
Projecte Final de Carrera

BIOREMEDIACIÓ DE SÒLS CONTAMINATS
PER HIDROCARBURS.

"STATE OF THE ART" DE LA
BIOREMEDIACIÓ A CATALUNYA.

Gerard Carrascosa Cervilla

Dirigit per Anna Maria Solanas Cánovas

Llicenciatura de Ciències Ambientals

Universitat de Barcelona

Barcelona, 26 de Juny de 2.006

OBJECTIUS DEL PROJECTE.

El present projecte pretén donar una visió global del món de la bioremediació a Catalunya. Amb aquest fi, s'han plantejat tres objectius:

- L'estudi dels processos fonamentals que succeeixen durant la bioremediació d'un sòl contaminat per hidrocarburs. Es descriuen les característiques relacionades amb el contaminant, amb el sòl i amb les poblacions microbianes presents al sòl, així com algunes de les estratègies més habituals de bioremediació.
- Conèixer la situació de la gestió de sòls contaminats a Catalunya i l'ús de les tècniques de bioremediació en aquesta Comunitat Autònoma. Per fer aquesta part es va contactar amb professionals de l'Agència de Residus de Catalunya, dels departaments encarregats de la Gestió de Sòls Contaminats. Tot i que l'aplicació de les tècniques de bioremediació a Catalunya no supera el 5% dels treballs de descontaminació realitzats, es considera que és una tècnica que cal afavorir donat que permet l'actuació in situ, evitant la generació de residus. Així mateix es va contactar amb experts i professionals que treballen en el camp de la descontaminació de sòls i en l'ús de tècniques de bioremediació perquè donessin la seva opinió sobre l'estat actual i la possible evolució dels usos de la bioremediació a Catalunya en el futur a curt termini.
- Descriure un cas concret de l'ús de la tecnologia de bioremediació per a tractar un sòl contaminat de Clipper Oil, SA a Lliçà de Vall. En aquest cas l'Agència de Residus de Catalunya va actuar de forma subsidiària, encomanant a Tecnología Química y Medio Ambiente, SL. (actualment ECOCAT, SL.) l'execució del projecte, que va consistir en un confinament actiu de la contaminació i un bioventeig a escala pilot. El Departament de Microbiologia de la Universitat de Barcelona va dur a terme els estudis de tractabilitat del sòl.

AGRAÏMENTS.

En primer lloc vull agrair a la Dra. Anna Maria Solanas, la meva directora del projecte, el seu temps i interès mostrat.

Així mateix vull agrair a en Josep Miquel Subirana i a en Joan Bartolls, grans professionals de l'Agència de Residus de Catalunya, la seva col·laboració i el tracte rebut durant el procés d'obtenció d'informació corresponent als departaments on desenvolupen la seva activitat professional.

Agrair també a Santiago Ramas, Adolfo Andrés, Carlos Alfaro, Daniel Fernández, Xavier Barberà, Pilar Riera, Núria Guasca, Jordi Boronat, Verónica Arroyo i a tots aquells professionals i experts del camp de la descontaminació de sòls que m'han donat la seva visió particular sobre la situació del món de la gestió dels sòls contaminats i sobre l'estat de la bioremediació a Catalunya.

ÍNDEX

PREFACI.

Origen del projecte.....	1
--------------------------	---

0. INTRODUCCIÓ.

Abast del projecte.....	3
-------------------------	---

1. BIOREMEDIACIÓ DE SÒLS CONTAMINATS PER HIDROCARBURS.

1.1. EL SÒL.....	6
1.1.1. Estructura i components del sòl.....	6
1.1.2. Les poblacions microbianes.....	7
1.1.3. Contaminació del sòl amb hidrocarburs derivats del petroli.....	8
1.2. LEGISLACIÓ EN MATÈRIA DE SÒLS CONTAMINATS.....	12
1.2.1. Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados (1995-2005).....	13
1.2.2. Llei de residus 10/1998.....	14
1.2.3. Real Decreto 9/2005.....	16
1.3. ASPECTES GENERALS DE LA BIOREMEDIACIÓ DE SÒLS.....	18
1.4. FACTORS QUE INFLUEIXEN EN LA BIOREMEDIACIÓ DE SÒLS.....	22
1.4.1. Característiques relacionades amb el medi.....	22
1.4.1.1. Característiques físiques del sòl.....	22
1.4.1.2. Ambient químic del sòl.....	24
1.4.2. Característiques relacionades amb les poblacions microbianes	26
1.4.3. Característiques relacionades amb el contaminant.....	28
1.4.3.1. Estructura química.....	28
1.4.3.2. Concentració i toxicitat.....	30
1.4.3.3. Biodisponibilitat.....	31

1.5. PRINCIPALS TECNOLOGIES DE BIOREMEDIACIÓ DE SÒLS.....	35
1.5.1. Land farming i biopiles.....	35
1.5.2. Bioventeig i biosparging.....	38
1.5.3. Bioreactors.....	41
2. ESTAT D'IMPLEMENTACIÓ DE LA BIOREMEDIACIÓ A CATALUNYA.	
2.1. LA SITUACIÓ DELS SÒLS CONTAMINATS A CATALUNYA.....	44
2.2. GESTIÓ DELS SÒLS CONTAMINATS A CATALUNYA.....	49
2.2.1. Fase de reconeixement preliminar.....	50
2.2.2. Fase d'avaluació preliminar.....	53
2.2.3. Fase d'avaluació detallada.....	56
2.2.4. Fase de recuperació.....	57
2.3. LA BIOREMEDIACIÓ AL MERCAT DE TÈCNiques DE RECUPERACIÓ DE SÒLS: ÚS DELS TRACTAMENTS BIOLÒGICS AL TERRITORI CATALÀ.....	60
2.3.1. Opinió de professionals del camp de la descontaminació de sòls.....	61
2.3.2. Directori d'empreses dedicades a la descontaminació de sòls.....	67
3. ESTUDI D'UN CAS PRÀCTIC: LA RECUPERACIÓ DELS TERRENYS DE CLIPPER OIL, SA A LLIÇÀ DE VALL.	
3.1. ANTECEDENTS.....	72
3.2. NETEJA I CONDICIONAMENT DE L'EMPLAÇAMENT.....	75
3.3. CARACTERITZACIÓ DEL TERRENY.....	77
3.4. CONFINAMENT DE LA ZONA CONTAMINADA.....	79

3.5. EXTRACCIÓ DE LA FASE LLIURE.....	81
3.6. BIOREMEDIACIÓ DELS TERRENYS CONTAMINATS.....	82
3.6.1. Els assaigs de tractabilitat.....	82
3.6.1.1. Assaigs a escala microcosmos.....	82
3.6.1.2. Assaigs a escala mesocosmos.....	83
3.6.1.3. Conclusions dels assaigs de tractabilitat.....	88
3.6.2. Mesures aplicades sobre el terreny (escala pilot).....	89
4. CONCLUSIONS.	93
5. BIBLIOGRAFIA.....	98

PREFACI.

Origen del projecte.

Els processos de producció, refinat i transport d'hidrocarburs provoquen sovint fenòmens de contaminació del medi edàfic. Fins fa poc a l'Estat espanyol no hi havia cap normativa que regulés la gestió dels sòls contaminats. El retard en l'aprovació d'aquest marc normatiu, en comparació amb altres vectors ambientals com poden ser els recursos hídrics o l'aire, es deu a la complexitat que suposa la gestió dels sòls contaminats, procés en el que intervenen un nombre elevat d'interessos, fonamentalment de caire econòmic, però també socials i ambientals.

La tecnologia ha sabut donar resposta als problemes de contaminació del sòl i s'han desenvolupat un nombre elevat de procediments per a corregir i eliminar els contaminants presents al sòl fins a nivells que no representin un risc per als ecosistemes i per a la salut humana. La diversitat d'emplaçaments contaminats, tant pel que fa al tipus de contaminació com pel que fa a les característiques físico-químiques i biològiques dels emplaçaments, fa que l'aplicació de les tècniques de descontaminació es dissenyin de forma específica per a cada emplaçament.

Una de les tecnologies ambientalment sostenible que s'ha demostrat eficaç per al tractament de sòls contaminats és la bioremediació. Els Estats Units ha estat pioner en l'ús d'aquestes tecnologies i alguns països de la Unió Europea han pres com a exemples els projectes de bioremediació duts a terme en aquest país. Tot i que a l'àmbit europeu l'ús de la bioremediació ha començat a desenvolupar-se més tard, la seva aplicació s'ha anat incrementant progressivament des de la dècada dels 90. Actualment des de diferents àmbits de la Unió Europea s'aposta per l'ús de la bioremediació davant d'altres tecnologies menys respectuoses amb el medi, com són l'excavació i transport del material contaminat cap a abocadors o els tractaments físico-químics, que alteren molt significativament les característiques originals del sòl.

