



DIREZIONE SCIENTIFICA

Borsa di Studio

Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

Relazione

Direttore Scientifico
Dr. Massimo Blonda

Responsabile. UOC Acqua e Suolo
Dr. Domenico Gramegna

Borsista
Dr.ssa Francesca Di Gioia

Sommario

Introduzione	3
1. Definizione e individuazione degli indicatori biologici	5
2. Casi-studio e attività inerenti alla borsa di studio	7
3. Cenni sui tipi e sui livelli di interconnessione tra i contaminanti e gli indicatori biologici.	24
4 Individuazione degli indicatori biologici trattati negli studi di Arpa Puglia.....	34
Conclusioni	49

Introduzione

Il lavoro di ricerca, oggetto della borsa di studio in esame, mira ad individuare e definire gli specifici indicatori biologici da applicare ai fini della valutazione della compatibilità ambientale degli impianti di produzione a energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti da svolgere presso Arpa Puglia. Per il raggiungimento di tale obiettivo, sono stati di grande utilità, studi e documenti redatti in campo ambientale a cura di Arpa Puglia, che hanno fatto riferimento agli indicatori ambientali di tipo chimico, biologico, fisico nonché a parametri valutativi di tipo tecnico.

Il legame tra gli studi suddetti, di cui si parlerà sinteticamente in seguito, e l'attività della borsa di studio sta nell'individuazione degli indicatori biologici più specifici da applicare, appunto, alle valutazioni ambientali.

In riferimento a quanto detto, si citano lo studio VAI AV (Valutazione Ambientale di Incidenza di Area Vasta) relativo alla centrale turbogas "Sorgenia Puglia SpA" e le Linee Guida Territoriali per la valutazione della Compatibilità Ambientale degli impianti a fonti energetiche rinnovabili (c.d. FER) a biomassa e fotovoltaici.

Importante è, altresì, la relazione tra i bioindicatori e gli indicatori ambientali di tipo chimico, fisico e i parametri valutativi di natura tecnica; infatti, l'attività della borsa è stata incentrata complessivamente in uno studio trasversale per la valutazione degli effetti sull'ambiente degli impianti in esercizio.

Arpa Puglia ha collaborato con CNR-IRSA, Regione Puglia e Università degli Studi di Bari alla ricerca di bioindicatori applicabili ai fini delle bonifiche ambientali, es. bioindicatori per bonifica da rifiuti pericolosi contenenti idrocarburi – caso studio "Recupero ambientale Alta Murgia (BA)", con esiti positivi.

Inoltre, in relazione a quanto suddetto e vista la notevole attenzione posta sugli impatti causati dall'abbandono di rifiuti sul suolo, risulta utile approfondire la ricerca degli indicatori biologici, all'occasione anche empiricamente, allo scopo di determinare l'entità e

gli effetti sulla salute umana e sull'ambiente. Mediante l'Accordo di Programma Quadro stipulato tra Arpa, CNR, Regione Puglia e Forze dell'Ordine (NOE, Guardia di Finanza e Corpo Forestale dello Stato) l'Agenzia vigila sinergicamente sul territorio pugliese.

Dunque, l'individuazione dei bioindicatori rappresenta un ulteriore elemento valutativo nella fase di espressione dei pareri, per valutare e stabilire le interconnessioni esistenti tra gli indicatori biologici e gli impatti ambientali, oltre che per individuare i bioindicatori specifici per la valutazione dell'entità delle pressioni antropiche.

In riferimento ad ognuno dei succitati studi e ad altri riscontrati in letteratura che saranno menzionati nei prossimi capitoli, si illustrano gli indicatori biologici più specifici a seconda del tipo di impianto industriale esaminato. Infatti:

- per la centrale turbogas a ciclo combinato Sorgenia Puglia SpA sono stati indicati i vegetali in generale.
- per gli impianti FER, a biomassa e fotovoltaici, sono stati individuati rispettivamente le api e il lombrico.
- per il ripristino ambientale dei siti contaminati da rifiuti contenenti sostanze pericolose sono stati osservati sia le specie vegetali autoctone che le api.

1. Definizione e individuazione degli indicatori biologici

Per **indicatore biologico** si intende qualsiasi organismo vegetale e animale in grado di fornire informazioni sulla qualità dell'ambiente e sui suoi cambiamenti.

I cambiamenti ambientali si manifestano sugli organismi mediante sia reazioni identificabili di tipo ecologico, comportamentale, biochimico, fisiologico, morfologico per i bioindicatori propriamente detti, sia mediante capacità di accumulare dai diversi comparti ambientali (aria, acqua, suolo) quantità misurabili di contaminanti per i cosiddetti **bioaccumulatori** e **biomonitors**.

In generale, le caratteristiche che deve possedere un buon bioindicatore sono:

- optimum ecologico ed ampia distribuzione nell'area di studio,
- facile identificazione sistematica, buone conoscenze su anatomia,
- fisiologia ed ecologia della specie, uniformità genetica e lungo ciclo vitale (ma in casi particolari si usano anche microrganismi),
- facile reperibilità in tutte le stagioni (ma in casi particolari si usano anche organismi a ciclo stagionale),
- scarsa mobilità (stanzialità), ad eccezione dei bioindicatori su scala globale.

E', inoltre, necessario conoscere il ruolo ecologico che lo predispone all'impatto con i contaminanti e le risposte che è in grado di fornire.

Come dimostrato in vari studi e ricerche, ogni impianto industriale a energia convenzionale e rinnovabile impatta in misura maggiore su una specifica matrice ambientale.

Infatti, nei casi osservati si può affermare che la matrice colpita più pesantemente è:

- l'aria, per la centrale turbogas a ciclo combinato e per gli impianti FER a biomassa;
- il suolo, per gli impianti FER fotovoltaici.

Tra i principali impatti causati dagli insediamenti industriali in analisi si individuano: sottrazione di suolo, riduzione della fertilità del suolo, sottrazione e perdita diretta di habitat naturali, perdita di esemplari di specie di flora minacciata contenuta in Liste Rosse, sottrazione di colture agricole di pregio. Tutti principalmente inerenti all'installazione di un impianto fotovoltaico.

Relazione - Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

Per le altre due tipologie di insediamenti si osserva emissione di inquinanti atmosferici da parte della centrale contenenti acidi, ossidi di azoto, polveri e microinquinanti, l'incremento di rumore, l'impatto visivo.

2. Casi-studio e attività inerenti alla borsa di studio

Nell'ambito degli impianti di produzione di energia elettrica, l'attività della borsa di studio è stata sviluppata sulla base di ricerche e approfondimenti diretti appunto a valutare l'entità delle pressioni ambientali.

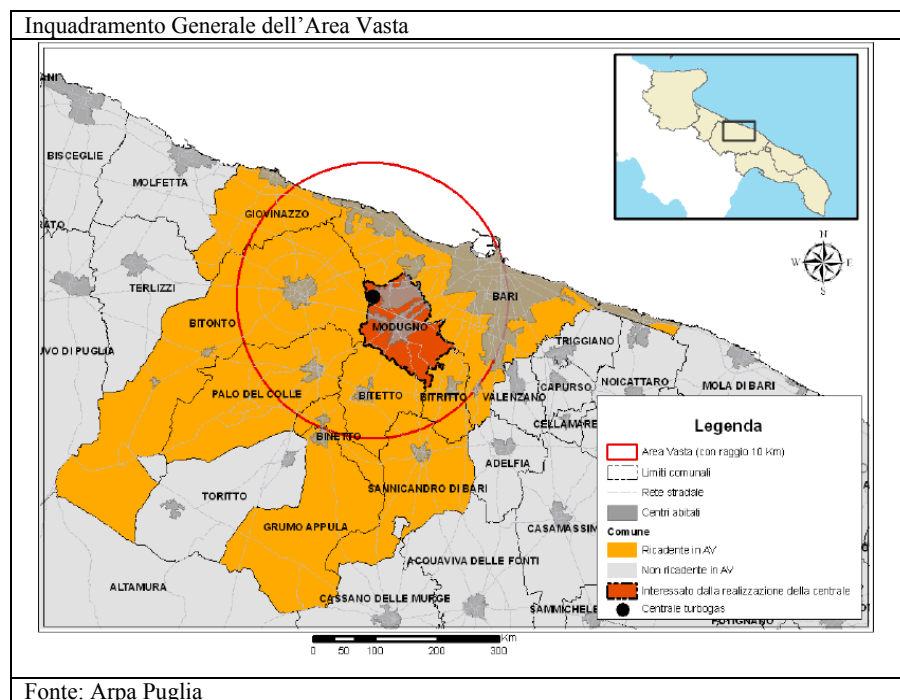
Per analizzare la qualità ambientale, si ricorre agli indicatori ambientali cioè a quegli elementi empiricamente osservabili o calcolabili che descrivono un fenomeno e il grado di vulnerabilità prevedibile dell'ambiente.

Si riportano, di seguito, schematicamente gli studi svolti da Arpa Puglia attraverso i quali sono stati presi in considerazione gli indicatori ambientali specifici per ogni matrice.

Tali studi sono stati affrontati, oltre che allo scopo di valutare la compatibilità ambientale, anche alla luce della recente normativa sulla liberalizzazione del mercato dell'energia elettrica che ha attivato una serie di proposte-progetto provenienti da società operanti nella produzione di energia elettrica per la realizzazione di centrali a tecnologia diversificata, soprattutto in siti della regione Puglia.

Studio “Valutazione Ambientale di Incidenza in Area Vasta” – CCGT

Su richiesta della Regione Puglia, Arpa ha svolto nel periodo 2007 – 2008 uno studio sulla Valutazione Ambientale di Incidenza in Area Vasta (VAIAV) di una Centrale Turbogas a Ciclo Combinato della potenza di circa 750 MW, soc. “Sorgenia Puglia SpA”, zona industriale ASI, comune



di Modugno (BA). L'AV comprendeva una superficie di raggio pari a 10 km e includeva i seguenti comuni: Modugno, Bari, Giovinazzo, Bitonto, Palo del Colle, Bitetto, Binetto, Bitritto, Sannicandro di Bari e Grumo Appula nonché una porzione di demanio marittimo, vedere figura adiacente.

In questo lavoro sono stati fissati i seguenti obiettivi:

- approfondimento analitico delle condizioni ambientali ex ante dell' A.V. trattata;
- ipotesi dell'impatto dei nuovi impianti anche tramite modelli ricavati dai dati di progetto presenti nei SIA proposti e da quelli disponibili in letteratura relativi ad impianti analoghi;
- identificazione nei progetti dei punti di debolezza (weakness) su cui intervenire a scopo preventivo per cautelarsi da possibili rischi (threats) e dei punti di forza (strength) da cui porre in essere azioni in grado di sviluppare opportunità (opportunity).

Lo studio si è articolato in 8 sessions che hanno preso in considerazione gli aspetti su cui si è ipotizzata una qualche incidenza sulla base di opportuni indicatori.

Si riporta una tabella riassuntiva degli indicatori valutati per le diverse matrici ambientali.

Matrice ambientale	Indicatori valutati per ogni matrice	Riscontro valutativo
Risorse idriche	Fabbisogno idrico complessivo	Utilizzo acque reflue provenienti dal Depuratore Bari-Ovest. In emergenza dai pozzi per un tempo non superiore alle 24 ore
	Scarichi idrici	Non presenti scarichi idrici dalle torri di raffreddamento
	Consumo e immissione nell'ambiente di additivi chimici	Non necessaria la continua iniezione di additivi chimici, poiché il ciclo è chiuso e senza reintegro di acqua
	Rischi connessi all'uso di acqua reflua	Scarsa probabilità di acqua in eccesso e nullità di rischio sanitario correlato
Sfruttamento del suolo	Rischio idrogeologico	Zona R4 e R3; Aree ad elevata probabilità di inondazione (AP) in prossimità di Lama Balice, Lama Misciano e Lama Lamasinata.
Produzione rifiuti in fase di cantiere	Rifiuti liquidi	728.000 L
	Rifiuti solidi	544.054 kg
	Rifiuti fangosi	91.650 kg
	Terre e rocce da scavo	62.989 m ³
Produzione rifiuti del ciclo produttivo	Non si ha produzione di rifiuti in quanto l'unico combustibile è il gas naturale per cui non è previsto un sistema di abbattimento fumi.	

