

Impatto ambientale dei prodotti petroliferi nel suolo: Parte II - Composizione dei prodotti petroliferi e proprietà chiave ^(°)

Environmental impact of petroleum products in the soil: Part II - Petroleum products composition and key properties

T. Zerlia

Stazione sperimentale per i Combustibili - V.le A. De Gasperi 3, 20097 San Donato Milanese (MI); tel. +39 02516041; fax: +39 02518246;
e-mail: zerlia@ssc.it

RIASSUNTO:

Il destino ambientale degli idrocarburi petroliferi nel suolo e nel sottosuolo dipende, oltre che dalle caratteristiche del terreno, dalle proprietà chimico-fisiche dei singoli idrocarburi. Viene richiamata la composizione dei principali prodotti petroliferi, e vengono evidenziati i composti critici e le caratteristiche essenziali per delinearne il comportamento in termini di impatto ambientale col suolo.

PAROLE CHIAVE: *ambiente, suolo, inquinamento, petrolio, idrocarburi*

SUMMARY:

The fate of petroleum hydrocarbons in the soil depends on the chemical-physic properties of each hydrocarbon, as well as on the soil characteristics. The mean composition of various petroleum products, the key chemical compounds and their characteristics are focused in order to outline the environmental behaviour of petroleum hydrocarbons in the soil.

KEYWORDS: *environment, soil, pollution, petroleum, hydrocarbons*

^(°) Ricerca svolta con finanziamento dal Ministero dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato e della Stazione sperimentale per i Combustibili nell'anno 1999.

1. Introduzione

La prima parte della rassegna [1] ha inquadrato il problema dell'inquinamento del terreno, mettendo in evidenza la complessità dei fenomeni che intervengono quando un inquinante, in particolare un prodotto petrolifero, penetra nel sottosuolo. Per facilitare la comprensione di alcuni elementi importanti ai fini ambientali (ad esempio, adsorbimento, bioaccumulo, biodegradazione degli inquinanti) è stato illustrato il significato fisico dei parametri comunemente utilizzati nella valutazione del rischio per la salute e l'ambiente (K_{ow} , K_{oc} , costante di Henry, solubilità in acqua), corredando la rassegna di un glossario di termini legati all'impatto ambientale. Alla luce di quanto esposto, viene ora affrontato, nello specifico, il tema legato alle caratteristiche chimico-fisiche più rilevanti dei prodotti petroliferi ai fini ambientali.

2. Composizione e proprietà fisiche e chimiche dei prodotti petroliferi

Gli oli grezzi e i prodotti petroliferi sono miscele di numerosissimi composti, ciascuno caratterizzato da proprietà peculiari (solubilità, volatilità, tossicità, caratteristiche stereochimiche, ecc.) e, dunque, da un diverso comportamento in termini di impatto ambientale.

Sulla base delle caratteristiche essenziali dei principali prodotti petroliferi, è possibile tracciare un

quadro schematico dei parametri critici (Figure 1-6 [2-7]) utili per delineare e prevedere, almeno in termini generali, il comportamento di tali prodotti nell'ambiente. Data la vastità del tema, per ulteriori approfondimenti si rimanda il lettore ai citati *dossier* Concawe che costituiscono una delle fonti più complete sull'argomento.

In generale, la scala di biodegradabilità relativa delle varie classi di idrocarburi presenti nei prodotti petroliferi (almeno in condizioni aerobiche) segue l'ordine: *n*-paraffine > paraffine sostituite > idrocarburi aromatici a basso peso molecolare > cicloalcani > idrocarburi aromatici ad elevato peso molecolare e composti polari.

La scala non ha valore assoluto, poiché il comportamento reale degli inquinanti è legato anche a parametri quali temperatura, ossigeno, nutrienti, pH, umidità, tipologia dei microorganismi, reazioni in competizione, parametri che, come in tutti gli equilibri chimici coesistenti, possono influenzare in maniera marcata la velocità e la direzione delle reazioni di biodegradazione. Come regola generale, si può ricordare che tanto più complessa è la molecola del composto, tanto più bassa è la velocità di biodegradazione.