Aquest projecte s'emmarca en la nova situació que ha suposat a l'Estat espanyol la recent aprovació del Real Decreto 9/2005 que regula específicament la contaminació del sòl. Aquest reial decret ha de permetre que la indústria de la descontaminació de sòls incrementi el seu volum de treball, revitalitzant aquest sector ambiental i obrint noves possibilitats de negoci dins de l'àmbit de les consultores i de les enginyeries. En aquesta situació, promoure el coneixement i rendibilitat de la tecnologia de la bioremediació pot afavorir la gestió sostenible dels nostres recursos i del medi ambient.

Actualment països com el Regne Unit o Bèlgica es consideren pioners en l'ús de tècniques de bioremediació a la Unió Europea. Les polítiques desenvolupades en aquests països per a promoure l'ús de les tecnologies de bioremediació poden servir d'exemple a altres països on el mercat d'aquesta tecnologia està menys desenvolupat.

0. INTRODUCCIÓ.

Abast del projecte.

L'objectiu principal d'aquest projecte és donar una visió real de l'estat d'implementació de la tecnologia de bioremediació al territori català. Amb aquesta finalitat es presenten les principals característiques dels processos que es donen durant la bioremediació d'un sòl contaminat per tal d'entendre els avantatges i limitacions d'aquesta tecnologia. El projecte es centra en la contaminació per hidrocarburs ja que generalment s'accepta que la bioremediació pot ser una tècnica especialment eficaç en aquests casos de contaminació. Com a exemple concret d'aplicació de bioremediació a Catalunya es presenten els treballs duts terme a les instal·lacions de Clipper Oil, SA a Lliçà de Vall. Tot i que la bioremediació es va aplicar només a escala pilot, els resultats dels assaigs van demostrar una elevada capacitat d'aquesta tecnologia per a remediare un sòl contaminat per una barreja d'hidrocarburs.

La redacció del projecte s'ha fonamentat en dos camps: la recerca bibliogràfica i les consultes a càrrecs públics, professionals i experts relacionats amb el mercat de les tecnologies de remediació.

La recerca bibliogràfica s'ha fonamentat en la consulta de tractats específics sobre bioremediació amb l'objectiu de proporcionar informació sobre els aspectes generals, factors que intervenen en el procés i principals tecnologies implicades en la bioremediació d'un sòl.

Donada la manca d'informes publicats que analitzin l'Estat de l'Art de la bioremediació a Catalunya, aquesta informació s'ha obtingut directament consultant fonts de l'Agència de Residus de Catalunya. L'objectiu d'aquestes consultes ha estat conèixer el funcionament de la gestió de sòls contaminats a Catalunya i la situació de la implementació de tècniques de bioremediació.

Així mateix, s'han realitzat consultes a experts i professionals que treballen en empreses que porten a terme projectes de recuperació de sòls. Prèviament es va realitzar un directori d'empreses que treballen en temes de contaminació de sòls (estudis de caracterització) i la seva descontaminació (aplicació de mesures de recuperació). L'objectiu d'aquestes consultes ha estat conèixer l'opinió d'aquests professionals sobre l'eficàcia dels processos de bioremediació i les causes per les que aquesta tecnologia no està tan desenvolupada com a altres països de la Unió Europea.

Finalment, l'explicació del projecte de remediació dut a terme a les instal·lacions de Clipper Oil, SA s'ha realitzat en base als documents tècnics de recuperació del subsòl desenvolupats per Tecnología Química y Medio Ambiente, SA i a la informació facilitada per alguns dels investigadors i professionals que van dur a terme els assaigs de tractabilitat del sòl i la implementació de les mesures de bioremediació a escala pilot.

**BIOREMEDIACIÓ DE SÒLS CONTAMINATS
PER HIDROCARBURS.**

1.1. EL SÒL.

1.1.1. Estructura i components del sòl.

El sòl és la part més superficial de l'escorça terrestre, resultat de l'acció conjunta del clima, la vegetació i els organismes vius sobre la roca mare al llarg del temps. El sòl actua com a interfície entre la roca mare (litosfera), l'aire (atmosfera), l'aigua (hidrosfera) i els organismes vius (biosfera). És un sistema dinàmic, format per una matriu de components orgànics i minerals que s'estructuren de formes diverses, i està constituït per un entramat de forats i porus per on circulen l'aigua i els gasos.

Els sòls es classifiquen segons el percentatge de cadascun dels components que el formen. Segons un estudi de la Comissió Europea es poden distingir 320 tipus de sòls a Europa. Cada tipologia de sòl té una vulnerabilitat diferent per a les pressions que s'exerceixen sobre ell¹.

Els principals factors que participen en la formació del sòl són la roca mare, el clima, la topografia, l'activitat biològica i el temps. La taxa de formació de sòl és extremadament lenta, a escala humana el sòl es pot considerar un recurs no renovable.



El sòl constitueix la base dels ecosistemes terrestres i desenvolupa funcions importants per al desenvolupament de la vida i de la societat humana. Les funcions bàsiques que realitza sobre els ecosistemes són, entre d'altres: producció de biomassa, hàbitat d'organismes, reserva genètica, i filtratge, esmorteïment i transformació de substàncies nocives. D'altra banda el sòl és el medi on es desenvolupen les activitats humanes i proporciona molts dels recursos bàsics per a aquestes activitats.

¹ AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE (2.002). *Con los pies en la Tierra: la degradación del suelo y el desarrollo sostenible en Europa*, p. 7

1.1.2. Les poblacions microbianes del sòl.

El sòl és un medi ric en vida, amb una gran diversitat de microorganismes, plantes i animals que exerceixen un paper fonamental dins del sòl. En general el sòl és un hàbitat favorable per a la proliferació de microorganismes en microcolònies que es desenvolupen sobre les partícules del sòl. Els principals organismes que provoquen la transformació dels compostos químics del carboni i la seva eliminació del medi són els microorganismes, en particular els bacteris i els fongs².

Una de les característiques del sòl és que posseeix una gran varietat de microhàbitats. Un petit agregat de sòl pot tenir diferents ambients degut a l'existència de diferents substrats, concentracions d'oxigen, quantitat d'aigua i nutrients, variacions de pH, etc. Aquest fet permet l'existència d'una gran varietat de poblacions microbianes adaptades a microambients específics i que han desenvolupat rutes metabòliques especialitzades que optimitzen els recursos de cada microhàbitat.

Es considera que a cada gram de sòl es poden trobar entre 10^6 i 10^9 bacteris cultivables³. Segons un estudi europeu la diversitat bacteriana del sòl pot correspondre a entre 15 mil i 20 mil espècies diferents per gram de sòl⁴, tot i que els gèneres més freqüents són *Acinetobacter*, *Agrabacterium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Caulobacter*, *Cellulomonas*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Streptococcus* y *Xantomonas*⁵.

Un altre grup important d'organismes presents al sòl amb activitat degradadora són els fongs. Els fongs constitueixen la proporció més elevada de biomassa microbiana dels sòl i generalment tenen una mobilitat major que els bacteris. S'estima que es poden trobar 10^4 - 10^7 fongs/g de sòl⁶.

² L. Y. YOUNG I ALTRES (1.995). *Microbial transformation and degradation of toxic organic chemicals*, pg.77.

³ M. KÄSTNER (2.000). "Humification" *Process or Formation of Refractori Soil Organic Mater*, p. 95

⁴ COM 179 FINAL (2.002). *Towards a thematic strategy for soil protection*, p. 17

⁵ R.M. ATLAS I R. BARTHA (2.002). *Ecologia microbiana i microbiologia ambiental*, p. 367

⁶ M. KÄSTNER (2.000). "Humification" *Process or Formation of Refractori Soil Organic Mater*, p. 95

Els fenòmens de contaminació provoquen una alteració en l'estructura de les poblacions microbianes autòctones ja que les comunitats microbianes presents als sòls contaminats estan dominades per bacteries capaces de sobreviure a la toxicitat del contaminant i per bacteries que el poden utilitzar com a substrat pel creixement.

En sòls amb episodis de contaminació reiterada o casos de contaminació prèvia pot ser eficaç l'estimulació de les poblacions (bioestimulació) ja que probablement existiran poblacions degradadores d'aquest contaminant. Contràriament en ambients on s'ha produït contaminació puntual o contaminació de compostos recalcitrants pot ser eficaç la inoculació de poblacions microbianes cultivades al laboratori amb capacitats degradadores conegudes (bioreforç).

1.1.3. Contaminació del sòl amb hidrocarburs derivats del petroli.

Els processos de degradació del sòl poden ser de tipus físic, com l'erosió, la pèrdua de matèria orgànica i la compactació, o d'origen químic com la contaminació, ja sigui localitzada o difusa, i la salinització. El conjunt de les possibles formes de degradació del sòl augmenten la seva vulnerabilitat envers les altres: són impactes interrelacionats, que actuen de forma sinèrgica.

