13.1 rispettivamente con le concentrazioni indicate dal JRC e con le concentrazioni determinate nella ricerca attuale emerge che:

- Utilizzando i dati JRC si evidenziano due superamenti ($RCR_{soil} > 1$) per TCDD e SCCPs, e tre superamenti ($RCR_{human} > 1$) per PFAS, IPA e SCCPs.
- Utilizzando i dati della ricerca non si evidenzia nessun superamento ($RCR_{soil} > 1$) e un solo superamento ($RCR_{human} > 1$) per i PFAS.

Dai grafici risulta inoltre evidente che, nel modello 13.1 compilato, il fattore di rischio rimanga quasi costante. Nei PFAS si nota una variazione tra il corto e il medio scenario negli RCR suolo, che non si riflette negli RCR umani.

In conclusione: le problematiche emerse

- **La necessità di una condivisione completa e digitale degli algoritmi che compongono il modello per permettere una sua immediata replicabilità e per contenere il più possibile il rischio di errori nel suo utilizzo.**
- Migliorare il database ecotossicologico, tossicologico e dei parametri chimico-fisici dei contaminanti prioritari.
- Affrontare l'incertezza sulle concentrazioni reali degli inquinanti organici presenti nei fanghi di depurazione.
- Individuare quali parametri in input al modello abbiano un peso maggiore nella definizione del risultato finale, in modo da ottimizzare le risorse spese per affinare il modello

In conclusione: le potenzialità

- **Validazione del Modello:** Il modello fornisce una concentrazione presunta degli inquinanti nei diversi comparti ambientali, il che dovrebbe essere verificato con dati sperimentali, conferendo attendibilità al modello stesso, in modo tale di poter disporre di un modello robusto, affidabile e di ampio utilizzo.
- L'utilizzo di un modello di calcolo standardizzato potrebbe fornire un ulteriore indice della qualità dei fanghi ad uso agricolo e potrebbe rappresentare uno strumento di pronto impiego per la valutazione preliminare di nuovi inquinanti emergenti.
- A seconda delle proprietà chimico-fisiche e tossicologiche delle sostanze organiche presenti nei fanghi si potrebbero individuare eventuali strategie di mitigazione del rischio.

Una prima criticità che potrebbe emergere applicando il modello JRC così come viene proposto



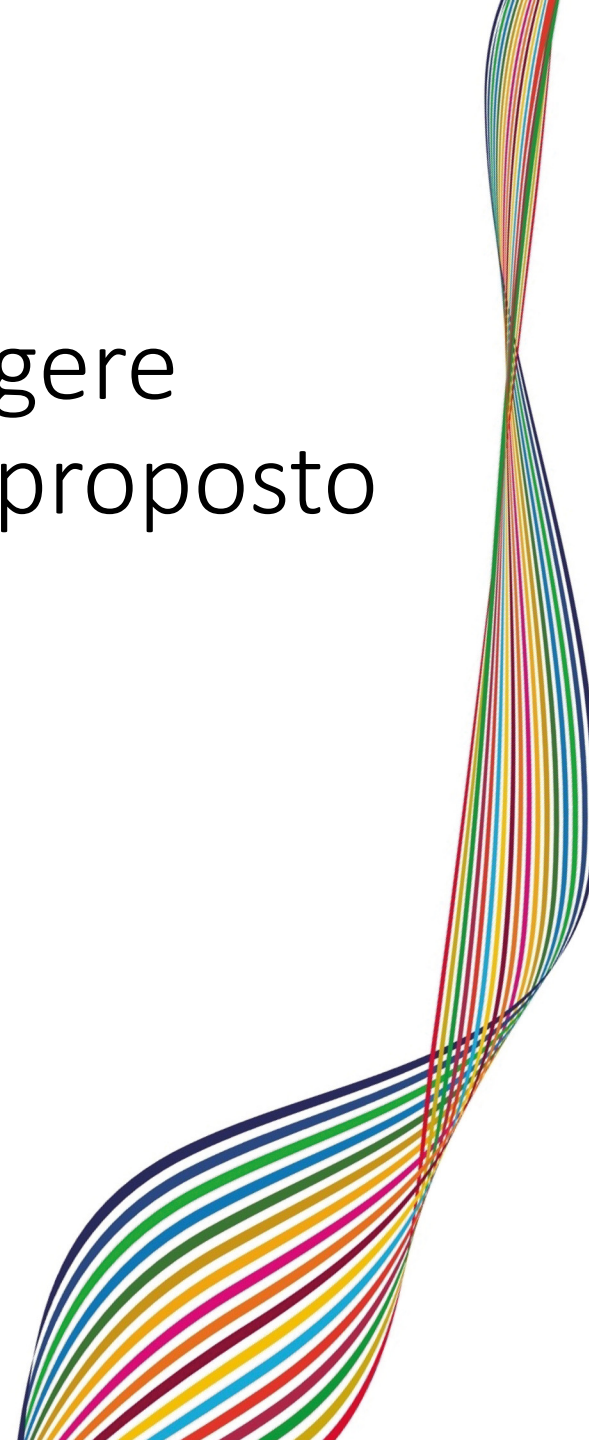
Evento connesso al 6° Forum Regionale
per lo Sviluppo Sostenibile
Transizione Climatica: la nuova strada della Lombardia



**Sostenibilità
in Lombardia**



**Regione
Lombardia**



Classe di Composti	Conc. presente nel rapporto JRC ng kg ss-1 TCDD WHO TEQ	Modello JRC RCR ₁ , RCR ₁₀ , RCR ₁₀₀	Modello 13.1 RCR ₁ , RCR ₁₀ , RCR ₁₀₀	Conc. media della ricerca ng kg ss-1 TCDD WHO TEQ	SD
PCDD/F PCB DL	10	2,7	0,47	6,4	5,3
		310	0,57		
		350	0,80		

Legge 16 novembre 2018 n. 130

PCDD/ PCDF + PCB DL

≤25 (ng WHO-TEQ/kg ss

DLgs 152/2006

Diossine /Furani concentrazione soglia nel suolo

Residenziale 10 ng TE/kg ss

Industriale 100 ng TE/kg ss

Ecotoxicological assessment of waste-derived organic fertilizers and long-term monitoring of fertilized soils using a multi-matrix and multi-species approach

Federica Carraturo^{a,b,1}, Antonietta Siciliano^{a,b,1}, Andrea Giordano^{c,*}, Francesco Di Capua^d,
Federica Barone^e, Elisa Casaletta^e, Flavia Cicotti^a, Marco Guida^{a,b,1}, Fabrizio Adani^{f,1}

Composto		Urea	Liquami Suinicoli	Compost da rifiuti organici	Letame Bovino	Digestato anaerobico termofilo da fanghi
PCDD/PCDF +PCB DL	ng/kg ss	5,26	13,4	8,23	8,77	9,3

Conclusioni

Disporre di un modello accurato e robusto per la valutazione del rischio connesso con l'utilizzo agricolo dei fanghi è senz'altro un'ipotesi affascinante che potrà fornirci in futuro preziosi elementi di conoscenza.

Grazie al Rapporto JRC 129690 questo lavoro è stato iniziato.

Molto rimane ancora da fare: scegliere le equazioni che meglio descrivano i fenomeni considerati, incrementare le informazioni chimico-fisiche delle molecole di interesse ed ampliare ulteriormente le conoscenze tossicologiche ed eco-tossicologiche dei diversi composti.