Data la specificità delle proprietà chimico-fisiche di ciascun composto, la previsione del comportamento nell'ambiente di un prodotto petrolifero dovrebbe prevedere una valutazione delle proprietà chimico-fisiche dei singoli componenti presenti.

Classificazione EINECS: vengono codificati circa 130 tipi diversi di benzina in funzione dei diversi <i>stream</i> di raffineria.		
Intervallo tipico di atomi di carbonio	Intervallo tipico di distillazione (°C)	Persistenza- biodegradabilità
C ₄ -C ₁₂	30-220	<p>Nella benzina sono stati identificati circa 300 componenti, ciascuno caratterizzato da una diversa solubilità in H₂O.</p> <p>Gli idrocarburi aromatici costituiscono circa l'87-95 % della frazione solubile in acqua.</p> <p>Ai fini ambientali risultano dunque critici:</p> <ul style="list-style-type: none"> • gli idrocarburi aromatici mononucleari (BTEX: benzene, toluene, etilbenzene, xileni); • tra gli idrocarburi aromatici binucleari: naftalene e metilnaftaleni <p>In condizioni di laboratorio la benzina evapora, per circa il 50 % peso, in 2 ore e dopo 6-8 ore si riduce al 20 % del peso iniziale. Entro le 24 ore, la frazione monoaromatica evapora in maniera praticamente completa.</p> <p>Mentre i componenti C₆-C₉ vengono persi prevalentemente per evaporazione, la biodegradazione primaria rimuove i componenti C₁₀-C₁₁.</p> <p>La biodegradabilità, assieme alla solubilità in acqua e all'adsorbimento da parte del suolo, sono i fattori principali responsabili della migrazione nel suolo e nel sottosuolo.</p> <p>La solubilità in acqua (sulla base della concentrazione di BTEX) è di 240 e 112 µg/L per la benzina con Pb e senza Pb rispettivamente.</p> <p>Alcuni studi hanno dimostrato la capacità di microorganismi di biodegradare gli idrocarburi aromatici fino a valori inferiori a 0,5 µg/L, in presenza di sufficiente ossigeno, fosforo e azoto.</p> <p>Per le benzine commerciali è necessario prendere in esame anche la tipologia degli additivi presenti, potenzialmente diversi da mercato a mercato.</p>

Fig. 1a - Caratteristiche essenziali ai fini ambientali di benzine.

Composizione media	Per motore	Per aviazione
Paraffine (lineari e ramificate), % vol	30-90	75-100
Cicloparaffine (nafteni), % vol	1-35	0-1
Aromatici, % vol	5-55	0-25
Olefine, % vol	0-20	
Composti ossigenati (Direttiva: 85/536/EEC: max 3,7 % peso di ossigeno):		
metanolo, % vol	max 3	
etanolo, % vol	max 5	
TBA, % vol	max 7	
MTBE, % vol	max 15	
Altri additivi (Direttiva:85/210/EEC):		
Piombo:		
Benzina senza Pb, gL ⁻¹	0,013	
Benzina piombata: gL ⁻¹		
dal 1 giugno 1991	< 0,15	
dal 1 aprile 1989	< 0,30	
prima del 1989	< 0,40	
(Direttiva:98/70/CE)		
dal 1 gennaio 2002, gL ⁻¹	< 0,005	
Nota:		
- La benzina piombata era precedentemente additivata con etilene dibromuro (EDB) e/o etilene dicloruro (EDC).		
- Con la Direttiva 2000/71/CE alcune specifiche sono state modificate.		

FIG. 1b - Caratteristiche essenziali ai fini ambientali delle benzine.