Relazione - Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

Elementi naturalistici	Valore Ecologico Complessivo	Valore molto basso
	Sensibilità Ecologica Complessiva	Valore molto basso
	Pressione Antropica Complessiva	Valore medio – alto
	Fragilità Territoriale Complessiva	Valore basso
Campi elettromagnetici indotti e rumore	Lunghezza elettrodotto e analisi isofone	Non si evidenziano interazioni di rilievo
Qualità dell'aria	Rilevamento di CO, COV, NOX, CO ₂ , PTS	CO ₂ rappresenta il parametro prodotto in maggiore quantità.
Epidemiologia	Impatto sulla salute del NO ₂ (inquinante più significativo)	La stima dei morti in eccesso da attribuire all'NO ₂ è stata effettuata per gli intervalli di 40 µg/ m ³ , corrispondente al valore limite indicato dalle linee guida OMS, e 50 µg/m ³ , valore guida calcolato come 50° percentile delle concentrazioni medie di 1 ora rilevate durante l'anno.

In questo studio oltre alla stima degli indicatori summenzionati, sono stati approfonditi gli effetti degli impatti della centrale termoelettrica sulle componenti naturali, e precisamente le interazioni degli inquinanti atmosferici primari e secondari sulla vegetazione (dirette e indirette).

Gli indicatori biologici su cui si è posta più attenzione in tale sede, sono state la vite e l'ulivo, ed in particolare gli effetti sulle foglie.

Interessante è stato scoprire che l'olivo, coltura più abbondante in A.V., ha un'elevata capacità di assorbimento di CO₂, infatti proprio questa coltura riesce a contenere le notevoli concentrazioni atmosferiche prodotte dalla centrale stessa.

Tale risultato, però, potrà avere un maggiore riscontro in futuro, con il monitoraggio degli indicatori biologici presi in esame, olivo in primis, in relazione ai vari inquinanti atmosferici primari e secondari.

Nell'ambito della borsa di studio e in merito al lavoro suddetto, è stato approfondito con ricerche bibliografiche, proprio l'indicatore biologico "olivo" che la regione Puglia presenta in abbondanza. A titolo di esempio si cita lo studio sperimentale intitolato: "*ARTEMISIA 2 - Uno strumento per valutare gli effetti ambientali e sanitari degli inquinanti aeriformi emessi da insediamenti produttivi e per indirizzare la scelta di nuovi siti, anche ai fini dell'applicazione della direttiva 96/61 CE sulla prevenzione e riduzione integrata dell'inquinamento (IPPC)*"- ENEA, 2003- attraverso cui si è valutato l'impatto che l'O₃ (inquinante secondario prodotto dall'attività industriale) potrebbe provocare sull'olivo. In

pratica, in base a studi sperimentali effettuati in situazioni controllate su due cultivar di *Olea europaea*, L. (Minnocci et al., 1999), si è evidenziato che l'esposizione ad O₃ (100 ppb vs 3 ppb) riduce l'apertura stomatica, unica via della traspirazione, di circa il 50%. Ciò suggerisce una possibile riduzione della produttività.

Per l'olivo, e più generalmente per le colture arboree dell'area mediterranea, l'effetto dell'O₃ nella riduzione della produttività potrebbe essere critico perché tale gas potrebbe essere sistematicamente presente per un lungo periodo dell'anno nelle condizioni di temperatura e di insolazione presenti nelle nostre regioni. I risultati sperimentali ottenuti (è stato registrato un calo di attività fotosintetica pari a circa il 56% ed una diminuzione di traspirazione pari a circa il 43% dopo trattamento per 100 giorni con 100 ppb di O₃ per 5 ore/giorno) potrebbero avere importanti implicazioni ecofisiologiche perché gli stomi giocano un ruolo cruciale nel controllo dell'uso dell'acqua e della CO₂ nelle foglie dell'olivo.

Linee Guida Territoriali per la valutazione della compatibilità ambientale degli impianti di produzione di energia rinnovabile FER – impianti a energia da biomassa e da fotovoltaico.

Nell'ambito della borsa di studio si è collaborato fattivamente con il GdL di Arpa e Università del Salento alla definizione delle Linee Guida Territoriali (di seguito LGT) relative a impianti produttivi alimentati da fonti rinnovabili a biomassa e fotovoltaici, redatte in conseguenza della carenza di strumenti utili a garantire standard di processo ed ambientali efficaci, mediante uno screening sistematico delle dotazioni impiantistiche proposte e del contesto di area di localizzazione degli stessi. Tra gli obiettivi delle LGT si individua l'ausilio alla valutazione della sostenibilità ambientale dei processi, della gestione della biomassa (per gli impianti a biomassa), delle opere accessorie e preliminari necessarie al ciclo produttivo in esame.

Dunque, seguono gli indicatori considerati nelle LGT dedicate agli impianti FER – biomasse.

Si riportano, per sintesi, solo le tabelle nelle quali sono stati identificati e raggruppati in categorie (ottenute dalla suddivisione in due livelli di valutazione: primo livello - relativo all'intero impianto industriale e secondo livello - relativo alle singole matrici ambientali), i parametri valutativi o indicatori ambientali per i vari ambiti analizzati.

Per il primo livello possiamo osservare i seguenti parametri con le relative tabelle:

- i parametri di processo e organizzativi che riguardano l'individuazione della taglia e dell'organizzazione dell'impianto;

Relazione - Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

CATEGORIA	AMBITO	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE
Parametri di processo e organizzativi	Potenzialità produttiva	Potenza termica nominale dell'impianto	[MWt]	Questo indicatore è calcolato come prodotto del potere calorifico inferiore del combustibile utilizzato e della portata massima di combustibile bruciato dal singolo impianto di combustione, così come dichiarata dal costruttore.
		Potenza elettrica	[MWe]	
		Potenza calorifica di combustione	[MW]	
		Potenza termica (cogenerazione)	[MWt]	Dettagliare la potenza termica utilizzata all'interno ed all'esterno dell'impianto
		Tipologia di utilizzo del calore prodotto	%	Il riferimento è l'art. 4 comma 5 Regolamento Regionale n.12, Luglio 2008
		Potenza frigorifera (trigenerazione)	[MWf]	
		Rendimento termico lordo	%	
		Rendimento elettrico lordo	%	
		Rendimento elettrico netto	%	
	Materia Prima	Input materia prima (capacità ricettiva)	[t/h]	Confrontare con Piano di approvvigionamento
		Ore funzionamento annuo	[h/anno]	Confrontare con Piano di approvvigionamento
	Impianti primari e di servizio	Tipologia combustore	N°	Indicare la tipologia.
		Temperatura fumi all'uscita del combustore	[°C]	Indicare il dato previsto
		Sistemi di abbattimento degli inquinanti a camino	N°	Indicare la tipologia (BAT)
		Portata fumi camino	[Nm ³ /h]	
		Temperatura fumi al camino	[°C]	
		Sistema previsto di monitoraggio in continuo delle emissioni, di taratura e di trasmissione dei dati	Si/No	Indicare la tipologia e i punti di campionamento
	Sistema di gestione	ISO 14000, EMAS, etc.	Si/No	Indicare la tipologia

Relazione - Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

- le risorse energetiche che riguardano l'individuazione dei consumi di risorse energetiche provenienti da rete;

CATEGORIA	AMBITO	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE
Risorse Energetiche	Consumi da rete	Energia elettrica assorbita	[kWh/anno]	
	Consumi da combustibili	Combustibile primario (biomassa)	[t/anno]	Indicare la tipologia
			[kJ/kg]	Indicare il PCI
		Mix di combustibile primario	%	Indicare la tipologia
		Combustibile ausiliario (gas, diesel, etc.)	[t/anno]	Indicare la tipologia
			[kJ/kg]	Indicare il PCI
%	Indicare la percentuale media stimata			

- i criteri di installazione e localizzazione che riguardano l'individuazione dell'ubicazione e della tipologia dell'impianto e delle caratteristiche dell'area di insediamento;

CATEGORIA	AMBITO	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE
Criteri di installazione e localizzazione	Struttura	Area occupata	[m ²]	
		Area coperta	[m ²]	
		Numero Camini		Se ogni impianto è dotato di più di un punto di emissione, giustificare tecnicamente tale scelta
		Tipologia Camino	[D] [h]	
		Studio impatto acustico		Inserire sintesi (rispetto dei limiti imposti dalla normativa in ambiente esterno ed in eventuale ambiente abitativo, sia in fase di cantiere che in fase di esercizio dell'impianto)
		Studio impatto elettromagnetico		Inserire sintesi (rispetto dei limiti previsti dalla normativa per il valore del campo elettromagnetico e delle fasce di rispetto)
		Sistema di contenimento delle Emissioni odorigene	Sì/No	Indicare la tipologia e sistemi di monitoraggio
		Raccolta e trattamento acque meteoriche	Sì/No	
		Treatmento reflui (civili/industriali)	Sì/No	Indicare la tipologia
		Infrastruttura di distribuzione energia		Indicare la tipologia
		Distanza punto di consegna	[km]	

Relazione - Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

- seguono i dettagli relativi all'ambito logistica che riguarda le informazioni inerenti alle attività di approvvigionamento e di movimentazione delle materie prime, all'ingresso ed all'uscita dell'impianto;

CATEGORIA	AMBITO	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE
Criteria di installazione e localizzazione	Logistica	Piano di approvvigionamento	Si/No	Dettagliare in un documento specifico
		% filiera corta	%	Tale valore deve essere almeno pari al il 40% se l'impianto è localizzato in zona agricola
		Piano di rintracciabilità filiera corta	Si/No	Dettagliare in un documento specifico
		Sistema di trasporto materie prime		Indicare la tipologia
		Sistema di movimentazione materie prime (incluso carico/scarico)	[t/giorno]	
		Sistema di stoccaggio delle materie prime		Indicare la tipologia, condizioni e gestione operativa
		Sistema di contenimento emissioni diffuse	Si/No	Indicare la tipologia
		Incidenza su traffico locale	%	Dettagliare in un doc. specifico

- l'ambito paesaggio che riguarda essenzialmente le caratteristiche paesaggistiche del sito in cui è prevista la localizzazione dell'impianto in analisi.

CATEGORIA	AMBITO	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE	
Criteria di installazione e localizzazione	Paesaggio	Utilizzo sito industriale esistente - piano di riconversione industriale	Si/No	Dettagliare in un documento specifico	
		Area sottoposta a bonifica	Si/No	Dettagliare in un documento specifico	
		Vincoli urbanistici	Tipol. Zona		
		Vincoli paesaggistici	Si/No	Indicare la tipologia	
		Distanza da aree sottoposte a vincolo paesaggistico	[Km]	Indicare la tipologia di vincolo	
		Vincoli ecologici	Aree Naturali Protette	Si/No	Indicare la tipologia di vincolo
			Aree SIC e/o ZPS	Si/No	Se sì, inserire lo Studio di Incidenza
			Coerenza con strumenti di pianificazione/gestione di AP e Siti Natura 2000 (SIC/ZPS)	Si/No	Dettagliare
		Distanza da ANP e da SIC e/o ZPS	[km]	Indicare la tipologia di vincolo	
		Vincolo area percorsa incendio	Si/No		
		Distanza da infrastrutture (acquedotti, strade, etc.)	[km]	Indicare la tipologia	
		Distanza dai recettori	[km]		

Nel primo livello sono annoverati anche i parametri valutativi relativi alla matrice “agenti fisici” strettamente collegata appunto al tipo di struttura e localizzazione dell’impianto. Si illustrano i parametri valutativi nella tabella sottostante:

MATRICE	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE
Rumore	Zonizzazione acustica	Si/No	Dettagliare
	Distanza dai recettori	km	Indicare l’ambito territoriale di riferimento
	Tipologia emissioni sonore	CT/CI/altro	Dettagliare
	Tempo di riferimento	D/N/continuo	
	Stima delle emissioni /immissioni	dB(A)	Dettagliare
	Modellistica applicata		Indicare sw
	Superamento dei limiti	Si/No	Indicare quali (assoluti-differenziali)
	Piano di monitoraggio	Si/No	Dettagliare modalità e cronoprogramma
	Sistemi di contenimento	Si/No	Indicare tipologia
CEM	Lunghezza nuovi elettrodotti	km	Dettagliare
	Tensione linee	V	
	Tipologia linee		Dettagliare
	Distanza dai recettori	km	
	Cabine di trasformazione		Dettagliare
	Stima delle emissioni	V/m ; μ T	Indicare metodologia di calcolo
	Superamento dei limiti	Si/No	Indicare quali
	Calcolo fasce di rispetto	Si/No	Dettagliare
	Piano di monitoraggio	Si/No	Dettagliare modalità e cronoprogramma

Relazione - Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

Nel secondo livello relativo alle singole matrici ambientali, sono state individuati per ogni comparto ambientale come aria, acqua, rifiuti e suolo, i seguenti indicatori – parametri valutativi riportati nelle tabelle sottostanti.