Un cop arriben al sòl els contaminants es poden distribuir als tres medis que el constitueixen (líquid, gas i sòlid). En el medi líquid el contaminant pot estar dissolt en la fase aquosa de la zona no vadosa del sòl o a l'aqüífer, en el medi sòlid el contaminant estarà adsorbit al material particulat o a la matèria orgànica; en fase gas estarà la porció de contaminant que sigui volàtil. La distribució de contaminant en cadascuna de les fases dependrà d'un nombre elevat de variables, relacionades amb el propi contaminant, el medi i els organismes presents al sòl.

D'altra banda, la gran varietat d'interrelacions entre els components que formen els sòls fan que aquest sigui un compartiment ambiental complex. La resposta del sòl davant les pressions que l'afecten depèn de la seva pròpia naturalesa, i per tant, de les característiques hidrogeològiques, biològiques i

climatològiques de cada regió. Les característiques de l'episodi de contaminació (tipus de vessament, composició i quantitat de producte vessat, etc.) també seran factors determinants de la resposta del sòl davant el problema de contaminació.

Els principals processos als que està sotmès el contaminant quan arriba al sòl són:

- Volatilització.
- Bioacumulació.
- Adsorció.
- Biodegradació.
- Fotooxidació.
- Dissolució.
- Reaccions físico-químiques.

La biodegradació i la fotooxidació són els únics processos que poden transformar els contaminants en anhídrid carbònic i aigua (mineralització) que suposa la seva vertadera eliminació. Tenint en compte la ubiqüitat dels microorganismes, la biodegradació és el principal procés mitjançant el qual els contaminants orgànics són eliminats del medi de forma natural.

Una part important del contaminant estarà adsorbit a la matèria orgànica del sòl o bé a la matèria mineral. Això provoca una disminució de la biodisponibilitat. Els materials argilosos tenen una gran capacitat per establir enllaços estables amb els contaminants orgànics afavorint la seva persistència al medi. La persistència augmenta quan les partícules d'argila són petites ja que tenen una relació superfície volum major i per tant augmenta la superfície en que els productes químics poden ser adsorbits.

A la Taula 1 apareix una llista de les principals propietats físico-químiques del sòl afectades per un vessament d'hidrocarburs:

TAULA 1_ Principals propietats del sòl afectades pel vessament d'hidrocarburs⁷.

PROPIETATS FÍSQUES	PROPIETATS QUÍMIQUES
Estructura del sòl (ruptura dels agregats).	Augment del carboni orgànic (aproximadament el 75% del carboni del petroli és oxidable).
Augment de la retenció d'aigua en la capa superficial.	Disminució del pH (acumulació de carboni orgànic i generació d'àcids orgànics).
Potencial hídic	Augment del manganès i ferro intercanviables.
	Augment del fòsfor disponible.

Els microorganismes necessiten un microhàbitat adequat per a desenvolupar les seves funcions. Els efectes tòxics dels hidrocarburs sobre l'ecosistema dependran de:

- La quantitat, composició i estat físic del vessament.
- La freqüència i temps d'exposició.
- Les característiques de l'emplaçament.
- Variables ambientals (temperatura, humitat, concentració d'oxigen, etc.).
- La sensibilitat de la biota específica de l'ecosistema.

⁷ O. ORTÍNEZ I ALTRES. *La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México.*

Un factor important a tenir en compte a l'hora d'avaluar el comportament del contaminant quan arriba al medi és la seva mobilitat cap a altres compartiments, com l'atmosfera (processos de volatilització o evaporació), la biota (bioacumulació i biomagnificació) o els aqüífers (mitjançant processos de dissolució i rentat o dispersió). Els compostos orgànics de baix pes molecular com la benzina formen una capa sobre el nivell freàtic i es mouen horitzontalment en la mateixa direcció que l'aqüífer. Si el contaminant és més dens que l'aigua, migrarà cap al fons de l'aqüífer creant una columna a partir de la qual es produeix el moviment, contaminant així la totalitat de l'aqüífer. A la següent taula apareix una llista dels principals paràmetres que afecten a la mobilitat del contaminant.

TAULA 2_ Paràmetres que influeixen en el transport de contaminants al sòl⁸.

CARACTERÍSTIQUES DEL CONTAMINANT	CARACTERÍSTIQUES DEL SÒL	PARÀMETRES AMBIENTALS
Solubilitat	Contingut i retenció d'aigua	Temperatura
Pressió de vapor	Porositat, densitat i permeabilitat	Precipitació
Número i tipus de grups funcionals	Contingut d'argiles	Evapotranspiració
Densitat	Contingut de matèria orgànica	
Coeficients de partició ($K_{w/o}$, K_{oc})	Profunditat del nivell freàtic	
Polaritat	Grau de compactació	
Electronegativitat	Estructura	
Estabilitat química	Tamany de partícula	
Hidrofobicitat		

⁸ O. ORTÍNEZ I ALTRES. *La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México.*

1.2. LEGISLACIÓ EN MATÈRIA DE SÒLS CONTAMINATS.

Tot i que la contaminació del sòl s'ha produït de forma contínua, sobretot des de la revolució industrial, la preocupació internacional per aquest tema i el desenvolupament legislatiu a nivell europeu és molt recent (veure Annexos A.I i A.II).

Fa tan sols 30 anys que la política internacional va posar de manifest per primer cop la seva preocupació per la pèrdua i degradació de sòl amb la Carta Europea dels Sòls (1972), a nivell Europeu actualment no hi ha cap normativa que reguli la contaminació de sòls ni cap Directiva Europea que serveixi de guia per al desenvolupament legislatiu nacional dels estats membres, tot i que sí s'han redactat documents i programes que afecten de forma indirecta a la qualitat dels sòls i al 2002 es va abordar de forma directa la problemàtica de la contaminació dels sòls amb el document *Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. Comisión de las Comunidades Europeas COM 179 final.*

Països com Dinamarca, Holanda, Regne Unit, Alemanya, Suècia, Bèlgica i recentment Espanya han desenvolupat una legislació específica per a la protecció dels sòls contaminats. Tot i així el desenvolupament legislatiu ha avançat lentament i sempre rodejat d'una certa polèmica.

A l'Estat espanyol el desenvolupament legislatiu comença a partir de la Ley 20/1986, de Residuos Tóxicos y Peligrosos que estableix l'obligació de l'Administració Central de l'Estat d'aprovar un Plan Nacional de Suelos Contaminados i elaborar el primer inventari de sòls contaminats. Aquestes mesures trigarien nou anys en ser aprovades pel parlament espanyol.

1.2.1. Plan Nacional de Recuperación de suelos contaminados (1995-2005) (BOE núm. 172 de 20-7-1995).

El Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados (1995 – 2005) es va aprovar amb l'objectiu d'elaborar un primer diagnòstic que permetés prioritzar les actuacions de caracterització i sanejament dels sòls que es troben en pitjors condicions. Es va recolzar amb un pressupost de 132.000 milions de pessetes (792 milions €) a repartir entre les principals línies d'actuació proposades:

- Aprovació d'una normativa específica adequada.
- Identificació i caracterització de nous emplaçaments contaminats.
- Definició i desenvolupament d'actuacions de recuperació i sanejament.
- Suport a la I+D dirigida a la caracterització de sòls.
- Control i vigilància dels emplaçaments identificats fins al seu sanejament.
- Iniciatives legals contra els responsables de la contaminació.

En el Pla es presenta un inventari de sòls contaminats basat en la identificació d'activitats potencialment contaminants i dels sòls presumiblement contaminats per aquestes activitats. Aquesta informació es va completar amb consultes a les Comunitats Autònomes que van determinar els punts on s'havien registrat accidents susceptibles d'haver contaminat el sòl. En aquest primer inventari es van identificar 18.142 indústries que realitzaven activitats potencialment contaminants i es van detectar 4.532 sòls potencialment contaminats dels quals 250 van ser caracteritzats i sobre els que es va actuar per tal de descontaminar-los en 61 casos.

La diagnosi inicial de la problemàtica de la contaminació de sòls va fer evident la necessitat d'aprovar una llei dirigida específicament a la protecció del sòl. Aquest Pla és l'antecedent de la Ley 10/1998 de Residuos on es contempla per primer cop la figura legal de sòl contaminat, així com de l'actual Real Decreto 9/2005, el primer marc legal a l'Estat espanyol dirigit específicament a la protecció dels sòls davant la contaminació.