Classificazione EINECS: vengono identificati tre gruppi diversi: da distillazione primaria, da <i>cracking</i> , di altro tipo.		
Intervallo tipico di atomi di carbonio	Intervallo tipico di distillazione (°C)	Persistenza- biodegradabilità
C ₉ -C ₁₆	145-300	<p>A seguito di perdite o di versamenti i componenti più volatili evaporano e vengono fotodegradati prevalentemente mediante reazioni di tipo radicalico (attraverso composti di tipo idrossi-radicalico presenti nell'atmosfera). L'<i>emivita</i> (stimata) di molti composti nell'atmosfera è inferiore alle 24 ore.</p> <p>La solubilità in acqua è bassa ma la frazione solubile è costituita prevalentemente da aromatici.</p> <p>Gli idrocarburi meno volatili del cherosene e del <i>jet fuel</i> persistono in ambiente acquoso per lunghi periodi: galleggiano sulla superficie dell'acqua o vengono assorbiti dal suolo o dai sedimenti, dove comunque vengono degradati con velocità piuttosto lenta.</p> <p>Studi di laboratorio hanno dimostrato che non è possibile fare previsioni sulla velocità di degradazione del cherosene sulla base degli attuali test di laboratorio.</p> <p>Studi effettuati sul campo hanno evidenziato che la tecnica di bonifica migliore risulta il <i>soil venting</i> con una velocità di degradazione da 2 a 20 mg/Kg suolo/giorno.</p> <p>La vita media per un <i>jet fuel</i> a 27 °C risulta funzione del tipo di suolo (da circa 12 settimane a 3,5 settimane).</p> <p>La biobonifica diventa efficace in presenza di azoto e fosforo in suolo fertile argilloso.</p> <p>Sono stati effettuati studi sull'efficacia di diversi microorganismi rilevati in suolo contaminato da <i>jet fuel</i>.</p> <p>Il log <i>K_{ow}</i> è compreso nell'intervallo 3,3-6.</p>

FIG. 2 - Caratteristiche essenziali ai fini ambientali di cherosene e combustibili per aviogetti.

Classificazione EINECS: alla voce "gasolio" (GO) vengono individuati 68 diversi prodotti.		
Intervallo tipico di atomi di carbonio	Intervallo tipico di distillazione (°C)	Persistenza- biodegradabilità
C ₁₁ -C ₂₅	150-450	<p>Nel rilascio nell'ambiente i componenti più leggeri vengono tipicamente persi per evaporazione. I composti rimanenti possono disperdersi in acqua o essere adsorbiti nel suolo o nei sedimenti.</p> <p>In acqua, i GO tendono a galleggiare e a disperdersi "a macchia d'olio"; i componenti solubili in acqua passano nella fase acquosa.</p> <p>Sono disponibili dati ottenuti da test normalizzati sulla biodegradabilità dei GO.</p> <p>Le linee guida OECD indicano che i GO (pur non potendo essere definiti "facilmente biodegradabili") vengono facilmente attaccati da microorganismi e che circa il 40% viene degradato in 28 giorni.</p> <p>Ci si può attendere che, in condizioni aerobiche, i componenti a più basso peso molecolare vengano degradati rapidamente, mentre gli idrocarburi a più alto peso molecolare, specie gli idrocarburi aromatici policiclici (IAP), vengano degradati lentamente.</p> <p>In condizioni anaerobiche, la velocità di biodegradazione è trascurabile e si osserva forte persistenza. Per favorire la biodegradazione è dunque indispensabile fornire ossigeno.</p> <p>In presenza di luce, il fenomeno chiave nella degradazione del GO e degli IAP, in particolare, è la fotoossidazione.</p> <p>L'intervallo per il log K_{ow} (calcolato) va da 3,9 a valori maggiore di 6.</p>

Fig. 3 - Caratteristiche essenziali ai fini ambientali dei gasoli (GO).