MATRICE	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE
Aria	Emissioni NO _x	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Emissioni SO _x	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Emissioni CO	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Emissioni CO ₂	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Emissioni CO ₂	[t/anno]	Valori stimati
	Emissioni COT	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Emissioni COV	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Componenti Inorganici (HCl, HBr, HF)	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Metalli pesanti	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Tenore di Ossigeno	%	Valori stimati
	Polveri Totali (PM 10, PM 2,5)	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	IPA	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Benzene	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Formaldeide	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Diossine e Furani	[mg/Nm ³]	Valori stimati
	Stima delle dispersioni atmosferiche nell'ambito territoriale di riferimento	Si/No	Dettagliare l'analisi
	Modellistica applicata	-	Indicare la tipologia
	Parametri meteorologici	-	Dettagliare in studio meteorologico annuale
	Emissioni diffuse stimate medie		Dettagliare l'analisi
	Quadro delle emissioni industriali nel contesto ambientale ante operam		Descrivere le sorgenti emissive industriali presenti nell'area dell'insediamento, con la stima del carico emissivo prodotto.
Dati quantitativi della qualità dell'aria nel contesto ambientale ante - operam	-	Indicare la tipologia della fonte/zona	
Superamenti dei limiti di qualità dell'aria nel contesto ambientale ante - operam	Si/No		
Sistema di monitoraggio in continuo delle emissioni	Si/No	Indicare la tipologia	
Piano di monitoraggio dell'impianto	Si/No	Dettagliare l'analisi	

Relazione - Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

MATRICE	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE
Acqua	Prelievi	Consumo previsto (usi industriali)	[m ³ /anno]
		Consumo previsto (usi civili)	[m ³ /anno]
		Prelievo acquedotto (potabile)	[m ³ /anno]
		Acqua recuperata internamente	[m ³ /anno]
	Prelievo altre fonti (consorzi, pozzi etc.)	[m ³ /anno]	
Scarichi	Scarichi	[m ³ /anno]	Indicare la tipologia

MATRICE	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE
Suolo	Vulnerabilità sismica	Zona	Indicare la zona di classificazione (da 1 a 4)
	Area classificata dal PAI a rischio idraulico	Si/No	Indicare il livello di rischio
	Area classificata dal PAI a rischio da frana	Si/No	Indicare il livello di rischio
	Area ricadente in un SIN	Si/No	Indicare lo stato procedurale e/o provvedere alla bonifica
	Area individuata tra i siti inquinati regionali	Si/No	Indicare lo stato procedurale e/o provvedere alla bonifica
	Misure di mitigazione	Si/No	Indicare la tipologia e/o le modalità costruttive

MATRICE	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE
Rifiuti	Quantità, Descrizione, Codice CER (rifiuti pericolosi)	[t/anno]	Dettagliare
	Quantità, Descrizione, Codice CER (rifiuti non pericolosi)	[t/anno]	Dettagliare
	Deposito temporaneo (rifiuti pericolosi)		Indicare modalità scelta
	Deposito temporaneo (rifiuti non pericolosi)		Indicare modalità scelta
	Modalità trasporto per codice CER (rifiuti pericolosi)		Indicare la tipologia e la frequenza prevista
	Modalità trasporto per codice CER (rifiuti non pericolosi)		Indicare la tipologia e la frequenza prevista
	Modalità di smaltimento o recupero per codice CER (rifiuti pericolosi)		Indicare la tipologia
	Modalità di smaltimento per codice CER (rifiuti speciali non pericolosi)		Indicare la tipologia

Tutte le tabelle illustrate sinora comprendono gli indicatori applicabili alla verifica della compatibilità ambientale degli impianti a biomassa.

Di seguito, si illustrano invece i parametri valutativi individuati per la valutazione degli impatti ambientali causati dagli impianti di produzione a energia fotovoltaica; a tal fine, sono stati individuati degli indicatori definiti in relazione ai criteri di localizzazione ed installazione, alla fase di cantiere e alle fasi di esercizio e di dismissione dell'impianto.

I criteri di localizzazione ed installazione consentono, come già accennato per le LGT degli impianti a biomassa, l'individuazione dell'ubicazione e delle caratteristiche legate all'installazione dell'impianto. Tali informazioni sono da riferire alla *situazione ante-operam* del contesto ambientale in cui si propone l'inserimento dell'impianto, ed alla *situazione post-operam* che consideri gli impatti derivanti dalla realizzazione dello stesso.

Nella tabella seguente, si osserva l'analisi dell'ambito "contesto territoriale" che riguarda essenzialmente le caratteristiche del territorio in cui è prevista la localizzazione dell'impianto.

CATEGORIA	AMBITO	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE	
Criteri di localizzazione e installazione	Contesto territoriale	Sito industriale esistente - piano di riconversione industriale	Si/No	Dettagliare in un documento specifico	
		Area sottoposta a bonifica	Si/No	Dettagliare in un documento specifico	
		Zonizzazione urbanistica (PUG)		Indicare la tipologia	
		Coerenza con PTCP	Si/No	Se si, indicare la tipologia. Se non recepito dal Comune va acquisito il parere della Provincia	
		Vincoli paesaggistici (PUTT)	Si/No	Indicare la tipologia	
		Distanza da aree sottoposte a vincolo paesaggistico	[Km]	Indicare la tipologia di vincolo	
		Inserimento dell'intervento nel contesto paesaggistico (simulazione visivo-panoramica dell'impianto)		Sezioni territoriali in scala 1:10.000	
		Impianto ricadente in zone agricole di pregio	Si/No	Indicare se ricade in Aree Territoriali Estese (ATE) da PUTT/P	
		Impianto ricadente in uliveto monumentale	Si/No	Se si, è necessario acquisire il parere della Commissione per la Tutela degli alberi monumentali, ai sensi della L.R. 14/2007 e della DGR 707/2008	
		Impianto ricadente in Oasi venatorie (L.R. 27/98)	Si/No	Indicare quale	
		Vincoli ecologici	Impianto ricadente in Aree Protette (nazionali, regionali)	Si/No	Indicare quale
			Impianto ricadente in Aree SIC e/o ZPS	Si/No	Se no ma incidente, inserire scheda anagrafica o studio di Valutazione d'Incidenza.
			Coerenza con strumenti di pianificazione e gestione di aree protette, SIC e/o ZPS	Si/No	Specificare
Impianto ricadente in Zone umide (Ramsar)	Si/No		Indicare quale		

Relazione - Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

CATEGORIA	AMBITO	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE	
			Impianto ricadente in aree IBA	Si/No	Indicare quale
		Distanza da aree naturali protette, aree SIC e/o ZPS, oasi venatorie, zone umide, aree di pregio		[km]	Indicare la tipologia di vincolo
		Sottrazione o perdita di habitat naturali		Si/No	Inserire studio ex-ante e documentazione fotografica
		Sottrazione o perdita di aree coltivate		Si/No	Se sì, verificare il possesso di eventuali autorizzazioni all'espianto (es. per gli uliveti ai sensi della L. 144/1951)
		Vincolo Piano di Assetto Idrogeologico (PAI)		Si/No	Se sì, indicare la tipologia
		Vincolo area percorsa incendio		Si/No	-

L'altro ambito di riferimento è quello della "area d'intervento e struttura" che interessa l'area su cui insiste l'impianto e la struttura dello stesso. Le informazioni da verificare riguardano le caratteristiche del sito interessato dall'impianto e le specifiche della struttura.

CATEGORIA	AMBITO	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI		NOTE	
Criteria di installazione e localizzazione	Area d'intervento	Superficie totale occupata		[m ²]	-
		Area occupata dai pannelli		[m ²]	-
		Superficie captante		[m ²]	-
		Grado di utilizzazione della superficie			Superficie captante/superficie totale dell'impianto
		Studio pedologico del sito		Si/No	
		Percorso del cavidotto			Cartografia del percorso
		Infrastruttura di distribuzione energia			Indicare la tipologia
		Disponibilità punto di consegna		Si/No	Inserire dettagli
		Area recintata e tipologia di recinzione		Si/No	Indicare la tipologia
		Tipologia del trattamento del terreno dell'area coperta dai pannelli			Indicare la tipologia
	Tipologia del trattamento del terreno delle aree di servizio (strade interne, ecc.)			Indicare la tipologia	
	Mantenimento attività agricola/pascolo		Si/No	-	
	Struttura	Tipologia delle fondazioni della struttura moduli			Indicare la tipologia
		Infissione diretta del supporto pannelli		Si/No	-
		Tipologia di supporto moduli			Indicare la tipologia
		Altezza da terra dei moduli		[cm]	-
		Sistema di lavaggio pannelli		Si/No	Indicare la tipologia
		Tipologia di sorveglianza dell'impianto			Indicare la tipologia
Presenza software di gestione impianto		Si/No	-		
Conformità dell'impianto di illuminazione alla LR 15/05			Inserire sintesi della relazione tecnica		
Studio impatto elettromagnetico			Inserire sintesi		

Relazione - Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

CATEGORIA	AMBITO	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI	NOTE
		Studio impatto acustico	Inserire esito della relazione
		Procedure gestionali di pulizia e manutenzione	Breve descrizione

Oltre agli aspetti suddetti, si è ritenuto di valutare gli effetti sull'ambiente provocati da tali impianti nelle fasi di cantiere, esercizio e dismissione. Nelle tabelle seguenti sono riportati i parametri valutativi:

	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI	NOTE	
FASE DI CANTIERE	Durata prevista della fase di cantiere	[mesi]	
	Principali attrezzature utilizzate		
	Principali mezzi meccanici utilizzati		
	Scavi		
	Traffico		
	Interventi previsti per l'accessibilità all'area destinata all'impianto		Indicazione sulle infrastrutture stradali d'accesso, ecc.
	Scortico vegetazione esistente	Si/No	Se Sì, indicare entità
Richiesta deroghe ex art. 17, commi 3 e 4 della L.R. n. 3/02	Si/No	Se SI, indicare quale	

	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI	NOTE	
FASE DI ESERCIZIO (Valutazione dei parametri di processo)	Potenza di picco o nominale	[MWp]	-
	Producibilità annua	[MWh]	-
	Tipologia impianto	-	Indicare se ad inseguimento solare o no, se a concentrazione ecc.
	Materiale celle	-	-
	Dimensioni moduli	-	-
	Numero moduli	-	-
	Efficienza Modulo	[%]	-

	INDICATORI / PARAMETRI VALUTATIVI	NOTE	
FASE DI DISMISSIONE	Piano di dismissione dell'impianto	Si/No	
	Tipologia rifiuti in fase di smantellamento dell'impianto		Indicare la tipologia
	Tipologia di smaltimento/recupero		Indicare la tipologia

Dopo aver valutato il potenziale impatto dell'impianto sul territorio, le LGT prevedono che il tecnico proponga ai soggetti interessati eventuali opere di mitigazione e compensazione.