1.2.2. Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos. (BOE núm 96 de 22-4-1998)

És la primera llei estatal on es tracta específicament la problemàtica de la contaminació del sòl. La manca d'instruments normatius fins a l'aparició d'aquesta llei va suposar limitacions importants per a la protecció eficaç dels sòls davant de la contaminació. Igualment mancava la normativa normalitzada per a la identificació i caracterització dels emplaçaments.

A l'article 3 (p) es defineix el concepte de "**sòl contaminat**" com "**tot aquell en que les característiques físiques, químiques o biològiques han estat alterades negativament per la presència de components de caràcter perillós d'origen humà, en concentracions que comporten un risc per a la salut humana o el medi ambient, d'acord amb els criteris i estàndards que es determinin pel Govern**".

Els aspectes reguladors més importants dels emplaçaments contaminats, (explicats als Articles 27 i 28 del Capítol V) estableixen que:

- Els titulars de les Activitats Potencialment Contaminants han de remetre un informe de situació de l'estat del sòl a les respectives Comunitats Autònomes.
- La responsabilitat de realitzar les operacions de recuperació resideix en el titular de l'activitat causant de la contaminació i, subsidiàriament, en els posseïdors dels sòls contaminats.
- Els sòls declarats contaminats o potencialment contaminats quedaran catalogats al Registre de la Propietat.
- La venda, transmissió o abandonament de l'emplaçament no eximeix al propietari de les obligacions fixades per la llei.
- Les actuacions de recuperació de sòls contaminats, podran dur-se a terme mitjançant acords voluntaris entre els obligats, o mitjançant convenis de col·laboració entre aquests i les administracions públiques competents.

Les competències atribuïdes al Govern Central de l'Estat per aquesta llei són la determinació dels estàndards i criteris que permetin avaluar el risc per a la salut humana, en funció de la naturalesa i els usos del sòl, i la publicació d'una llista d'activitats potencialment contaminants de sòls. Aquesta normativa no va ésser aprovada fins al 2005 amb el Real Decreto 9/2005 (v. 1.2.3)

Les competències corresponents a les Comunitats Autònomes són les de declarar els sòls com a contaminats en funció dels criteris i estàndards determinats per l'Estat i fer-ne un inventari, elaborar una llista de prioritats d'actuació, establir els criteris que permetin definir la periodicitat per l'elaboració dels informes de situació dels sòls que hagin estat declarats contaminats, i declarar que el sòl ha deixat d'estar contaminat quan s'han realitzat de forma adequada les operacions de neteja i recuperació. Actualment l'Agència de Residus de Catalunya està elaborant l'inventari català de sòls contaminats, es preveu la seva finalització l'any 2007.

1.2.3. Real Decreto 9/2005. (BOE núm 15 de 18-1-2005).

Aquest text aprova la Llista d'Activitats Potencialment Contaminants i s'estableixen els criteris i estàndards segons una metodologia normalitzada per identificar i caracteritzar els emplaçaments contaminats (veure ANNEX A.III).

En aquest reial decret es precisa la definició de sòl contaminat, s'estableix que un **"sòl contaminat"** és **"aquell en que les característiques han estat alterades negativament per la presència de components químics de caràcter perillós d'origen humà, en concentracions que comporten un risc inacceptable per a la salut humana o el medi ambient, i així s'hagi declarat mitjançant resolució expressa"**.

A l'Annex I s'estableixen les activitats susceptibles de causar contaminació del sòl. Aquestes activitats poden ser de tipus industrial o comercial. També s'inclouen en aquesta classificació les empreses que produeixen, manegen o emmagatzemen més de 10 tones per any d'una o varies substàncies incloses en el Real Decreto 363/1995, *sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas*. Finalment també s'inclouen les empreses en les s'emmagatzema el combustible propi i que tinguin un consum anual mitjà superior a 300.000 litres i un volum total d'emmagatzematge igual o superior a 50.000 litres.

Es regula la forma i contingut de l'Informe Preliminar de Situació, document que s'haurà d'elaborar en tots aquells emplaçaments on s'hagin desenvolupat Activitats Potencialment Contaminants; un cop presentat aquest informe l'òrgan competent haurà d'emetre, en cas oportú, la declaració de sòl contaminat o la conveniència de presentar informes periòdics. També es desenvolupa la forma en que es produirà la constància al Registre de la Propietat de les resolucions administratives sobre declaració de sòls contaminats.

El criteri general per a determinar el grau de contaminació d'un sòl està lligat al riscs per a l'ésser humà i per als ecosistemes associats a la presència de contaminants. Als Annexos V, VI i VII es regulen els nivells genèrics de referència (NGR), és a dir, els límits de concentració de contaminants a partir dels quals serà necessària l'avaluació del risc, en funció dels usos del sòl.

A l'Article 7 d'aquesta llei s'estableix que quan un sòl sigui declarat contaminat s'hauran de realitzar les actuacions necessàries per a tractar aquesta contaminació. Sempre que les característiques de l'emplaçament i de la contaminació ho permetin s'utilitzaran les millors tècniques disponibles i s'empraran tractaments in-situ evitant així la generació de residus.

Els sòls catalogats com a contaminats no podran ser objecte de cap operació de compra venta, ampliació o canvi d'ús del terreny fins que no se li doni solució efectiva al problema de contaminació.

1.3. ASPECTES GENERALS DE LA BIOREMEDIACIÓ DE SÒLS.

La bioremediació és una tecnologia relativament nova, comença a desenvolupar-se a la dècada dels 80 com una branca de la biotecnologia que busca solucionar els problemes de contaminació a través dels processos metabòlics dels organismes.

Segons el *Biotechnology and Biological Sciences Research Council* (BBSRC) els sistemes de remediació consisteixen en l'ús de processos biològics per eliminar, atenuar o transformar les substàncies contaminants presents als sòls amb l'objectiu de minimitzar el risc per als ecosistemes i la salut humana.⁹

En general la bioremediació fa ús de microorganismes naturals (fongs o bacteries) per degradar substàncies tòxiques; altres organismes que s'utilitzen pel tractament d'emplaçaments contaminats són les plantes (fitoremediació).

Hi ha dos tipologies de bioremediació, la bioestimulació, que busca accelerar la taxa de degradació dels contaminants mitjançant la modificació de factors ambientals (nutrients, oxigen dissolt, etc.), de forma que s'afavoreixi l'activitat metabòlica dels microorganismes presents al medi, i el bioforç, basat en la inoculació de microorganismes o consorcis microbians obtinguts al laboratori, dels quals s'ha demostrat la capacitat de degradar els compostos contaminants. Aquesta tècnica planteja la possibilitat d'utilitzar microorganismes modificats genèticament amb la intenció de millorar la capacitat de metabolització dels contaminants. Aquest aspecte de la bioremediació planteja problemes degut a la incertesa dels efectes a llarg termini que poden produir els microorganismes modificats sobre l'ecosistema degut al creixement incontrolat o a la transferència horitzontal d'informació genètica. Aquest és encara un tema de debat en el món científic i acadèmic.

La bioremediació té un gran potencial com a mètode de tractament de sòls contaminats, especialment en el cas de contaminació per hidrocarburs. Es

⁹ BBSRC (1.999). *A joint research council review of bioremediation research in the UK*, p. 5.

caracteritza per ser una tècnica amb uns costos d'operació relativament baixos en comparació amb altres tecnologies, però la seva aplicació ha trobat certes reminiscències degut a l'elevat temps d'operació necessari per a que el procés de descontaminació arribi als nivells desitjats. Tot i això, els tractaments biològics poden ser més eficients si les condicions de biodegradació s'optimitzen.

Els microorganismes del sòl són capaços de degradar eficaçment un gran nombre de compostos orgànics quan es donen les condicions adequades¹⁰. A la taula 3 es presenta una llista d'alguns contaminants importants al sòl i alguns microorganismes capaços de degradar-los. La degradació microbiana es fonamenta en dos processos: el creixement bacterià i el cometabolisme. En el primer cas el contaminant és emprat com a font de carboni i energia. El cometabolisme es defineix com el metabolisme de components orgànics en presència d'un substrat per al creixement diferent, que és emprat com a font primària de carboni i energia¹¹.

TAULA 3_ Alguns microorganismes responsables de la biodegradació de contaminants.¹²

Contaminant	Microorganisme	Grau de biodegradabilitat
Benzè	<i>Pseudomonas putida</i> , <i>P. rhodochrous</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>Acinetobacter sp.</i> , <i>Methylosinus trichosporium</i> OB3b, <i>Nocardia sp.</i> , <i>methanogens</i> , <i>anaerobes</i>	Mig-Alt
Toluè	<i>Methylosinus trichosporium</i> OB3b, <i>Bacillus sp.</i> , <i>Pseudomonas sp.</i> , <i>P. putida</i> , <i>Cunninghamella elegans</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>P.mildenberger</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>Achromobacter sp.</i> , <i>methanogens</i> , <i>anaerobes</i>	Alt
Etilbenzè	<i>Pseudomonas putida</i>	Alt
Xilens	<i>Pseudomonas putida</i> , <i>methanogens</i> , <i>anaerobes</i>	Alt
Combustibles	<i>Cladosporium</i> , <i>Hormodendrum</i>	Alt

¹⁰ E. BOWER I ALTRES (1.994). *Degradation of xenobiotic compounds in situ: Capabilities and limits*. p. 316.