Classificazione EINECS: vengono individuati 41 prodotti di composizione diversa identificabili come oli combustibili (OC).		
Intervallo tipico di atomi di carbonio	Intervallo tipico di distillazione (°C)	Persistenza- biodegradabilità
C ₂₀ -C ₅₀	350-650	<p>La composizione chimica degli OC è molto variabile: l'ecotossicità dipende sia dal tipo di olio (grezzo di provenienza) sia dal distillato impiegato come diluente per portare l'OC a specifica.</p> <p>Negli OC si concentrano anche i composti organometallici originariamente presenti nel grezzo. Tra questi, i più rilevanti sono i composti di nichel e vanadio.</p> <p>La solubilità acquosa di tutti i componenti dell'OC è molto bassa: i componenti del diluente a più basso peso molecolare (particolarmente gli idrocarburi aromatici) hanno una maggiore solubilità.</p> <p>Gli idrocarburi più leggeri sono anche quelli con tensione di vapore più elevata a temperatura ambiente e possono essere persi per volatilizzazione.</p> <p>Se la densità dell'OC è maggiore di 1, a contatto con l'acqua l'olio tende ad affondare. Da rilevare inoltre che, anche quando la densità è minore di 1, poiché i componenti a più basso peso molecolare possono essere persi per evaporazione o dissoluzione in acqua, la densità di un OC può aumentare a tal punto da conferire all'olio la tendenza ad affondare. Questa frazione del prodotto assume una consistenza tipo <i>tar</i> e, affondando, può interagire col substrato o esservi adsorbito.</p> <p>La composizione di un OC cambia notevolmente nel corso dell'invecchiamento. Inizialmente, entro il primo anno dallo sversamento, si verifica una rapida perdita dei componenti più leggeri (per evaporazione, dissoluzione e biodegradazione) con rimozione, quasi totale, delle <i>n</i>-paraffine fino a C₁₇.</p> <p>I composti biodegradati a minore velocità sono pristano e fitano che persistono per alcuni anni.</p> <p>I composti <i>iso</i>-paraffinici sono i più resistenti alla biodegradazione.</p> <p>I valori di log K_{ow} dei componenti di un OC vanno da 2,7 a oltre 6. Ciò suggerisce la possibilità di bioaccumulo.</p>

Fig. 4 - Caratteristiche essenziali ai fini ambientali degli oli combustibili (OC) pesanti.

Classificazione EINECS: gli oli base per lubrificanti (OL) sono suddivisi in tre gruppi: non raffinati o blandamente raffinati; altamente raffinati; di altro tipo (in funzione del processo di produzione).		
Intervallo tipico di atomi di carbonio	Intervallo tipico di distillazione (°C)	Persistenza- biodegradabilità
C ₁₅ -C ₅₀	300-600 (800 per prodotti <i>vacuum</i>)	<p>La tensione di vapore è tanto bassa che le perdite per evaporazione sono del tutto trascurabili.</p> <p>A contatto con l'acqua galleggiano e si disperdono a "macchia d'olio" ad una velocità legata principalmente alla viscosità. Anche la solubilità in acqua è molto bassa e la dispersione è legata essenzialmente al movimento dell'acqua. L'adsorbimento da parte dei sedimenti è il processo dominante. A contatto col suolo hanno scarsa mobilità: il fenomeno dominante è il fisiadsorbimento.</p> <p>Studi condotti attraverso numerosi test (tra cui 301B modificato o 301D, OECD), che misurano la degradazione primaria, hanno indicato che:</p> <ul style="list-style-type: none"> • a parità di viscosità, gli oli paraffinici mostrano una biodegradabilità leggermente superiore a quella dei naftenici; • maggiore è la viscosità, più bassa è la biodegradazione; • in ogni caso i risultati dipendono dal test impiegato e dalla manipolazione del campione; • gli OL non vengono facilmente biodegradati nei test standardizzati di 28 giorni. <p>Dati specifici sulla degradazione degli OL in mare indicano una buona biodegradabilità; in relazione al suolo, i dati disponibili sono limitati.</p> <p>Recentemente si sta valutando la biodegradabilità ad opera di microorganismi anaerobici, intervento particolarmente promettente proprio nel caso dei prodotti adsorbiti prevalentemente dai sedimenti.</p> <p>Bioaccumulo: la maggior parte degli idrocarburi presenti negli OL hanno valori di log k_{ow} di 4 o maggiori: dovrebbero dunque essere classificati come bioaccumulabili. Tuttavia il dato di k_{ow} ha valore indicativo e non esistono dati provati di bioaccumulo significativo.</p>

Fig. 5 - Caratteristiche essenziali ai fini ambientali delle basi lubrificanti (OL).