Al momento, le LGT per gli impianti a biomassa e fotovoltaici sono in fase di approvazione, dunque, non è stato possibile riportare esiti valutativi ufficiali, a titolo di esempio.

Di seguito, si citano alcuni esempi specifici per ogni tipo di impianto produttivo a energia osservato negli studi condotti da Arpa Puglia.

Esempi di indicatori biologici per gli impianti a combustione - energia da biomassa

Anche in questo caso, sarebbe opportuno, sempre allo scopo di verificare gli impatti ambientali di tali impianti e più specificatamente per quelli a energia da biomassa, effettuare il monitoraggio biologico, per esempio, mediante api (*Apis mellifera* Linnaeus, 1758) e prodotti delle api (miele). Infatti, un progetto di ricerca condotto da Arpa Umbria ha appunto utilizzato campioni di api vive e miele attraverso i quali ricercare la presenza di

Metalli Pesanti (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb) che nelle api possono indurre morte e/o indebolimento. Il vantaggio di questo bioindicatore è di poter coprire un'area di circa 7 Km² all'interno della quale è stato possibile individuare tre aree d'interesse: una zona a massima ricaduta, una zona a minima ricaduta e una zona testimone (lontana da attività



antropica). Le api bottinano all'interno di un'area di almeno due chilometri di raggio, quindi è possibile valutare la trasferibilità al comparto biologico sia di metalli pesanti che di idrocarburi, atteso che la cera trattenga gli idrocarburi. Maggiori approfondimenti verranno forniti in seguito. Nella figura qui a fianco un telaio contenuto nell'arnia.

Esempi di indicatori biologici per gli impianti a energia fotovoltaica

Per la valutazione degli impatti causati da un impianto a energia fotovoltaica, invece, si potrebbe fare riferimento al monitoraggio biologico di fauna edafica rappresentata da invertebrati che includono nematodi, oligocheti (lombrico), gasteropodi, collemboli e aracnidi (Biologi Italiani n. 8/2007). Infatti, la pedofauna, ed in particolar modo molluschi e lombrichi, esercita effetti sul suolo anche attraverso le secrezioni mucose cutanee, che operano un'azione di cementazione sulle particelle di terreno, favorendo la stabilità del

suolo. Nel caso del fotovoltaico viene meno la produzione primaria del suolo (da parte della vegetazione), dunque, acquista un ruolo fondamentale la catena del detrito.

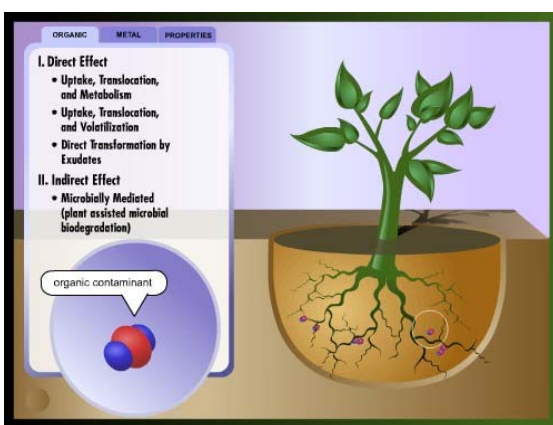
Per questo l'attività di biondificazione, che potrebbe essere riferita a singoli taxa o a un'intera comunità di microartropodi, consente di valutare cambiamenti delle proprietà del suolo causati dalle attività umane.

In particolare, si può citare come esempio la prova di tossicità con anellidi – *Eisenia fetida*, riproposto successivamente.

Siti contaminati da rifiuti contenenti sostanze pericolose

Arpa Puglia ha partecipato all'attività tecnico – scientifica che ha portato alla redazione di una relazione finale intitolata “*Supporto scientifico alle attività di recupero funzionale ed il ripristino ambientale del sito inquinato dell'Alta Murgia*”. Lo studio si inserisce nell'ambito delle indagini volte ad individuare la migliore strategia di intervento per la bonifica di due siti contaminati Altamura e Gravina, interno al Parco Nazionale dell'Alta Murgia. L'obiettivo è stato verificare la presenza di idrocarburi pesanti e metalli pesanti presenti come contaminanti nel suolo. Tra gli indicatori biologici sono stati individuati le specie vegetali (più rappresentative *Silybum marianum*, *Sinapis alba*, *Carduus pycnocephalus*, *Ferula communis*) e le api, quest'ultime non vengono riportate poiché trattate nel successivo paragrafo “*Bioindicatori a livello di organismi animali*”. Ciascun campione di pianta è stato suddiviso nelle diverse parti anatomiche (radici, steli, foglie, fiori e semi), e sottoposto ad

analisi. In base ai dati, relativi ai contenuti in metalli pesanti totali riscontrati nella parte aerea delle piante, nelle radici e nei suoli, sono stati calcolati due indicatori - Fattore di Bioconcentrazione e Fattore di Biotraslocazione - che esprimono la capacità delle piante di accumulare i metalli pesanti nelle radici o nelle parti aeree e/o trasferire gli stessi metalli dalle



radici alla parte aerea.

Se i due fattori sono molto superiori ad 1, allora le piante risultano interessanti per il processo di *phytoremediation* in quanto hanno una chiara propensione ad accumulare metalli pesanti. Si è osservato che i siti maggiormente inquinati, soprattutto da cromo, presentano peculiari cenosi vegetali dominate da alcune composite spinose come il cardo mariano (*Silibum marianum*) ed il cardo saettone (*Carduus pycnocephalus*) tipiche della classe Onopordetea acanthi. In assenza di inquinanti sono state osservate cenosi vegetali erbacee, differenti sia tra di loro che da quelle presenti nei siti inquinati.

3. Cenni sui tipi e sui livelli di interconnessione tra i contaminanti e gli indicatori biologici

Generalmente, le interazioni che si verificano tra gli inquinanti e gli indicatori biologici sono di *diverso tipo* e si sviluppano a *vari livelli del sistema biologico*.

In questa sede, mediante breve excursus, si accenna ai vari tipi e livelli di interconnessioni tra contaminanti e bioindicatori, a partire dalla sfera subcellulare fino ad arrivare a quella dell'intero organismo.

Bioindicatori a livello subcellulare

Per il livello sub-cellulare si utilizzano come bioindicatori le risposte intracellulari che gli organismi viventi danno in presenza di sostanze tossiche, le quali si manifestano come particolari adattamenti morfologici e funzionali dipendenti dall'assorbimento e dalla traslocazione della sostanza tossica da parte dell'organismo dovuti a modificazioni di processi biochimici e fisiologici provocate appunto dall'azione diretta o indiretta della sostanza tossica su attività biochimiche e funzioni fisiologiche dell'organismo.

Il metodo che utilizza gli indicatori biochimici e fisiologici consiste nel trovare un'elevata correlazione tra i livelli noti di sostanza tossica e le variazioni (aumento e/o diminuzione) di un parametro biochimico o fisiologico.

Si citano alcuni esempi di **reattività sub-cellulare** riguardanti i bioindicatori piante, messi in correlazione con vari inquinanti atmosferici.

In piante esposte a ozono (O₃) i livelli delle forme di ossigeno attivate (per esempio radicali superossido) aumentano e i sistemi enzimatici detossificanti di tali forme quali le superossido dismutasi (SOD), l'ascorbico perossidasi, la deidroascorbico reductasi e la glutatione reductasi giocano un ruolo importante nella detossificazione così come la regolazione dei livelli delle principali molecole antiossidanti quali acido ascorbico e deidroascorbico, glutatione ridotto e ossidato, poliammide.

Un altro inquinante derivante da numerose fonti di origine antropica, che rappresenta un serio problema ambientale è l'ammonio atmosferico (NH₄⁺). L'NH₃ provoca non solo

variazioni nel metabolismo dell'azoto nelle piante, ma influenza anche il loro bilancio acido-base. Utilizzando coloranti fluorescenti e sensibili al pH (piranina ed esculina) è stato possibile misurare le variazioni di pH citoplasmatico e vacuolare in foglie di piante C3 (Pelargonium zonale) e C4 (Zea mays, Amaranthus caudatus) esposte per 30 minuti a concentrazioni di NH₃ nell'aria da 1,3 a 8,3 $\mu\text{mol NH}_3 \text{ mole}^{-1} \text{ gas}$, alla luce o al buio e in presenza di diverse concentrazioni di CO₂ (Yin et al., 1996). Tali variazioni potrebbero essere utilizzate per monitorare la presenza di NH₃ nell'atmosfera.

In generale, l'utilizzo di parametri biochimici e fisiologici come bioindicatori può rappresentare in molti casi un metodo a elevata sensibilità, e quindi uno strumento molto utile per la precocità nell'individuazione di situazioni incipienti di inquinamento.

La correlazione con inquinanti rappresentati da metalli pesanti, invece, è data dall'attività enzimatica, nonostante non sia sempre chiaro, e il significato fisiologico dell'incremento delle attività enzimatiche e isoenzimatiche sia piuttosto speculativo, le variazioni di alcune di tali attività nelle piante possono essere utilizzate come criteri diagnostici per la valutazione della tossicità per le piante (fitotossicità) di suoli contaminati da metalli pesanti.

Bioindicatori a livello di microrganismi del suolo

I microrganismi sono una costante componente biologica di tutti i suoli, alla cui struttura sono intimamente associati. La funzione preminente, ma non esclusiva, dei microrganismi è di tipo demolitivo, consistente nella mineralizzazione della sostanza organica. Col termine microrganismi, o a volte con quello praticamente equivalente di protisti, si indicano forme, molto spesso unicellulari, che comprendono batteri (o schizomiceti) ed eumiceti (le comuni muffe e lieviti) quali gruppi numericamente dominanti. Anche le altre forme microbiche sono comunque presenti nel suolo: protozoi (essenzialmente predatori di altri microrganismi) e alghe (spesso in grado di vivere eterotroficamente).

La risposta della **comunità microbica (batterica, fungina, ecc.)** agli stress può essere valutata e misurata con una serie di tecniche sia quantitative sia qualitative (FERRARI et

al., 1998). Nel primo caso si determina il valore di alcuni parametri che esprimono diversi aspetti della comunità microbica, riguardanti la presenza e l'attività microbica. Più in particolare i parametri più comunemente utilizzati sono:

- carica microbica (numero di cellule batteriche/fungine in 1 g di suolo secco);
- biomassa, misurata mediante la determinazione del carbonio o dell'azoto microbico;
- mineralizzazione dell'azoto, che esprime il rilascio di azoto inorganico (NO_3^- e di NH_4^+) da parte della sostanza organica;
- tasso di decomposizione della sostanza organica;
- respirazione basale microbica (BR);
- attività deidrogenasica (DHA).

Alcuni esempi.

Le **micorrize**, associazione in simbiosi mutualistica di funghi con le radici delle piante, rappresentano una tra le più diffuse comunità di microrganismi del suolo: essi hanno un ruolo fondamentale nel miglioramento della nutrizione minerale e dell'assorbimento dell'acqua, nonché nella protezione delle piante e dell'integrità del suolo (Smith e Read, 1997). Si possono distinguere due grandi gruppi di funghi micorrizici: funghi ectomicorrizici (EM) e funghi endomicorrizici arbuscolari (AM).

Si è cercato di verificare se i funghi simbiotici possano essere utilizzati come bioindicatori di situazioni di stress. I fattori di stress possono essere rappresentati da eccessi o deficienze di nutrienti, da un arricchimento di anidride carbonica, dalla presenza di metalli pesanti oltre che da numerosi altri fattori strettamente legati ad attività umane.

La percentuale delle specie ectomicorriziche e la proporzione delle micorrize attive sembrerebbero molto sensibili alle cause incidenti sugli ecosistemi forestali (inquinamento dell'aria, acidificazione, fertilizzazione).

Molti di questi funghi potrebbero quindi essere considerati bioindicatori utili per rivelare cause incidenti sulla stabilità delle foreste. Si è approfondito il discorso sui bioindicatori funghi in seguito poiché in stretta correlazione con l'inquinamento del suolo.