¹¹ W. FRITSCH I M. HOFRTICHTER (2.000). *Aerobic Degradation by Microorganisms*, p. 147

¹² R.ROMÁN I M. CONCEPCIÓN (2.005). *Guía técnica de Atenuación Natural Monitorizada en emplazamientos contaminados. Técnicas de bioestimulación y bioaumentación para la potenciación de la biodegradación de contaminantes*. p. 5 (AnnexA)

TAULA 3_ Alguns microorganismes responsables de la biodegradació de contaminants (continuació).¹³

Querosè	<i>Torulopsis, Candidatropicalis, Corynebacterium hydrocarboclastus, Candidaparapsilosis, C. guilliermondii, C.lipolytica, Trichosporon sp., Rhohosporidium toruloides, Cladosporium resinae</i>	Alt
Etens clorats	<i>Dehalobacter restrictus, Dehalospirillum multivorans, Enterobacter agglomerans, Dehalococcus entheogenes strain 195, Desulfitobacterium sp. strain PCE1, Pseudomonas putida (multiple strains), P. cepacia G4, P. mendocina, Desulfobacterium sp., Methanobacterium sp., Methanosarcina sp. strain DCM, Alcaligenes eutrophus JMP 134, Methylosinus trichosporium OB3b, Escherichia coli, Nitrosomonas europaea, Methylocystis parvus OBBP, Mycobacterium sp., Rhodococcus erythropolis</i>	Mig
Etans clorats	<i>Desulfobacterium sp., Methanobacterium sp., Pseudomonas putida, Clostridium sp., C. sp. strain TCAIIB</i>	Mig
Metans clorats	<i>Acetobacterium woodii, Desulfobacterium sp., Methanobacterium sp., Pseudomonas sp. strain KC, Escherichia coli K-12, Clostridium sp., Methanosarcina sp., Hyphomicrobium sp. strain DM2</i>	Mig
Clorobenzens	<i>Alcaligenes sp. (multiple strains), Pseudomonas sp.(multiple strains), P. putida, Staphylococcus epidermis</i>	Mig-Alt

La degradació més ràpida i completa de la majoria de contaminants orgànics presents al medi, principalment constituents d'olis minerals i productes halogenats del petroli, es produeix en condicions aeròbiques.¹⁴ Tot i això, determinats compostos es degraden eficientment en condicions anaeròbiques, com per exemple alguns compostos organoclorats, a través del mecanisme de dehalogenació reductiva.¹⁵ Existeixen però, contaminants tòxics i recalcitrants com alguns components halogenats aromàtics així com alguns pesticides i explosius, que són transformats pel metabolisme microbià de forma poc eficient¹⁶.

¹³ R. ROMÁN I M. CONCEPCIÓN (2.005). *Guía técnica de Atenuación Natural Monitorizada en emplazamientos contaminados. Técnicas de bioestimulación y bioaumentación para la potenciación de la biodegradación de contaminantes*, p. 5 (AnnexA)

¹⁴ W. FRITSCH I M. HOFRTICHTER (2.000). *Aerobic Degradation by Microorganisms*, p. 146

¹⁵ C. Wischnak, R. Müller (2.000). *General Principles of the Degradation of Chlorinated Hydrocarbons*, p. 245

¹⁶ P. DEBARATI I ALTRES (2.005). *Assessing microbial diversity for bioremediation and environmental restoration*. p. 135.

La capacitat de biodegradar els hidrocarburs dependrà de molts factors i cada emplaçament contaminat tindrà unes característiques específiques que afectaran al procés de bioremediació. Abans d'aplicar qualsevol mesura sobre el terreny convé realitzar assaigs de tractabilitat del sòl contaminat amb l'objectiu d'optimitzar els resultats. En aquests assaigs es pretén reproduir al laboratori les condicions del medi, no obstant com que no és possible reproduir les condicions ambientals al laboratori al 100%, convé realitzar també assaigs a escala pilot per tal de comprovar sobre el medi l'efectivitat de les mesures a aplicar. En els assaigs de tractabilitat es sol mesurar en una primera etapa l'activitat microbiològica de les poblacions presents al sòl així com la biodegradabilitat del contaminant. En una segona fase es sol avaluar la influència de diferents paràmetres i additius en la degradació del contaminant com per exemple la humitat, nutrients, tensioactius o la presència d'una font addicional de carboni. Els assaigs de tractabilitat suposen un percentatge molt petit del cost total de la bioremediació i poden abaratir el cost final del tractament i augmentar les seves possibilitats d'èxit.

Podem concloure doncs, que els microorganismes poden metabolitzar un gran nombre de substàncies orgàniques i degradar-les en altres menys tòxiques o bé innòcues per al medi, aquest procés s'optimitza quan el metabolisme microbià provoca la mineralització dels contaminants. La bioremediació té un elevat potencial com a tècnica de tractament de sòls contaminats, tant pel que fa a l'elevat nombre de contaminants que poden ser tractats, com pel cost reduït del tractament.

No obstant, la bioremediació, com totes les altres tècniques de descontaminació de sòls, no està exempta de riscos i existeixen rutes metabòliques que transformen les substàncies contaminants en altres més tòxiques. Per tant, l'aplicació de la bioremediació requerirà un coneixement profund dels processos que es donaran al medi, aquest s'aconsegueix mitjançant una caracterització precisa del medi i el coneixement de la tractabilitat del sòl contaminat. Així mateix, convé realitzar una monitorització del terreny, no només per determinar el grau de desaparició del contaminant, sinó també per tal d'assegurar que no apareixen intermediaris metabòlics contaminants.

1.4. FACTORS QUE CONDICIONEN LA BIOREMEDIACIÓ DE SÒLS.

Existeix un gran nombre de factors que intervenen i afecten a l'activitat microbiològica dels microorganismes sobre els contaminants. La bioremediació es basa en el coneixement d'aquests factors de forma que es pugui optimitzar la velocitat i el grau de degradació.

Per a l'elaboració d'aquest punt s'han consultat els estudis *Bioremediation of Contaminated Soils* elaborat per D. C. Adriano,¹⁷ i *Bacterial Activity Enhancement and Soil Decontamination* elaborat per F. Menn¹⁸. Els factors que condicionen la bioremediació s'han agrupat segons tres criteris: els relacionats amb les característiques físico-químiques del medi, els relacionats amb les poblacions microbianes i els relacionats amb les característiques del contaminant.

1.4.1. Característiques relacionades amb el medi.

Les característiques del sòl varien depenent de la roca mare i de la topografia i estan afectades per les condicions climàtiques i els organismes presents al llarg del temps. L'estratègia de bioremediació haurà de tenir en compte i valorar les variacions específiques en les propietats del sòl contaminat.

1.4.1.1. Característiques físiques del sòl

En general el metabolisme aeròbic és el més emprat per a la biodegradació d'hidrocarburs. L'oxigen pot ser emprat pels microorganismes com a acceptor d'electrons (metabolisme aeròbic) o com substrat pel creixement en les reaccions catabòliques, com les dutes a terme per les monooxigenases i dioxigenases en la degradació d'hidrocarburs aromàtics i policlorobifenils (PCB's). Un mètode possible per a la modificació de la concentració d'oxigen al medi és el llaurat o la circulació forçada mitjançant injectors o bufadors d'aire.

¹⁷ D. C. ADRIANO I ALTRES (1.999). *Bioremediation of Contaminated Soils*, pg. 7-11

¹⁸ F. MENN I ALTRES (2.000). *Bacterial Activity Enhancement and Soil Decontamination*, pg. 426-435

Un dels factors que més afecten a l'eficàcia de la bioremediació d'un sòl és el grau d'humitat que conté, que al seu torn està determinat per la porositat, l'estructura i la textura del sòl. En un extrem els sòls saturats d'aigua presenten una limitació en la disponibilitat d'oxigen, limitant els processos aeròbics; d'altra banda, els sòls amb absència d'aigua provoquen estrès osmòtic i inhibeixen la respiració microbiana i el creixement. La humitat òptima convé establir-la mitjançant assaigs de tractabilitat, però en general es pot dir que es troba entre el 30 i el 80% de la capacitat de camp.