Classificazione EINECS: comprende 9 codici per bitumi e residui da vuoto	
Intervallo tipico di atomi di carbonio	Persistenza- biodegradabilità
I composti presenti hanno peso molecolare compreso tra 500 e 15.000	<p>Sono semisolidi o termoplastici. Contengono una frazione relativamente elevata di idrocarburi con numero di atomi di carbonio superiore a 25 e con alto rapporto C/H.</p> <p>Sono presenti idrocarburi aromatici ad alto numero di anelli condensati, paraffine e nafteni ad elevato peso molecolare.</p> <p>La solubilità in acqua è tanto bassa che il fenomeno di trasporto attraverso un mezzo acquoso può essere considerato trascurabile. Proprio a causa di tali caratteristiche, si può prevedere una scarsa biodegradabilità nell'ambiente.</p> <p>La maggior parte dei processi impiegati in raffineria per la produzione di bitumi (in particolare, lo stadio di distillazione <i>vacuum</i>) rimuove gran parte degli idrocarburi aromatici policiclici (con anelli da 3 a 7).</p> <p>Se scaldati ad elevata temperatura, sviluppano fumi.</p>

Fig. 6 - Caratteristiche essenziali ai fini ambientali di bitumi e derivati.

Tuttavia, dal punto di vista operativo, dato l'alto numero di tali composti, la valutazione del comportamento di ogni singolo composto è impraticabile. Nelle indagini riguardanti i siti inquinati [8; 9], vengono pertanto selezionati i composti chimici

maggiormente significativi (*chemicals of concern*) in funzione del loro potenziale di rischio per la salute umana e per l'ambiente. In particolare, nel caso dell'inquinamento da petrolio, l'attenzione viene rivolta ai "composti indicatori" riportati nella Tabella

TABELLA I
Principali composti indicatori e parametri chiave nell'inquinamento da petrolio

Composto	Solubilità in acqua (mg/L) (25 °C)	Coefficiente di ripartizione ottanolo/acqua, (log K_{OW})	Coefficiente di adsorbimento nella sostanza organica (log K_{OC})	Costante di Henry H (m ³ -atm/mol)
Benzene	1750	2,13	1,58	5,5 E-03
Toluene	535	2,73	2,48 (stimato)	6,6 E-03
Etilbenzene	152	3,13	3,04 (stimato)	8,7 E-03
Xileni	146-198	3,26	2,38-2,79	<i>o</i> -xilene:5,1 E-03
<i>n</i> -Esano	13	...	...
MTBE	48.000	1,06-1,30	1,08	1 E-03
Metil etil chetone	268.000	0,26	0,65	
Metil <i>iso</i> -butil chetone	...	...	...
Metanolo	...	...	...
Etanolo	1.000.000	-0,032	0,34	
<i>terz</i> -Butil alcol	...	...	...
Piombo (tetraetile)	0,8	...	3,69	7,98 E-02
Etilene dicloruro	8.520	1,48	1,15	
Etilene dibromuro	4.300	1,76	1,64	
Idrocarburi aromatici policiclici:				
Pirene	0,132	4,88	4,58	
Benzo(<i>a</i>)pirene	0,00120	5,98	5,59	1 E-04
Antracene	0,0450	4,45	4,15	
Fenantrene	1,00	4,46	4,15	
Naftalene	31,0	3,28	3,11	1,15 E-03
Crisene	0,00180	5,61	5,30	
Benzo(<i>k</i>)fluorantene	0,430	6,06	5,74	
Fluorene	1,69	4,20	3,86	
Fluorantene	0,206	4,90	4,58	
Benzo(<i>g,h,i</i>)perilene	0,000700	6,51	6,20	
Benzo(<i>b</i>)fluorantene	0,0140	6,06	5,74	
Benzo(<i>a</i>)antracene	0,00670	5,60	6,14	

(Elaborazione da ASTM E1739 e rif. citati)

I [8], assieme alle loro proprietà chimico-fisiche essenziali.

La selezione dei *chemicals of concern* è basata su una numerosa serie di valutazioni (vie di esposizione, concentrazione tipica nei prodotti petroliferi, caratteristiche di mobilità, proprietà tossicologiche, ecc.) e su altri fattori "estetici", quali, ad esempio, l'odore.