I **protozoi** rappresentano una tra le maggiori componenti degli ecosistemi di acque dolci e salate e di suoli. Sono organismi unicellulari, prevalentemente batteriofagi, ma esistono alcuni esempi di protozoi fungivori e predatori. I protozoi sono i responsabili di circa il 70% della respirazione animale, del 14-66% della mineralizzazione del carbonio e del 20-40% della mineralizzazione dell'azoto (FOISSNER, 1987; EKELUND e RØNN, 1994; GRIFFITHS, 1994).

I parametri che vengono presi in considerazione per valutare la qualità/salute del suolo sono: il numero di individui, la biomassa, il numero di generazioni, la percentuale di mortalità e la suddivisione in gruppi trofici. Due sono le possibili tecniche che permettono di valutare tali parametri: diluizione della coltura e conta diretta, ossia i protozoi vengono direttamente contati nel campione.

Le **alghe** costituiscono circa il 27% della biomassa microbica con un'abbondanza stimata tra i 150-500 kg per ettaro di terreno.

Per valutare la salute/qualità di un suolo utilizzando le alghe, i parametri comunemente utilizzati riguardano: l'abbondanza algale, generalmente il numero di alghe viene valutato con il metodo del most probable number (MPN); la composizione della comunità algale; la crescita algale; la misurazione di attività fisiologiche, quali la fotosintesi, la respirazione; l'attività di particolari enzimi, quali deidrogenasi, ureasi e nitrato reductasi.

Bioindicatori a livello di organismi vegetali

Il metodo, basato sull'analisi qualitativa e quantitativa delle sostanze nei talli lichenici, permette di stimare il grado di diffusione degli inquinanti nell'ambiente, individuandone le fonti principali.

Molte **specie licheniche** sono in grado di assorbire e accumulare nel loro tallo contaminanti persistenti, che non si trasformano continuamente al variare di fattori ambientali, quali luce, temperatura, ecc. (Gasparo, 1994).

I licheni sono utilizzati per indagini su radionuclidi, zolfo, fluoro, idrocarburi clorurati, ma soprattutto nel biomonitoraggio di metalli provenienti dalle attività produttive. Associati a particelle, polveri e fumi, vengono trasportati dal vento in diverse zone, creando problematiche sanitarie e ambientali per la loro eventuale tossicità (Guidetti e Stefanetti, 1996).

I licheni hanno delle spiccate qualità come bioaccumulatori e questo è dovuto soprattutto alla mancanza di uno strato di cellule epidermiche, la cuticola, presente invece nelle piante superiori e che rappresenta una struttura protettiva impermeabile all'acqua e ai gas. Di conseguenza, un lichene si comporta come una spugna e respirando riesce ad assorbire gli inquinanti, compresi quelli diffusi in bassissime concentrazioni in quanto la loro attività metabolica non ha limiti temporali. Il biomonitoraggio mediante i licheni non rappresenta una misura strumentale che permette di stabilire in un breve arco di tempo la concentrazione di un inquinante in un volume d'aria, ma in base alle concentrazioni dei metalli in traccia rilevati nei talli, si possono rilevare i patterns deposizionali. Questi ultimi possono essere determinati sia dalla distanza del lichene dalla sorgente d'inquinamento che dal trasporto dei venti subito dai contaminanti emessi. Questo trasporto è condizionato dall'orografia del territorio, dal tipo di molecola considerata, dai molteplici fattori atmosferici, dalla struttura termica dell'atmosfera e dall'altezza delle ciminiere. Questo tipo di indagine, quindi, permette una sicura localizzazione delle sorgenti inquinanti e l'individuazione di aree a rischio, conoscenza utile anche per ricerche di tipo epidemiologico.

Le **briofite** (muschi), considerati ottimi indicatori biologici in quanto, al variare dell'inquinamento dell'aria e dell'acqua, non solo cambia il loro aspetto esteriore, ma variano anche il numero e le specie presenti. Le variazioni ecologiche dell'ambiente si riflettono su tali organismi in tre modi: modificazioni morfostrutturali, accumulo di sostanze inquinanti e variazione della composizione floristica della comunità vegetale. Nella maggior parte dei casi queste modificazioni non dipendono da fenomeni acuti di inquinamento, ma dall'inquinamento medio entro periodi più o meno lunghi. Gli organismi vengono quindi utilizzati come "centraline naturali permanenti". Innanzitutto, le briofite hanno elevata

capacità di assorbimento e di accumulo delle sostanze prelevate dall'acqua e dall'atmosfera, in quanto sono sprovviste di cuticola e di aperture stomatiche, per cui attuano gli scambi gassosi attraverso tutta la superficie della piantina. Questo permette un assorbimento di elementi nutritivi e contaminanti che si protrae per lungo tempo.

Un'altra caratteristica rilevante è la persistenza delle parti vecchie o intossicate per accumulo delle sostanze tossiche, caratteristica che invece non si ritrova nelle piante superiori. Il lento accrescimento e la grande longevità sono infatti la causa della resistenza, nei centri abitati, di numerose specie di muschi ed epatiche e ciò permette di attuare una stima dell'inquinamento su tempi lunghi. Infine, questi organismi sono molto sensibili agli agenti inquinanti quali anidride solforosa, idrocarburi, ozono, piombo, zinco, cadmio ecc.; questa sensibilità si manifesta con alterazioni nell'attività fotosintetica e nella riproduzione sessuale.

La piantina accumula le sostanze in maniera dipendente dalla concentrazione di queste nell'atmosfera o nell'acqua, e dal tempo di esposizione; quindi, a parità di concentrazione nell'ambiente, la contaminazione è più alta nel tallo più vecchio.

Le briofite presentano tutte le caratteristiche di un buon indicatore e numerosi studi hanno permesso di identificare i più evidenti tipi di risposta a situazioni di inquinamento.

La diversa sensibilità delle specie muscicole all'anidride solforosa è imputabile a diversi fattori: superficie disponibile per gli scambi gassosi e dunque per l'assorbimento dell'anidride solforosa; velocità di idratazione e idrorepellenza del tallo, attività metaboliche, pH e capacità tamponante del substrato sul quale la specie normalmente si sviluppa. I danni indiretti si verificano a causa dell'azione acidificante delle piogge e delle nebbie; la SO₂ infatti determina la riduzione della capacità tamponante e di conseguenza del pH del substrato; infine altera gli equilibri delle forme ioniche generate dall'anidride solforosa in soluzione acquosa, con danni alla clorofilla.

I danni diretti riguardano l'azione diretta della SO₂ sui muschi, che causa una riduzione dell'attività fotosintetica, danneggiando la clorofilla.

Anche i metalli pesanti, come il piombo, riducono fortemente la fotosintesi. Infatti, la riduzione della vitalità e fertilità della specie è causata prevalentemente dai metalli pesanti; man mano che ci si avvicina alle sorgenti inquinanti, si assiste a un progressivo peggioramento delle condizioni di salute della specie, e in particolare a una diminuzione della sua fertilità, in funzione del tempo di esposizione e dell'avvicinamento alla fonte inquinante.

La riduzione della copertura e del numero totale delle specie nel tempo e nello spazio dipendono dall'inquinamento da metalli pesanti ha anche effetti nocivi sulla copertura della specie e sul numero totale delle specie.

Studi floristici, effettuati a distanza di anni sullo stesso territorio, mostrano una riduzione netta del numero delle specie riscontrate.

Anche nello spazio tale variazione si avverte in maniera sensibile: per esempio, passando dal centro cittadino alla periferia, si può notare un aumento del numero di specie, indipendentemente dal tipo di substrato considerato.

Bioindicatori a livello di vegetali vascolari: tessuti e organi

L'inquinamento può intaccare le varie parti anatomiche della pianta. Si citano alcuni esempi. La radice che si distingue dal fusto, principalmente, per la mancanza di cuticola, stomi e foglie; da ciò deriva il fatto che le radici sono facilitate nella captazione dell'acqua e delle sostanze minerali. La radice permette di valutare la sensibilità nei confronti di alcuni metalli, quali berillio, nichel, tallio e vanadio; le specie sensibili possono, quindi, essere utilizzate per testare la tossicità di sostanze, disperse nell'ambiente, che contengano tali metalli. Le foglie che rappresentano per eccellenza la componente più interattiva con l'ambiente esterno e quindi con gli inquinanti mostrano effetti dei danni acuti (breve esposizione ad alte concentrazioni di inquinanti) e cronici (esposizione a basse concentrazioni per lungo periodo) sono distinti a livello sintomatologico: nel primo caso il danno è una necrosi, con i tessuti che assumono colorazione grigio metallico o marrone e

possono decolorare con l'età a marrone rossiccio o bianco; è di norma localizzato nel tempo e nello spazio; i suoi effetti sono spettacolari per la rapidità di comparsa e l'intensità; produce in genere caratteristici sintomi e ha un notevole valore diagnostico grazie alle caratteristiche cromatiche e all'andamento delle lesioni. Nel secondo caso i danni sono clorosi, punteggiature (pigmentazione, *stippling*) e senescenza precoce. In pratica accade però che, essendo le piante in natura soggette ai due tipi di esposizione, il sintomo risultante non è facilmente riconducibile a uno dei tipi specifici. Le piante possono mostrare contemporaneamente sintomi di tipo acuto e di tipo cronico. In tal caso, le necrosi possono essere accompagnate da vari livelli di clorosi. Inoltre, la comparsa di gravi danni acuti alle foglie può essere seguita dalla defogliazione completa e addirittura dalla morte della pianta, ma, come per esempio nel caso di esposizione a elevate concentrazioni di NO₂, Cl₂ e HCl, possono verificarsi anche estese defogliazioni senza essere precedute dalla comparsa di necrosi.

Per concludere, considerazioni relative ai bioindicatori vegetali e ai metalli pesanti sono state che, in genere, tutte le piante accumulano modeste quantità di metalli pesanti, ed in quantità superiore nelle radici rispetto alla parte aerea (ad eccezione del Ni). Per tutti i metalli studiati la capacità di accumulo di metalli nella parte aerea in queste piante è bassa. Questi risultati evidenziano che le piante presenti sui siti contaminati possono considerarsi ipertolleranti e non iperaccumulatrici.

Bioindicatori a livello di organismi animali

Tra i bioindicatori animali, l'ape domestica (*Apis mellifera* L.) ha grande rilevanza poiché è uno degli insetti su cui sono stati compiuti gli studi più approfonditi e, pertanto, è disponibile il maggior numero di dati. Per tale motivo, l'ape è utilizzata da molti anni per saggiare in laboratorio la tossicità (per ingestione o per contatto) di prodotti impiegati nelle attività industriali.

Questi insetti, si nutrono prevalentemente di sostanze zuccherine come il polline e la melata prodotta dagli Afidi. La metodologia proposta è stata messa a punto dall'Istituto Nazionale di Apicoltura di Bologna, dall'Istituto di Entomologia "Guido Grandi" dell'Università di Bologna e dal Dipartimento di Biologia applicata alla Difesa delle Piante dell'Università di Udine, tenendo conto anche delle indicazioni fornite dall'International Commission for plant-bee relationships, allo scopo di fornire utili indicazioni anche per il monitoraggio dell'inquinamento per es. da metalli pesanti.

Il metodo si basa sull'osservazione nell'arco di 15 giorni, di numerose variabili, al fine di seguire il tragitto della molecola indagata, studiarne la traslocazione dalle piante all'alveare, scoprire i punti preferenziali di accumulo e le eventuali barriere biologiche, conoscere i tempi e le cause di degradazione e di biomagnificazione nelle varie matrici per correlarle poi con le osservazioni riguardanti la forza della famiglia, l'attività di volo e di bottinamento e l'andamento meteorologico" (Porrini, 1995). Ogni stazione di rilevamento è costituita da almeno 2 alveari (il numero minimo per applicare i metodi di analisi statistica), omogenei per forza e scorte alimentari.