La permeabilitat i la conductivitat hidràulica determinaran l'eficàcia en la distribució del tractament que s'apliqui sobre el sòl, normalment nutrients i oxigen. Generalment conductivitats hidràuliques per sobre de 10^{-4} cm/s són adequades per a la bioremediació. En sòls amb permeabilitats molt per sobre d'aquests valors també es pot reduir l'activitat metabòlica microbiana. A la zona no saturada del sòl la textura determina la permeabilitat. Els sòls amb una textura fina tenen permeabilitats baixes. A la zona saturada del sòl la principal característica que afecta a la permeabilitat és l'estructura.

La temperatura afecta a la cinètica de les reaccions del sòl i influeix en els processos de sorció, solubilització i volatilització de contaminants, a més de determinar-ne la seva viscositat. La temperatura està controlada pels patrons climàtics estacionals i diürns, per les condicions superficials del sòl, per la seva humitat i per la profunditat. Generalment la temperatura anual mitjana de l'aire és un indicatiu de la temperatura del sòl a una profunditat d'1 a 5 m. La bioremediació usualment és òptima a temperatures entre 20 i 30 °C tot i que està comprovada l'activitat degradadora per sota dels 5 °C per bacteris criòfils i per sobre dels 60 °C per bacteris termòfils. Els sòls humits tenen capacitats calorífiques més elevades, la seva temperatura canvia més lentament que la dels sòls secs. La manipulació de la temperatura d'un sòl no sol ser tècnica ni econòmicament eficient, no obstant s'han realitzat experiències de modificació de la temperatura del sòl mitjançant irrigació i drenatge, alteracions de la superfície mitjançant cobertures amb plàstics i aplicació d'ones de radiofreqüència.

1.4.1.2. Ambient químic del sòl.

Els emplaçaments que presenten elevades concentracions de contaminants tòxics o resistents a les transformacions biològiques no són apropiats per a la bioremediació, especialment per a la bioremediació in situ. Entre les propietats químiques del sòl que afecten al comportament, transport i biodegradació del contaminant i que condicionen l'activitat dels organismes presents al sòl s'inclouen el pH, el contingut de matèria mineral i orgànica, la capacitat de bescanvi iònic i la presència de nutrients, sals i metalls pesats.

El pH del sòl afecta a l'activitat biològica, a la sorció i biodisponibilitat dels contaminants i dels nutrients, i a l'especiació dels metalls pesats presents al medi. En general per a les bacteries heteròtrofes el rang de pH òptim per al seu metabolisme és de 6 a 8. El pH de molts sòls és de caràcter àcid, en aquests casos augmentar el pH pot permetre augmentar la biodegradació de contaminant. La correcció de l'acidesa del sòl es pot realitzar mitjançant l'addició de roca calcària o components que tinguin calci o magnesi.

En quant al contingut i composició de la matèria inorgànica del sòl, la fracció mineral més reactiva químicament són les argiles. L'arena i el material al·luvial generalment constitueixen un volum major, però tenen una relació superfície/volum menor, i són menys reactives químicament. Els minerals argilosos influeixen en la sorció de substàncies poc polars i en el pH del medi ja que la seva superfície està carregada elèctricament i per tant tenen una capacitat de bescanvi iònic elevada. La retenció de contaminants i nutrients a la superfície de les partícules d'argila pot fer que aquests siguin inaccessibles per a la degradació microbiana reduint l'eficàcia del tractament.

La matèria orgànica del sòl té una capacitat de bescanvi iònic major que els minerals argilosos i domina la retenció de compostos químics, exercint una influència notable en la retenció de metalls pesats i contaminants orgànics. Els sòls presenten estratificació i horitzons que poden originar variacions significatives en les

propietats físiques, químiques i biològiques a mesura que augmenta la profunditat; un dels canvis més importants és la disminució de la matèria orgànica amb la profunditat. D'altra banda la matèria orgànica del sòl representa una font important de nutrients per als microorganismes. La disminució del contingut de matèria orgànica sovint està lligada a la disminució de la densitat de població microbiana i al decreixement de la capacitat de degradar contaminants. Així, a la zona més profunda del sòl, usualment hi ha una densitat de població microbiana menor i per tant menor activitat microbiològica que al sòl superficial.

El requeriment energètic i de nutrients per al creixement bacterià és molt variable d'una espècie a una altra. Els bacteris autòtrofs poden emprar com a font energètica la llum o compostos inorgànics, els bacteris heteròtrofs en canvi basen el seu metabolisme en l'oxidació de productes sintetitzats per altres organismes. En un vessament d'hidrocarburs la relació C:N:P es desequilibra, donat que el contaminant proporciona una quantitat molt elevada de carboni. Normalment en aquests casos de contaminació, el nitrogen i el fòsfor són elements limitants del creixement bacterià i cal corregir la relació C:N:P inoculant al medi substàncies que alliberin fòsfor i nitrogen assimilables pels microorganismes. En aquest sentit s'han realitzat experiències positives amb l'ús de fertilitzants oleofílics d'alliberació lenta. Generalment els micronutrients es troben en quantitats suficients al sòl per permetre el creixement de les poblacions microbianes durant el procés de bioremediació.

El càlcul del requeriment de nutrients és difícil de predir ja que la proporció C:N:P òptima per al creixement bacterià no és la mateixa per a tots els microorganismes. A més a més, es poden donar reaccions químiques i processos físics que limitin la quantitat de nutrients afegits al medi (el nitrogen amònic pot ser adsorbit en argiles inflables, i el ferro, calci, magnesi i alumini poden fer precipitar el fòsfor). Per tant, no hi ha una norma general per calcular el requeriment de nutrients i és necessària la realització d'assaigs de tractabilitat específics per a cada cas. S'ha de tenir en compte que l'addició d'un excés de fertilitzants pot tenir efectes negatius sobre el medi.

1.4.2. Característiques relacionades amb les poblacions microbianes.

L'activitat biològica dels microorganismes presents al sòl està condicionada per les característiques físiques i químiques del sòl i, com s'ha dit anteriorment, no és homogènia: es concentra als horitzons més superficials, on la concentració de matèria orgànica és major. El tipus de metabolisme de la població microbiana, la presència de degradació cometabòlica, l'existència i duració del període d'aclimatació, així com l'alteració dels processos de quimiotaxis són factors que determinaran l'eficàcia del procés de bioremediació.

Segons el tipus de metabolisme els microorganismes degradadors poden ser aeròbics, anaeròbics o fermentatius. La majoria de microorganismes degradadors empenen metabolisme aeròbic, tot i això hi ha contaminants que només es poden degradar mitjançant processos de degradació i transformació anaeròbica. La investigació de les rutes metabòliques de degradació dels contaminants és de fonamental importància per aprofundir en el coneixement de les potencialitats de la bioremediació en el futur i suposen una línia d'investigació capdal per al desenvolupament d'aquesta tecnologia.

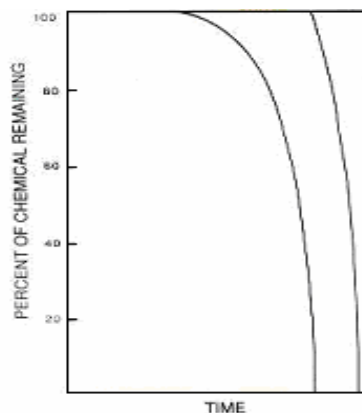
Com s'ha comentat anteriorment, hi han microorganismes que poden degradar les substàncies contaminants mitjançant processos de cometabolisme, és a dir, sense que el contaminant sigui emprat com a font principal de carboni i energia pel creixement bacterià. El cometabolisme és una via molt important de degradació de contaminants presents al medi¹⁹, el cometabolisme aeròbic ha estat emprat sovint amb èxit per al tractament de contaminants al sòl, el cometabolisme anaeròbic també ha estat emprat amb èxit per degradar substàncies com tricloroetilè actuant com a substrat principal substàncies com metà, fenol o tolué. A l'Annex B.I es presenta una llista de contaminants que poden ser degradats mitjançant cometabolisme.

¹⁹ M. ALEXANDER (1.999). *Biodegradation and Bioremediation*, p. 251

El període d'acimatació dels microorganismes presents als sòls contaminats és el temps que transcorre entre l'arribada del contaminant al medi i l'inici de la detecció de la seva disminució²⁰. La seva durada pot variar enormement depenent de les característiques químiques del compost, de la seva concentració i de les característiques ambientals (temperatura, nivell d'oxigen, etc.) i pot comprendre períodes de temps que van des de menys d'una hora fins a varis mesos. El principal factor ambiental que determina la duració del període d'acimatació és la temperatura. Altres factors com el pH, l'aireació i la concentració de nitrogen i fòsfor també poden afectar a la seva duració per a alguns compostos i ambients, principalment aquells en que aquests factors són limitants de l'activitat microbiana. Altres factors que determinaran l'existència i durada del període d'acimatació són la toxicitat del contaminant per a la població degradadora, la presència de depredadors, la necessitat d'innovació genètica per a la degradació del contaminant, fenòmens de diàuxia o d'inducció enzimàtica.