Nel caso della benzina e dei distillati medi, ad

esempio, la contaminazione del suolo e delle acque (nei confronti dell'uomo e degli organismi acquatici, potenziali ricettori dell'inquinamento) si basa su tre principali classi di composti: gli idrocarburi aromatici leggeri, gli idrocarburi aromatici policiclici e, per le contaminazioni di più vecchia data, i composti del piombo, eventualmente assieme a etilene dibromuro (EDB) e etilene dicloruro (EDC), precedentemente impiegati come promotori di reazione

nelle benzine piombate. La presenza, anche sospettata di additivi, ad esempio MTBE, merita la dovuta considerazione (si veda anche la Figura 1).

Alla luce del significato fisico dei parametri della Tabella I, è dunque possibile tracciare il comportamento medio atteso dei composti critici ai fini ambientali. Per facilitare la comprensione del testo, si richiama brevemente il significato (ai fini dell'impatto ambientale) di H (costante di Henry), K_{oc} e K_{ow} (diffusamente illustrati nella prima parte della rassegna [1]). La costante di Henry è una misura della tendenza di un composto a passare da una fase acquosa alla fase vapore. Il coefficiente di adsorbimento di un composto nella sostanza organica (K_{oc}) esprime, seppure in termini non rigorosi (ma sufficientemente rappresentativi) la tendenza di un composto ad essere adsorbito dalla frazione organica del suolo (o dei sedimenti). Il coefficiente di ripartizione ottanolo/acqua (K_{ow}) è un indice della diversa affinità di un composto per le due fasi ottanolo/acqua: alti valori di K_{ow} indicano composti con marcate caratteristiche liofile (o idrofobe) e, in definitiva, composti con elevate potenzialità di bioaccumulo negli organismi viventi (v. Glossario, Parte I, [1]). Come è stato sottolineato, K_{oc} e K_{ow} , pur non essendo parametri rigorosi, sono sufficientemente rappresentativi del comportamento medio, in termini di rischio, di numerose classi di composti. Tali parametri forniscono comunque informazioni utili per una classificazione preliminare che consente di individuare composti critici da sottoporre a verifica successiva, mediante test o studi più approfonditi (che implicano tempi più lunghi e costi maggiori).

Per esemplificare, dai dati Tabella I emerge che il benzene e il toluene (con elevata costante di Henry), dopo il rilascio nell'ambiente, hanno alta tendenza a volatilizzare. L'elevata solubilità in acqua e il valore relativamente basso di $\log K_{oc}$ indicano una scarsa tendenza all'adsorbimento di tali composti da parte della frazione organica del suolo e una loro maggiore propensione a passare in fase acquosa. Il valore relativamente basso di K_{ow} è indice di potenziale biodegradabilità. Dunque, per il benzene e il toluene, non ci si aspettano problemi seri in termini di bioaccumulo.

Considerazioni analoghe possono essere fatte per gli altri composti.

In particolare, si può osservare che gli idrocarburi policiclici (escluso il naftalene che ha proprietà di passaggio tra gli idrocarburi monoaromatici e quelli policiclici a più di 3 anelli condensati) hanno valori di solubilità in acqua di ordini di grandezza inferiori e, parallelamente, valori di K_{oc} e di K_{ow} di ordini di grandezza superiori, a quelli degli altri composti elencati nella Tabella I. Dal punto di vista del destino ambientale, ci si deve dunque attendere che tali composti, a contatto col suolo, vengano fortemente adsorbiti dalla frazione organica presente. La tendenza all'adsorbimento nel suolo (K_{oc}) è funzione del peso molecolare, o, più precisamente, delle dimensioni superficiali del composto, a conferma del fenomeno chimico-fisico che regola l'adsorbimento e che è legato alla possibilità di formazione di forze di interazione tra il composto stesso e il substrato

organico del suolo. Il rischio di bioaccumulo (alto valore di K_{ow}) è legato alla possibilità di diffusione attraverso la catena alimentare.

La tendenza all'adsorbimento nel suolo degli idrocarburi policiclici è confermata dalla distribuzione, ottenuta in uno stato di equilibrio quasi stazionario, tra le tre fasi: soluzione/sedimenti/microorganismi viventi (*biota*), distribuzione che è a netto favore dei sedimenti nei quali gli idrocarburi aromatici policiclici (IAP) si concentrano in percentuali molto elevate.