I metalli pesanti possono essere captati dalle api nell'atmosfera tramite il loro corpo peloso e portati nell'alveare insieme al polline, oppure assunti suggendo il nettare dei fiori, l'acqua di pozzanghere, fossi, fontane e ruscelli o insieme alla melata degli afidi.

Oltre alle api, uno dei bioindicatori animali molto esaminato è l'oligochete *Eisenia fetida*, uno delle numerose specie rappresentanti il lombrico. Attraverso tale bioindicatore specifico della valutazione della tossicità del suolo, si considera la percentuale di sopravvivenza e la



differenza tra il peso iniziale della massa di lombrichi e il loro peso finale. Si utilizzano esclusivamente lombrichi adulti, sessualmente maturi, di età compresa tra i sei mesi ed un anno.

Se la percentuale di mortalità è superiore al 20% il terreno è da considerarsi tossico. Infatti, il lombrico nutrendosi di frammenti organici, escrementi di Acari e di Collemboli e di

Relazione - Definizione degli indicatori biologici per la valutazione di compatibilità ambientale degli impianti di generazione di energia, convenzionale e rinnovabile, con particolare riferimento agli impatti in Area Vasta e alla produzione di rifiuti presso Arpa Puglia.

particelle minerali, producono cataboliti di circa 1 mm di grandezza, avvolti da un materiale mucoso di provenienza intestinale, che vengono facilmente e velocemente colonizzati da ife fungine. La figura rappresenta un esemplare di lombrico.

4 Individuazione degli indicatori biologici trattati negli studi di Arpa Puglia

Osservazioni sugli impianti a energia convenzionale - inquinanti e bioindicatori

In questo paragrafo, si fa riferimento in maniera approfondita alle caratteristiche dei vari inquinanti atmosferici, generalmente prodotti dalle centrali a energia convenzionale, e agli impatti causati da questi sull'ambiente, soprattutto sulla vegetazione. È necessario premettere che la necrosi e lisi dei tessuti sono causati da inquinamenti acuti in dosi ben difficilmente raggiungibili in normali situazioni ambientali.

Di seguito, sono indicati i diversi contaminanti atmosferici e gli effetti che possono causare. L'anidride solforosa (SO₂), così come l'anidride solforica (SO₃) derivante dalla prima, ha effetti nocivi.

Sulla base dei dati disponibili, appare che le concentrazioni di SO₂ rinvenute nelle aree industriali ed urbane manifestino effetti deleteri per i processi di riproduzione delle piante; in particolare, sono stati riscontrati sperimentalmente riduzioni della germinabilità del polline e dell'allungamento del tubo pollinico in alcune conifere. [Cesari G., 2007]

L'azoto forma sette ossidi, di questi solo NO ed NO₂ sono importanti inquinanti: essi vengono indicati con NO_x la cui produzione nell'atmosfera deriva da sorgenti naturali ed antropiche ma quest'ultime portano a concentrazioni elevate di NO_x.

Rappresentando le tossicità degli ossidi di azoto si osserva:

$$\text{tossicità NO}_2 = 4 \text{ tossicità NO}$$

[Cesari G., 2007]

Sulle piante, l'esposizione al biossido di azoto induce la comparsa di macchie sulle foglie mentre il monossido rallenta il processo di fotosintesi.

I livelli di NO_x comunemente rinvenibili nell'ambiente possono essere responsabili eventualmente di effetti di tipo cronico, di difficilissima valutazione perché assolutamente aspecifici: ritardi di sviluppo, riduzioni di biomassa, clorosi. Nello specifico, l'accumulo intracellulare danneggia la capacità del cloroplasto di formare ATP, che è il composto che fornisce energia a tutte le reazioni chimiche della pianta e ciò si riflette in un numero

elevato di reazioni chimiche tale da produrre molteplici effetti come l'inibizione di processi fondamentali: respirazione, fotorespirazione e fotosintesi e, essendo una molecola molto reattiva in forma gassosa, è in grado di attaccare molecole organiche come i lipidi.

In generale, si sono dimostrate sensibili riduzioni della crescita legate ad esposizione ad ossidi di azoto, spiegabili con l'alto costo energetico sostenuto dalla pianta per detossificarsi metabolizzando attraverso le proprie normali vie l'azoto in eccesso che riceve dall'atmosfera.

[F. Rossi, 2007]

Gli ossidi di azoto, inoltre, giocano un ruolo importante nella formazione di ozono nello strato più basso dell'atmosfera, e nei processi di eutrofizzazione e di acidificazione.

Il biossido di zolfo e il biossido di azoto reagendo con l'acqua danno rispettivamente acido solforico e acido nitrico i quali creano le cosiddette "piogge acide" che grazie all'azione dei venti possono cadere anche a centinaia di chilometri di distanza rispetto agli impianti che le hanno originate, pertanto l'inquinamento dell'aria da problema locale, riguardante una o più comunità, diventa problema regionale e generale.

Gli effetti delle piogge acide sugli ecosistemi acquatici sono i più preoccupanti per la vita dei pesci che a valori di pH tra 5 e 4,5 non sopravvivono. [Cesari G., 2007]

Danni ulteriori all'uomo, agli animali e alle piante derivano dal fatto che le piogge acide, penetrando nelle riserve d'acqua potabile, rendono mobili alcuni metalli pesanti molto pericolosi, quali il cadmio, il piombo, il mercurio, lo zinco, il rame e l'alluminio. Ancora modificano anche i contenuti chimici nel suolo, privando le radici delle piante del loro nutrimento, con la dilavazione di minerali quali il calcio e il potassio.

Sperimentalmente l'ozono (O₃) è ritenuto il contaminante atmosferico secondario fitotossico più pericoloso nei paesi sviluppati e la sua formazione ha luogo con reazioni dello smog fotochimico (quest'ultimo si forma per reazione degli ossidi di azoto ed i VOC - Composti Organici Volatili - che includono una gamma di agenti inquinanti differenti, come carboidrati, composti e solventi organici, che provengono anche dalle industrie), innescate soprattutto dagli idrocarburi presenti in atmosfera.

L'ozono causa un danno biochimico cellulare, infatti, sulle proteine ossida i gruppi sulfidrilici di alcuni aminoacidi con conseguenti cambiamenti dell'orientamento spaziale delle proteine che diventano critici nei casi in cui queste entrano nei centri di reazione dei diversi enzimi. Ancora, altera il metabolismo dell'azoto e dei lipidi, e di un'accresciuta sintesi di etilene, ormone collegato all'invecchiamento e alla senescenza prematura (come osservato sulla patata), un'aggressione diretta alle cuticole fogliari i cui sintomi visibili consistono inizialmente in una clorosi diffusa, successivamente si verifica la comparsa di necrosi puntiformi. Un fenomeno costantemente associato all'esposizione prolungata all'ozono è rappresentato da un prematuro invecchiamento delle foglie, inoltre, si osserva una riduzione dei processi fotosintetici (viene alterata l'efficienza dei sistemi riduttivi della CO₂ nel fotosistema I, e si verifica, anche, una inibizione del trasporto di elettroni tra il fotosistema II e il fotosistema I) con conseguente minore produzione di biomassa.

Altre alterazioni, difficili da riconoscere, anche perché spesso non associate a sintomi visibili od a riduzioni della resa, si verificano a carico delle caratteristiche organolettiche e del contenuto in nutrienti per non parlare dei riflessi tossicologici derivanti dalle alterazioni del metabolismo secondario. La specie vegetale più sensibile a tale inquinante è la vite.

Il particolato (detto anche “aerosol” o “polveri”) contempla quattro categorie, a seconda dell'intervallo di dimensioni del diametro aerodinamico della particella (d_a): *ultrafine* ($d_a \leq 0,1$



μm); *fine* ($0,1 \mu\text{m} \leq d_a \leq 2,5 \mu\text{m}$); *grossolano* ($2,5 \mu\text{m} \leq d_a \leq 10 \mu\text{m}$); *ultragrossolano* ($>10 \mu\text{m}$).

In pratica, il diametro di una particella di PM₁₀ è pari a circa un sesto del diametro di un capello. Nella prassi comune si utilizzano i termini PM₁₀, PM_{2,5} e PM_{0,1} per indicare tutto il particolato con diametro minore od uguale a 10, 2,5 e 0,1 micron. [Armaroli N. e Po C., nov 2003]

Le particelle più grandi di 10 μm sono, in genere, polveri o ceneri volatili derivanti da processi industriali ed erosivi. Quelle pari a 10 μm rappresentano i particolati che restano

più a lungo sospesi in aria, mentre attorno ai 5 μm si hanno particelle che costituiscono quell'insieme denominato comunemente con "fumi e nebbie".

Gli aerosol sono, invece, caratterizzati da dimensioni inferiori a 1 μm . [Cesari G., 2007]

Una cruciale classificazione del particolato è quella basata sulla sua origine, che prevede tre categorie:

a) *particolato primario filtrabile*, che viene emesso in fase solida direttamente dalla sorgente;

b) *particolato primario condensabile*, che viene emesso in fase gassosa ad alta temperatura ma condensa a seguito di diluizione e raffreddamento entro pochi secondi dall'espulsione dalla sorgente;

c) *particolato secondario*, che si forma in atmosfera attraverso complessi processi, principalmente di natura fotochimica, a partire da emissioni gassose di SO_2 , NO_x , ammoniaca, composti organici. Gli inquinanti primari maggiormente responsabili della formazione di particolato secondario in Europa sono diventati gli ossidi di azoto NO_x .

General Electrics ha recentemente concluso che la gran parte (>95%) del particolato primario prodotto dalla combustione del gas naturale in turbina rientra nella categoria $\text{PM}_{2,5}$. Questo viene confermato da dati di fonte europea che per il gas naturale comunemente chiamato "metano" parlano di polveri con diametro dell'ordine di 1 μm o inferiori (PM_1). Risulta, quindi, del tutto destituita di qualsiasi fondamento l'affermazione, scritta su decine di progetti italiani, ripresa su vari documenti di Via e di Vas, riscontrabile in interviste televisive e alla stampa da parte di dirigenti di industrie energetiche, che la combustione del gas "non produce polveri". La combustione del gas non produce sostanzialmente PST (Particolato Sospeso Totale), ma non è affatto esente dalla produzione di PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, $\text{PM}_{0,1}$, che sono di maggiore rilevanza. [Armaroli N. e Po C., nov 2003]

I particolati raggiungono le piante attraverso tre possibili processi:

1. sedimentazione sotto l'influenza della gravità,
2. impatto in conseguenza del movimento di turbolenza,
3. deposito sotto la spinta delle precipitazioni.

L'inquinamento da polveri è di tipo cronico. Queste si depositano sulle foglie delle piante formando delle croste più o meno compatte. Grossi quantitativi di polveri, anche se inerti, comportano l'ostruzione, almeno parziale, delle aperture stomatiche con conseguenti riduzioni degli scambi gassosi tra foglia e ambiente e schermatura della luce, ostacolando il processo della fotosintesi. La temperatura delle foglie coperte di incrostazioni aumenta sensibilmente, fino anche di 10°C. Notevole è pure l'impatto chimico: quando le particelle sono solubili, sono possibili anche effetti caustici a carico della foglia, oppure la penetrazione di soluzioni tossiche.

I trattamenti termici dei combustibili non rinnovabili e quelli ad alta temperatura di alcuni materiali sono i principali processi responsabili dell'inquinamento atmosferico da metalli pesanti.

Tre sono le possibili vie dirette di penetrazione dei metalli nelle piante:

1. assorbimento dal suolo attraverso le radici, percorso più comune, con conseguente trasporto negli organi epigei con il flusso traspiratorio;
2. assorbimento fogliare;
3. nel caso delle specie arboree, deposizione diretta sul fusto e successivo movimento laterale attraverso la corteccia.

Le maggiori perplessità che suscitano la presenza di metalli pesanti sono derivate dalla loro potenziale tossicità anche per gli animali, in relazione al fatto che si tratta di un inquinamento di tipo cumulato e persistente.