En ambients exposats de forma reiterada al contaminant, el període d'acimatació sovint és curt o bé inexistent (veure Figura 1). La reducció del període d'acimatació en vessaments reiterats probablement és degut a l'increment al medi del nombre de població degradadora del contaminant. Aquesta reducció no ocorre en tots els casos com per exemple en casos de contaminació d'alguns pesticides.

FIGURA 1_ Període d'acimatació en un sòl contaminat per primer cop i en un cas de contaminació prèvia²¹.



²⁰ M. ALEXANDER (1.999). *Biodegradation and Bioremediation*, p. 17

²¹ M. ALEXANDER (1.999). *Biodegradation and Bioremediation*, p. 20

El microorganismes s'orienten cap a un lloc o un altre seguint un sèrie d'estímuls, la quimiotaxis és la capacitat d'orientació dels bacteris en funció de la concentració d'una determinada substància. El fet que la presència de contaminants provoqui quimiotaxis dels bacteris cap a aquests contaminants pot augmentar la capacitat de degradació afavorint el contacte entre el microorganisme degradador i el contaminant²². Contràriament, hi ha contaminants que afecten als mecanismes de quimiotaxis, fet que provoca que els microorganismes no puguin posar-se en contacte amb el contaminant i per tant que aquest no pugui ser degradat.

1.4.3. Característiques relacionades amb el contaminant.

Els contaminants poden estar presents en fase lliure, desplaçant a l'aigua dels porus; sorbits a partícules minerals del sòl o a la matriu orgànica; dissolts en aigua; en fase vapor, i dins dels organismes. Els factors més importants que determinaran la distribució de contaminant als diferents compartiments ambientals són el coeficient octanol - aigua, la solubilitat, el coeficient de sorció i la constant de Henry.

Les característiques més importants dels contaminants a l'hora d'avaluar l'estratègia de recuperació són la seva estructura química, la concentració, la toxicitat i la biodisponibilitat.

1.4.3.1. Estructura química

L'estructura química és la característica més important del contaminant. Determina entre altres característiques la seva polaritat, solubilitat i la capacitat per a reaccionar amb altres substàncies. Alguns compostos són bioquímicament reactius, mentre que altres són resistents a la transformació o recalcitrants. Alguns factors relacionats amb l'estructura química que provoquen que el contaminant tingui un comportament recalcitrant són:

²² M. P. LANFRANCONI I ALTRES (2.003). *A strain isolated from gas oil contaminated soil displays chemotaxis towards gas oil an hexadecane*, p. **1002**.

- La presència de grups no comuns o grups xenòfors: un compost orgànic fàcilment mineralitzable pot fer-se no biodegradable enllaçant-se amb un substituent determinat. Aquests substituents s'anomenen grups xenòfors i són grups poc comuns a les rutes metabòliques i a la fisiologia dels microorganismes. La degradabilitat d'un contaminant és inversament proporcional a la quantitat de grups xenòfors substituents presents a la seva estructura molecular. La posició dels grups xenòfors substituents també pot afectar a la degradabilitat de la molècula interferint en l'acció enzimàtica.
- Oligomerització: en general els compostos orgànics d'elevat pes molecular són més difícils de biodegradar que aquells que estan formats per un nombre petit d'àtoms. Dins de les famílies d'hidrocarburs derivats del petroli, les més fàcilment biodegradables són els n-alcans i els alcans ramificats amb un nombre d'àtoms de carboni entre 10 i 20. Els alcans de cadena llarga, amb més de 20 àtoms de carboni, són més recalcitrants degut al seu elevat pes molecular i a la seva baixa solubilitat. Tot i això, aquesta relació pot no complir-se sempre, els hidrocarburs del petroli amb un nombre petit d'àtoms de carboni solen tenir efectes tòxics per als microorganismes ja que actuen com a dissolvents i per tant són recalcitrants.
- Presència d'anells aromàtics: la presència d'anells aromàtics a l'estructura molecular del compost disminueix la capacitat dels microorganismes per degradar-los. Per exemple, els hidrocarburs aromàtics policíclics (HAP's) poden ser degradats si existeixen les condicions adequades al medi, però quan tenen un nombre elevat d'anells aromàtics incorporats a la seva estructura la recalcitrància augmenta.

Durant el procés de bioremediació d'una matriu de contaminants hi ha un enriquiment relatiu dels components recalcitrants respecte els components fàcilment biodegradables. Aquest enriquiment és degut a la selectivitat en la biodegradació de substàncies (aquelles que són més fàcilment biodegradables es metabolitzen primer i aquelles que presenten recalcitrància romanen al medi).

1.4.3.2. Concentració i toxicitat.

A partir de determinades concentracions, alguns contaminants són tòxics o inhibidors de l'activitat dels microorganismes. En aquests casos cal aplicar un tractament previ per reduir la toxicitat i permetre el creixement de les poblacions microbianes que puguin metabolitzar el contaminant. Tot i això, freqüentment els microorganismes presents als emplaçaments contaminats, sobre tot als emplaçaments que han patit episodis recurrents de contaminació, estan adaptats a la seva toxicitat.

D'altra banda alguns processos metabòlics associats a la biodegradació de contaminants poden generar metabòlits intermediaris, que poden presentar una toxicitat major que el contaminant original, fins i tot per als propis microorganismes. Per tant per determinar que el procés de bioremediació ha estat eficaç, no només caldrà comprovar la reducció de la concentració de contaminants, si no que s'haurà de verificar que la toxicitat dels components presents al sòl també s'ha reduït.

Com major sigui la concentració de contaminant present al medi major serà la població necessària per degradar el contaminant. Quan el contaminant és la font de carboni que utilitza la població microbiana per créixer, la concentració determinarà el tamany d'aquesta població. Tot i això, existeix un límit de contaminació, per sota del qual no hi ha creixement de la població microbiana degradadora. El fet que la concentració de contaminant sigui baixa no vol dir que no tingui efectes sobre el medi.

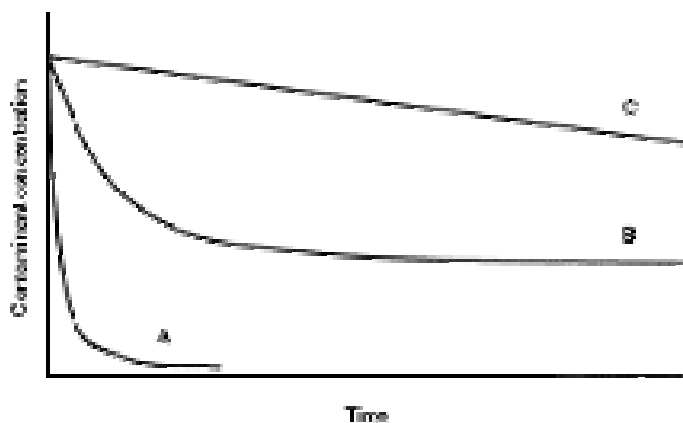
Per tal d'avaluar la toxicitat dels contaminants al sòl s'han dissenyat diferents test d'ecotoxicitat (Microtox®, mortalitat i reproducció de lumbrícids i de plantes superiors) i de genotoxicitat.

1.4.3.3. Biodisponibilitat.

El terme biodisponibilitat es refereix a la susceptibilitat d'un compost químic de ser transformat metabòlicament en productes útils per a ell mateix o per a altres microorganismes²³, és una mesura la fracció de compost que pot ser transformada o eliminada pels organismes. És convenient emprar aquest terme referint-se a un organisme o organismes específics ja que la biodisponibilitat d'un contaminant pot variar entre una espècie i una altra²⁴.

El conjunt d'interaccions físiques, químiques i biològiques entre els diferents components del sòl determinaran l'exposició dels organismes als compostos químics presents en ell. Depenent de l'estabilitat de les associacions que estableixin amb els components del sòl, els contaminants poden no ser biodisponibles per als microorganismes i persistir durant períodes de temps molt llargs. La baixa biodisponibilitat s'ha identificat com una de les principals causes de persistència de contaminants als sòls²¹. A la Figura 2 es pot observar el comportament idealitzat de l'evolució de la concentració de tres contaminants amb diferents biodisponibilitats; a la pràctica s'observa una gradació entre les tipologies de comportament que es descriuen a continuació.