Per i metilnaftaleni, non riportati nella Tabella, la solubilità in acqua diminuisce all'aumentare del grado di sostituzione alchilica (2 mg/L per l'1,4,5-trimetilnaftalene contro i 31 mg/L del naftalene [8]); i valori di $\log K_{ow}$ sono maggiori di 3,5. Tuttavia grazie ad un moderato grado di biodegradabilità, la tendenza al bioaccumulo è limitata.

3. Conclusioni

Una conoscenza approfondita dei meccanismi di diffusione degli idrocarburi e dei parametri peculiari degli idrocarburi e del suolo è premessa essenziale per affrontare in maniera rigorosa la gestione degli interventi di contenimento e di bonifica sui siti contaminati. Maggiori sono il numero e la specificità delle informazioni disponibili sul terreno inquinato e sugli agenti inquinanti, migliore è la capacità di descrivere il "sistema sito" e di prevedere l'esatta evoluzione dell'inquinamento e, in definitiva, più realistica è la valutazione del pericolo connesso.

Quanto esposto, se da un lato mostra la complessità del problema, dall'altro evidenzia che le indagini sui siti inquinati, se supportate da conoscenze scientifiche affidabili, possono diventare uno strumento fondamentale, sia nella gestione degli interventi sul suolo inquinato sia nell'adozione di misure di prevenzione, del resto sempre più auspicabili.

Nel caso specifico dell'inquinamento da petrolio, la conoscenza delle caratteristiche medie dei vari prodotti e quelle peculiari dei "composti indicatori" sono il punto di partenza per tracciare il comportamento atteso di un prodotto petrolifero nell'ambiente, nel suolo in particolare. Note anche le caratteristiche del terreno, il quadro è sufficientemente completo per descrivere il potenziale impatto ambientale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. ZERLIA Riv. Combustibili (2001), 55, 33.
- [2] CONCAWE Product Dossier no. 92/103 - *Gasolines*.
- [3] CONCAWE Product Dossier no. 94/106 - *Kerosenes/jet fuels*.
- [4] CONCAWE Product Dossier no. 95/107 - *Gas oils (diesel fuels/heating oils)*.
- [5] CONCAWE Product Dossier no. 98/109 - *Heavy fuel oils*.
- [6] CONCAWE Product Dossier no. 97/108 - *Lubrica-*

ting oil basestocks.

- [7] CONCAWE Product Dossier no. 92/104 - *Bitumens and bitumen derivatives*.
- [8] ASTM E 1739 - 95 - *Risk-based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*.
- [9] CONCAWE Report no. 2 /97 - *European oil industry guidelines for risk-based assessment of contaminated sites*.

Testi e riferimenti di carattere generale

- Soils contaminated by petroleum: Environmental and Public Health Effects, Edward J. Calabrese, Paul T. Kostecki Ed., 1987.
- Remediation of petroleum contaminated soils – Biological, Physical and Chemical Process, Eve Riser-Roberts Ed., 1998.
- Metodi normalizzati di analisi del suolo, Società Italiana della Scienza del Suolo, Edagricole, 1985.
- H. H. Rump, H. Krist, Manuale di laboratorio, per l'analisi delle acque, delle acque reflue e del suolo, Ed. Cefnor, 1991.
- "Metodi ufficiali di analisi chimica del suolo", G.U. n. 248/1999.

Approfondimenti sulla tossicità dei prodotti chimici nell'ambiente:

European Environment Agency (EEA): <http://service.eea.eu.int:80/enviowindows/44.shtml>

Metodi internazionali per la determinazione della biodegradabilità:

Ocde/gd(95)134 Oecd Environment Monographs no. 105 - *Report of the oecd workshop on environmental hazard/risk assessment (organisation for economic co-operation and development)*. Paris 1995.

Metodi per la determinazione dei coefficienti Koc e Kow:

ASTM E1195-87(1993)e1 - *Standard Test Method for Determining a Sorption Constant (K_{oc}) for an Organic Chemical in Soil and Sediments*.

ASTM E1147-92(1997) - *Standard Test Method for Partition Coefficient (n-Octanol/Water) Estimation by Liquid Chromatography*.

Ricevuto, 12 marzo 2001. Accettato, 5 aprile 2001.