Un gas che si forma durante qualsiasi combustione ad elevata temperatura sia da fonti naturali che da fonti antropiche è il monossido di carbonio. L'emissione di **CO** dalle centrali termoelettriche è minore perché la combustione è meglio controllata. Il monossido di carbonio va considerato inquinante primario a causa della sua lunga permanenza in atmosfera, che può raggiungere i sei mesi. Gli effetti sull'ambiente sono da considerarsi trascurabili mentre quelli sull'uomo sono estremamente pericolosi poiché determina la formazione della carbossiemoglobina. È, dunque, un gas velenoso.

Premesso che l'anidride carbonica non ha effetti tossici, le centrali emettono, oltre che questo gas e gli inquinanti, un considerevole ammontare di vapore a temperatura notevolmente più elevata rispetto a quella dell'aria.

Dal punto di vista micrometeorologico, osservando i fenomeni che direttamente coinvolgono lo strato d'aria prossimo alla superficie delle piante e l'atmosfera circostante, è evidente che:

- l'emissione di elevate quantità di vapore acqueo non può che causare un aumento dell'umidità relativa dell'aria, favorito dalla presenza nella zona di scarso rimescolamento dell'aria dovuto a basse velocità del vento. Questo favorirebbe la proliferazione di patogeni fungini, che trovano nell'associazione temperatura favorevole - elevata umidità le condizioni ideali per lo sviluppo e la diffusione. Ovvio anche qui la ripercussione a livello di numero di trattamenti anticrittogamici, e del conseguente impatto economico, energetico, chimico;
- la maggiore umidità alla quale le piante sarebbero esposte favorirebbe, comunque, l'attività stomatica agevolando quindi l'assorbimento dei gas inquinanti oltre che della CO₂, e facilitando, quindi, le perdite di acqua per traspirazione;
- si possono verificare modifiche dei processi di scambio tra pianta e atmosfera, date le variazioni locali di umidità relativa che vengono;
- in relazione all'emissione locale di elevate quantità di CO₂, si potrebbe verificare nell'areale uno scenario corrispondente ad un futuro, possibile cambiamento climatico, che prevede una alterazione climatica dovuta ad una maggiore presenza di gas-serra in atmosfera. Tra questi gas, la CO₂, che è in continuo progressivo aumento, è in grado di esercitare un'azione diretta sulle colture in quanto è il gas utilizzato per l'organizzazione del Carbonio. Numerosi studi sono ora in corso per verificare possibili riflessi legati all'azione "concimante" dell'anidride carbonica atmosferica, che in dosaggi più elevati di quelli normalmente presenti ha dimostrato favorire la fotosintesi e la produttività. Alcune evidenze mostrano per alcune specie, tra cui la patata, una aumentata efficienza dell'uso dell'acqua ad alta CO₂ (diminuzione della conduttanza stomatica, con conseguente minore consumo

d'acqua in proporzione alla CO₂ fissata con la fotosintesi). Tale apparente migliore resa è, però, accompagnata da più veloce degradazione della clorofilla e da un'accelerazione della senescenza, oltre che da una anticipata induzione della formazione dei tuberi.

Considerevoli sono poi le evidenze che collegano un "clima del futuro" ad un calo qualitativo della produzione per la patata stessa, che è una delle specie in questo senso maggiormente studiata. Analisi chimiche effettuate su carboidrati come amido, glucosio, fruttosio, saccarosio, elementi minerali come N, P, K, C, S, B, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe, Na, Al, Cd, proteine, aminoacidi e acidi organici come ascorbato, citrato, malato e glicocalcoidi come a-chaconina, a-solanina e anioni come cloridi, nitrati, solfati, hanno mostrato nel complesso evidenze di cali delle caratteristiche nutrizionali dei tuberi. Infatti, se da un lato sia elevata CO₂ che elevato ozono, deprimendo l'accumulo di zuccheri semplici, favorirebbero la qualità del tubero, dall'altro senz'altro il loro effetto complessivo è invece deprimente per la qualità, data la riduzione provocata sugli elementi minerali, l'ascorbato e gli aminoacidi. [F. Rossi 2007]

L'ammoniaca (NH₃) è presente nell'aria a causa di processi biochimici e chimici naturali, le varie fonti includono: microrganismi, lavorazione del carbone, lavorazione di ammoniaca stessa e perdite dai sistemi di refrigerazione che impiegano ammoniaca. L'NH₃ viene rimossa dall'atmosfera grazie alla sua affinità con l'acqua e il suo comportamento come base; è una specie chiave nella formazione e neutralizzazione di aerosol di nitrati e solfati poiché reagendo con questi forma sali di ammonio i quali sono tra i sali più corrosivi degli aerosol atmosferici. [Stanley E. Manahan, 2000]

Tra le aldeidi particolare importanza ha la formaldeide (CH₂O) per la sua tossicità dovuta principalmente al suo prodotto di ossidazione metabolica e cioè all'acido formico. Infatti, quest'ultimo è un forte irritante delle mucose, corrosivo di tutti i tessuti, soprattutto, quelli umidi ed esposti. In generale, tali sostanze reagiscono con i gruppi funzionali delle molecole. Le aldeidi a basso peso molecolare sono relativamente solubili in acqua e fortemente ossidanti. La formaldeide è ritenuta cancerogena. [Stanley E. Manahan, 2000]

Inoltre, è importante tenere presente che il metabolismo della pianta modificato, appunto, dagli inquinanti atmosferici a causa dell'alterazione dei metaboliti coinvolti nei suoi processi di difesa (carboidrati, composti azotati etc.) porta ad un maggiore rischio patologico.

Una centrale a gas naturale emette fondamentalmente tre gas ad effetto serra: anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e monossido di diazoto (N₂O). Essi vengono presi in esame per valutare il cosiddetto potenziale di riscaldamento globale. La capacità cumulativa di CH₄ e monossido di diazoto (N₂O) di contribuire al riscaldamento dell'atmosfera sono, rispettivamente di 21 e 310 volte superiori a quella di CO₂ sull'arco di 100 anni.

Il metano emesso è frutto di due contributi: incombusto e perso lungo le condotte. Pur avendo un valore in peso trascurabile rispetto alla CO₂ pari a 0,6% vs. 99,4 %, il metano, dato il suo elevatissimo carattere di gas serra, contribuisce in maniera sostanziale al riscaldamento globale. Questi dati indicano che non considerare il metano come un inquinante tipico emesso da centrali a gas, porta ad una rilevante sottostima del loro impatto serra. L'impatto serra globale sull'intero ciclo di vita per una centrale da 780 MW che opera 6.000 ore/anno è pari a 2.330.000 t/anno di CO₂ equivalente.

Ancora, il CH₄ presente nell'atmosfera, reagisce con atomi di ossigeno, prodotti generalmente dalla dissociazione fotochimica di NO₂, per generare il radicale ossidrile (OH[·]) e il radicale alchilico metilico (CH₃[·]). Quest'ultimo reagisce rapidamente con l'ossigeno molecolare per formare perossiradicali molto reattivi che nel caso specifico è il metossile (CH₃OO[·]). Tali radicali danno reazioni a catena in successione, incluse quelle formanti lo smog fotochimico. Anche il radicale OH[·] reagisce rapidamente, con gli idrocarburi, per formare radicali alchilici reattivi e partecipa attivamente alla formazione dello smog fotochimico. [Stanley E. Manahan, 2000]

Si è visto come, appunto, l'olivo rappresenti la coltura più abbondante e questo, non essendo caducifoglie, non ha la possibilità



di rinnovare periodicamente la chioma e di eliminare con la caduta delle foglie gli inquinanti assorbiti e accumulati nell'apparato fogliare.

Osservazioni sugli impianti a energia rinnovabile - inquinanti e bioindicatori

Per gli impianti a biomassa, gli inquinanti prodotti sono sovrapponibili a quelli emessi dagli impianti convenzionali e i bioindicatori più specifici individuati nei vari studi, sono stati presi in considerazione le api e i prodotti delle api (miele).

Le api appartengono all'ordine degli Imenotteri, caratterizzato, come dice il nome stesso, dalla presenza di due paia di ali membranose (dal greco hymen, membrana).

Questi insetti si nutrono prevalentemente di sostanze zuccherine (come il polline e la melata prodotta dagli Afidi), e sono dotati di glosse, appendici boccali che costituiscono una specie di proboscide, o lingua molto allungata che serve a suggerire il nettare dei fiori. Nella loro laboriosa vita le api (e gli altri insetti pronubi) favoriscono la riproduzione di numerose specie vegetali, svolgendo un'opera essenziale per la vita delle piante fanerogame.

La metodologia di studio illustrata è stata messa a punto dall'Istituto Nazionale di Apicoltura di Bologna, dall'Istituto di Entomologia "Guido Grandi" dell'Università di Bologna e dal Dipartimento di Biologia applicata alla Difesa delle Piante dell'Università di Udine, tenendo conto anche delle indicazioni fornite dall'International Commission for plant-bee relationships, allo scopo di valutare in campo gli effetti degli inquinanti sulle api; ma soprattutto fornire utili indicazioni per il monitoraggio dell'inquinamento da metalli pesanti.

Monitoraggio dei metalli pesanti – api. Una delle caratteristiche fondamentali che differenziano i metalli pesanti da altri contaminanti come i pesticidi, è il tipo di immissione nel territorio e il loro destino ambientale. Infatti, mentre i fitofarmaci vengono diffusi in maniera puntiforme, sia nel tempo che nello spazio e, a seconda del tipo di molecola chimica, i metalli pesanti sono emessi in continuazione dalle varie fonti, naturali e antropiche e, non subendo degradazioni, vengono continuamente rimessi in "gioco" entrando nei cicli chimici, fisici e biologici.

I metalli pesanti possono essere captati dalle api nell'atmosfera tramite il loro corpo peloso e portati nell'alveare insieme al polline, oppure assunti suggendo il nettare dei fiori, l'acqua di pozzanghere, fossi, fontane e ruscelli o insieme alla melata degli afidi.

Le variabili da considerare per utilizzare le api, o i prodotti dell'alveare come il miele, in tal senso sono parecchie, come ad esempio gli eventi meteorologici (la pioggia e il vento sono in grado di ripulire l'atmosfera o di trasferire i metalli pesanti in altri comparti ambientali), la stagionalità (il flusso nettario, di solito maggiore in primavera che in estate-autunno, potrebbe, a parità di emissione, diluire o meno il contaminante) e l'origine botanica del miele (la melata degli afidi, come il nettare dei fiori a morfologia aperta, è molto più esposta ai contaminanti rispetto al nettare dei fiori a morfologia chiusa).

Nel corso della ricerca sperimentale sono stati presi in considerazione 178 campioni di api bottinatrici provenienti da una zona urbana, una industrializzata e la terza naturale. Le api sono state prima "lavate" e poi "disgregate" al fine di capire come i vari contaminanti vengono captati. Il piombo risulta presente in quantità più elevate nel "disgregato" rispetto al "lavato" nelle prime due aree mentre in quella naturale il rapporto si inverte. In quest'ultima zona anche il nichel e il cromo sono maggiormente presenti nel "lavato". Si può intuire che la maggior contaminazione dell'area urbana e di quella industriale favorisca l'ingestione degli inquinanti (almeno per il piombo) nel corpo delle api rispetto all'area naturale. Si è anche verificato che il miele è più affidabile delle api in quanto i dati risultano più ripetibili (Porrini et al., 2000).

Per gli impianti fotovoltaici, numerose sono state le ricerche sul bioindicatore oligochete, lombrico. Gli Oligocheti (Oligochaeta) (lombrichi e simili) sono una classe di anellidi morfologicamente assai omogenea. Si tratta di vermi cilindrici privi di appendici, che dispongono, per far presa al substrato durante la locomozione, delle sole setole (due fascetti dorsali, due fascetti ventrali) poste ai 4 angoli del tubo corporeo, leggermente quadrangolare. La struttura metamerica è ben visibile (anche esteriormente) e omonoma, tranne a livello del clitello, segmento corporeo a funzione ghiandolare importante per la riproduzione. Gli Oligocheti sono in massima parte detritivori, nutrendosi di materiale in

decomposizione sulla superficie del terreno-substrato o all'interno del limo in cui scavano. L'identificazione sistematica degli oligocheti può essere raggiunta quasi esclusivamente con l'ausilio del microscopio, osservando le setole dorsali e ventrali.

I lombrichi nutrendosi di frammenti organici di escrementi di Acari e di Collemboli e di minerali, producono cataboliti di circa 1 mm di grandezza, avvolti da un materiale mucoso di provenienza intestinale, che vengono facilmente e velocemente colonizzati dalle ife nutrizionali delle specie fungine, le quali inoltre trovano particolare giovamento dall'areazione prodotta tramite le gallerie scavate, fino a 2,5 m di profondità, dai Lombrichi stessi. Inoltre, il lombrico non ha polmoni ma respira ossigeno assorbendolo attraverso tutto il corpo. Può digerire qualsiasi cosa. Le pietre diventano il suo "apparato digerente" e la materia organica ed inorganica viene macinata ed espulsa come delle fini gettate che sono rese completamente grazie alle ghiandole calcifere del lombrico stesso. Queste gettate hanno un contenuto di azoto cinque volte superiore a quello che si trova naturalmente, sette volte superiore per quanto riguarda i fosfati e undici volte superiore per il potassio. Tutto ciò dà vita ad un perfetto fertilizzante organico. Queste gettate sono impermeabili e tuttavia completamente accessibili alle radici delle piante. Anche i tunnel che i lombrichi sono impermeabili e servono ad ossigenare e drenare il terreno.

In conseguenza di quanto su esposto, tale organismo ed in particolare *Eisenia fetida*, è generalmente il più utilizzato, ma vi sono test anche con altre specie di *Eisenia* o di lombrichi; la mortalità è espressa come LC50 (14 giorni mg/kg suolo) mentre il NOEC (Concentrazione di Effetto Non Osservato) è generalmente calcolato a 21 giorni e si valutano gli effetti sulla riproduzione. La valutazione dello stato di salute viene effettuata attraverso una serie di informazioni: durata del test nel caso in cui sia differente da 21 giorni, stadio di sviluppo dell'organismo utilizzato per il test, condizioni del test (pH, temperatura, ecc).

Osservazioni sulla contaminazione da rifiuti – impatti su suolo e bioindicatori

L'esposizione del suolo all'inquinamento è di vario tipo. La modalità in esame è quella rappresentata dall'abbandono occasionale o continuo di rifiuti (discariche) che provocano danni notevoli per la vita del suolo.

Una delle conseguenze dell'inquinamento del suolo è la riduzione della biodiversità. Infatti, in funzione degli elementi tossici accumulati si ha una riduzione dell'attività biologica del terreno, dei processi di degradazione della sostanza organica e di restituzione di macro e microrganismi essenziali per il normale sviluppo delle piante. Inoltre, i composti chimici tossici presenti nel terreno si concentrano nelle piante, che vengono poi utilizzate dagli animali e dall'uomo. Il cromo ad es. si accumula nelle piante da foraggio con concentrazione da 3 a 10 volte più elevate rispetto a quelle del suolo. A titolo di esempio, si indicano le concentrazioni di Zn, Cd e Pb nei lombrichi, rispettivamente 317, 5.75 e 4.7 contro le concentrazioni nel terreno pari a 43 per lo Zn, 0.35 per il Cd e 27 per il Pb. Dunque, si denota che lo Zn ha un fattore di bioaccumulazione di 7.4, il Cd ha una bioaccumulazione di 16.3 e il Pb di soli 0.2.

In Europa l'inquinamento del suolo è molto diffuso e le tecniche richieste per la bonifica sono molto costose. In Italia si è stimato che i costi di bonifica già avvenuta ammontano a 89 milioni di euro e per quei siti molto contaminati 3000 milioni di euro.

In merito sempre all'inquinamento del suolo, in Italia contrariamente a quanto avvenuto in altre nazioni, è mancata una politica organica di risanamento sulle aree contaminate. (Manuale dell'Ambiente 2010). In generale, uno dei bioindicatori studiato e che grazie alle sue peculiarità, si è rivelato di notevole interesse è il lombrico, il quale è stato utilizzato in modo diretto per la rimozione di arsenico e mercurio in suoli contaminati, con una efficienza particolarmente interessante soprattutto nel caso dell'adsorbimento di arsenico. In sostanza i metalli dispersi nell'ambiente passano nei tessuti dei vermi per il fenomeno del bioaccumulo. Una volta standardizzato il metodo sperimentale, i vermi potrebbero rappresentare nell'ambito della bonifica dei terreni una valida alternativa ai lunghi e complessi metodi utilizzati attualmente. Tale soluzione si dimostrerebbe particolarmente

utile nel recupero dei metalli pesanti in siti critici come per esempio le discariche di computer e di altri dispositivi elettronici obsoleti.

La Regione Puglia, dal 2007, ha attuato un Accordo di Programma Quadro attraverso il quale vigilare sul territorio allo scopo di proteggere tutti i comparti ambientali e soprattutto il suolo dalla contaminazione causata dagli inquinanti contenuti nei rifiuti.

Si è già fatto cenno allo studio già citato “Recupero ambientale Alta Murgia (BA)”, attraverso il quale si è cercato di individuare la migliore strategia di intervento per la bonifica di due siti contaminati Altamura e Gravina localizzati all’interno del Parco Nazionale dell’Alta Murgia. L’obiettivo è stato verificare la presenza di idrocarburi pesanti e metalli pesanti presenti come contaminanti nel suolo attraverso.

Oltre a lavoro summenzionato, in letteratura è stato riscontrato un recente articolo sulla rivista Biologi Italiani - Marzo 2011, in cui sono stati studiati come bioindicatori della qualità del suolo, i **funghi**. Tali indicatori sono stati integrati grazie ai progressi compiuti negli studi recenti, tra gli strumenti di indagine ambientale nonostante gli ostacoli nel riconoscimento tassonomico e nella standardizzazione e validazione delle attività di monitoraggio. Studi recenti e nuove banche dati micologiche stanno rendendo possibile l’integrazione del monitoraggio ambientale delle comunità fungine, che hanno funzioni fondamentali all’interno degli ecosistemi, grazie alla loro ubiquitarietà e alle attività di riciclo degli elementi e di degradazione di molecole complesse, altrimenti compartimentale nella necromassa o nella biomassa vegetale.

In generale, i funghi epigei ed ipogei e gli altri microrganismi che colonizzano lo strato umico del suolo, per le loro peculiarità tendono a preferire substrati acidi o a reazione subalcalina, oppure ad essere resistenti a stress termici o idrici. Più precisamente, prediligono per la loro crescita suoli con un gradiente di pH che varia da subacido al sub alcalino, con la preferenza per valori vicini a 7.

Sulla componente micologica sono stati avviati studi specifici presso ISPRA a partire dal 2003 con l’acquisizione di banche dati, in particolare tramite una convenzione con l’Associazione Micologica Bresadola – Centro Studi Micologici che ha permesso di

realizzare un primo abbinamento delle specie fungine nazionali agli habitat definiti secondo la nomenclatura CORINE Biotopes e CORINE Land Cover, nonché EUNIS per i Siti Rete Natura 2000.

I funghi possono essere raggruppati in tre grosse categorie:

- funghi parassiti: si nutrono a spese di sostanze organiche appartenenti ad animali o vegetali viventi,
- funghi saprofiti: si nutrono a spese di sostanze organiche appartenenti ad animali o vegetali morti;
- funghi simbiotici: si nutrono delle sostanze organiche elaborate dalle piante, che vengono prelevate dai continui scambi che si stabiliscono a livello degli apparati radicali assorbenti nei rapporti di vita mutualistica che si instaurano tra le piante verdi e gli ospiti fungini. I funghi, insieme ai batteri e agli altri microrganismi, provvedono alla degradazione catabolica della sostanza organica fino ad ottenere molecole semplici sotto forma di H₂O, CO₂ e Sali minerali, e alla sintesi metabolica di complesse molecole organiche e organico-minerali che partecipano alla formazione dell'humus.

Un binomio oggetto di studi negli ultimi vent'anni, come strumento per la bioindicazione dei suoli, è: funghi – metalli pesanti.

Il suolo ha la capacità di accumulare le sostanze inquinanti e può effettivamente impedire l'immediata contaminazione di altri comparti ambientali, tuttavia può anche determinare un improvviso rilascio degli inquinanti una volta raggiunto il limite di ritenzione.

La parete cellulare dei funghi nel suolo è a diretto contatto con l'ambiente esterno ed è in grado di assorbire ed accumulare cationi pesanti, che possono essere comunque accumulati anche all'interno della cellula. Queste caratteristiche, pur essendo generali, si presentano in maniera differenziata a seconda delle varie famiglie e specie fungine; infatti, i numerosi studi sulla determinazione dei metalli pesanti nei funghi evidenzia comportamenti eterogenei tra specie e specie. Diverse concentrazioni di metalli pesanti nel suolo influenzano la composizione della comunità fungina presente nella lettiera e nel suolo.

I metalli pesanti assorbiti inibiscono la crescita fungina ma causano anche cambiamenti morfologici e fisiologici. La loro azione tossica sembra essere essenzialmente esercitata a carico di enzimi. L'inibizione può dipendere dal fatto che vengono mascherati gruppi cataliticamente attivi, dalla denaturazione di proteine, dalla modificazione della conformazione enzimatica o dall'attivazione di altri siti coinvolti nella formazione di complessi enzima-substrato, che entrano in competizione con quelli normalmente presenti. Queste azioni tossiche variano da specie a specie e dipendono dalla concentrazione dei metalli e dal tempo di esposizione. Buoni indicatori della qualità e della salute del complesso pianta-suolo sono le simbiosi micorriziche. L'efficienza di tali associazioni varia a seconda una serie di interazioni dinamiche che coinvolgono non solo la pianta e il fungo, ma anche i fattori ambientali e pedologici e rapporti che si stabiliscono tra queste variabili. Per queste ragioni, i funghi micorrizici possono essere utilizzati come indicatori della qualità del suolo perché svolgono delle funzioni chiave e quindi l'individuazione di marcatori metabolici monitorabili con facilità rende possibile l'osservazione e la valutazione dei cambiamenti che possono intervenire nella funzionalità dell'ambiente suolo. A tal proposito, un buon esempio è rappresentato dalla *glomalina*, una glicoproteina idrofobica prodotta dai funghi micorrizici arbuscolari, simbiotici pressoché ubiquitari delle radici della maggior parte delle piante terrestri, che si accumula nel suolo sotto forma di una sostanza proteica denominata "*Glomalin Related Soil Protein*" (GRSP). La GRSP è un marcatore facilmente misurabile, dell'attività di medio-lungo periodo dei funghi. Tale marcatore è stato dimostrato essere sensibile non solo ai cambiamenti ambientali come l'aumento di CO₂ atmosferica e a diversi sistemi di uso e gestione del suolo, ma è anche risultato essere ottimante correlato con la stabilità degli aggregati di particelle del suolo, importante parametro di funzionalità del suolo stesso.

Conclusioni

In generale, attraverso l'uso degli indicatori biologici del suolo è possibile effettuare misure di valutazione di impatto ambientale, valutazione ambientale strategica, valutazione sull'efficacia di trattamenti di recupero delle funzioni di un sito sulla sua potenziale resilienza e resistenza a pressioni antropiche e naturali.

In merito a tutto ciò, sarebbe opportuno proseguire nel tempo l'attività della presente borsa di studio allo scopo di completare la valutazione degli impatti che gli inquinanti causano sul suolo attraverso una fase sperimentale sul campo nell'ambito delle attività inerenti al vigente e già citato Accordo di Programma Quadro.

Inoltre, sempre a tal proposito, si potrebbero proporre e/o studiare innovative opere di mitigazione e compensazione allo scopo di neutralizzare gli effetti negativi degli impatti ambientali.