FIGURA 2_ Evolució de la degradació segons la biodisponibilitat diferents²⁵



²³ B. MARHO (2.000). *Bioavailability of Contaminants*, p. 63

²⁴ K. T. SEMPLE I ALTRES (2.003). *Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis*, p. 811

²⁵ K. T. SEMPLE I ALTRES (2.003). *Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis*; p. 811

La corba A representa el comportament d'un contaminant biodisponible durant tot el procés de biodegradació. El comportament B presenta una dinàmica que es divideix en dos fases: reducció ràpida de concentració en un estadi inicial i reducció de la velocitat de degradació, degut a l'enriquiment de compostos recalcitrants o a la reducció de la biodisponibilitat, a mesura que passa el temps, fins arribar a una segona fase estacionària en la que no es dona reducció de contaminant. En el cas C la concentració es redueix de forma constant tot i que a una velocitat baixa: seria el cas d'un contaminant amb una biodegradabilitat baixa però que no presentés fenòmens de reducció de la biodisponibilitat al llarg del temps.

Només la fracció de contaminant que estigui dissolta podrà ser interioritzada pels microorganismes, aquesta fracció serà doncs biodisponible. La solubilitat en aigua de molts contaminants orgànics varia entre els mg/L i els μ /L; aquest rang de solubilitat es pot considerar baix si es compara amb valors de solubilitat de substàncies naturals. A l'Annex B.II es presenta la solubilitat en aigua de diferents contaminants i substrats naturals.

Els fenòmens que poden reduir la biodisponibilitat d'un contaminant són:

- Cristal·lització: sovint quan la solubilitat dels contaminants és molt baixa aquests cristal·litzen. La biodisponibilitat dels components cristal·litzats està determinada per la velocitat a la que el component es torna a dissoldre a la fase aquosa. Els components que cristal·litzen formant cristalls grans trigaran més temps en dissoldre's completament.
- Volatilització: la volatilització és el pas de la fase líquida o sòlida a la fase gasosa. Depèn de la concentració de contaminant, de la seva pressió de vapor i de la seva solubilitat. La velocitat de volatilització varia en funció del compost, del contingut d'humitat, de la temperatura i porositat del sòl i del contingut en matèria orgànica i argiles.

- Fenòmens de sorció: els fenòmens de sorció són més importants en els compostos hidrofòbics i per tant no polars i amb un Kow alt. Segueixen una cinètica que es pot dividir en dos estatges. Inicialment una porció del contaminant és sorbida ràpidament (en minuts o hores), mentre que una altra porció es sorbida més lentament (setmanes o mesos). Els mecanismes de sorció inicial són deguts a l'establiment de ponts d'hidrogen i forces de van der Waals. Els segon tipus de sorció, més lenta, s'associa a l'establiment d'enllaços covalents que provoquen una unió més estable i irreversible al sòl²⁶. Existeixen dos tipus de fenòmens de sorció.
 - Adsorció: és l'atracció d'un contaminant cap a una superfície sòlida amb la que estableix enllaços químics. Està determinada per la càrrega iònica del compost. Es dona fonamentalment sobre argiles.
 - Absorció: és la penetració d'un contaminant en un sòlid. Es dona sobretot sobre la matèria orgànica.

- Humificació: el contaminant pot establir unions amb les molècules que formen l'humus en el procés anomenat humificació. L'humus està format per molècules molt complexes, amb molts radicals capaços de reaccionar. Les unions entre els contaminants i el material húmich poden ser molt estables, fins i tot poden resistir l'atac de dissolvents orgànics²⁷. A vegades el procés d'humificació ha estat emprat com a tècnica de tractament de sòls contaminats, amb l'objectiu d'immobilitzar els contaminants. Alguns autors argumenten que aquest tractament presenta el risc potencial de la remobilització dels contaminants, sobretot d'aquells que siguin difícilment biodegradables²⁸.

- Difusió cap a porus inaccessibles de les partícules del sòl: molts sòls tenen porus microscòpics, amb diàmetres de 100 nm o menys. Aquests porus són massa petits per que hi puguin arribar els bacteris. Els contaminants que entren per difusió en aquests porus no seran disponibles pels bacteris²⁹. La velocitat de

²⁶ K. T. SEMPLE I ALTRES (2.003). *Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis*, p. **811**

²⁷ B. MARHO (2.000). *Bioavailability of Contaminants* p. **68**

²⁸ M. KÄSTNER (2.000). "Humification" *Process or Formation of Refractori Soil Organic Mater*, p. **90**

²⁹ M. KÄSTNER (2.000). "Humification" *Process or Formation of Refractori Soil Organic Mater*, p. **94**

difusió cap a porus inaccessibles està determinada per molts factors com per exemple la forma dels porus, la seva tortuositat o el radi de les partícules de sòl. Aquest és un dels processos que competeixen més efectivament amb els microorganismes pel substrat.

Els fenòmens de sorció i difusió del contaminant cap a porus inaccessibles són dos fenòmens importants que poden limitar l'eficàcia del procés de bioremediació i determinaran en gran mesura el seu resultat final. L'ús de tensioactius pot ser una eina eficaç per augmentar la biodisponibilitat de contaminant, tot i que és necessari assegurar-se que la seva toxicitat no suposa cap risc i que presenten una biodegradabilitat adequada. Alguns microorganismes provoquen la solubilització del contaminant mitjançant l'excreció de biosurfactants. Els biosurfactants són productes metabòlics amb una estructura química anfipàtica, que incrementen la biodisponibilitat dels contaminants col·locant-se a la interfície entre l'aigua i el contaminant reduint la tensió superficial i facilitant la formació d'emulsions. Els biosurfactants són molècules naturals, fàcilment biodegradables, per tant són una bona alternativa als tensioactius sintètics. L'ús de tensioactius i biosurfactants en general es desaconsella per al tractament in situ ja que l'increment de contaminant dissolt a l'aigua del sòl pot produir problemes de contaminació d'aqüífers com a conseqüència de fenòmens d'infiltració³⁰.

³⁰ B. MARHO (2.000). *Bioavaibility of Contaminants* p. 81

1.5. PRINCIPALS TECNOLOGIES DE BIOREMEDIACIÓ DE SÒLS.

La complexitat dels processos que es donen als diferents tipus de sòl i l'elevat nombre de contaminants que sovint els afecten, ha fet necessari el desenvolupament d'una gran varietat de tecnologies per al seu tractament i recuperació. Algunes d'aquestes tecnologies s'apliquen in situ, són aquelles en que el tractament es du a terme directament sobre el sòl contaminat; en altres casos la remediació es produeix ex situ, és a dir el sòl contaminat és excavat i traslladat a una planta de tractament; finalment alguns tractaments es donen *on site*, en aquests casos hi ha excavació del material a tractar, però aquest no és transportat cap a una planta de tractament si no que és tractat al mateix emplaçament.

Els principals avantatges de les tecnologies de remediació in situ font les ex situ són que en general suposen un cost menor, ja que els costos d'excavació i transport del material poden ser elevats, sobretot quan es tracta de grans quantitats de material contaminat; d'altra banda aquests tipus de tractaments no destrueixen l'estructura del sòl. El principal desavantatge d'aquestes tècniques és que la seva aplicació està més limitada per les característiques de la contaminació i de l'emplaçament, en general són poc viables per a sòls argilosos i per a casos de contaminació d'hidrocarburs molt viscosos. D'altra banda, generalment en les tecnologies ex situ es requereix un temps d'operació menor i es pot exercir un major control de les condicions durant el tractament.

A continuació es presenten les característiques principals d'alguns sistemes de bioremediació del sòl. La descripció d'aquestes tècniques s'ha fet en base a l'estudi *Biodegradation and Bioremediation* realitzat per M. Alexander³¹.

1.5.1. Land farming i biopiles.

Una forma simple de degradar substàncies contaminants és afegir-les sobre el sòl i esperar a que siguin atacades per la microflora. Aquest tractament, anomenat

³¹ M. Alexander (1.999). *Biodegradation and Bioremediation*, p. 327 – 338, 356 – 365.

land farming, ha estat emprat freqüentment per a tractar residus oliosos, residus de plantes de producció de metà, sòls contaminats amb creosota i residus generats a plantes alimentàries, de producció de pasta de paper i adoberies de pell.

Els residus susceptibles de ser tractats per land farming representen una font de carboni suficient per al creixent microbià, però sovint aquest creixement està limitat per la disponibilitat d'altres nutrients, principalment nitrogen i fòsfor. En aquests casos és necessari la aplicació de fertilitzants que continguin aquests elements.

Durant l'ús d'aquesta tècnica s'haurà d'avaluar la possibilitat de generació de lixiviats, que poden contaminar nivells més profunds del sòl i poden arribar a afectar a aquífers; així mateix s'haurà d'avaluar la possibilitat que es generin emissions de compostos orgànics volàtils (COV's) cap a l'atmosfera.

D'altra banda, sovint la difusió d'oxigen a través del sòl no és suficient per mantenir les condicions aeròbiques en que es produeixen la majoria de transformacions de compostos orgànics, per aquest motiu en el land farming pot ser necessari el llaurat i aireig del sòl.

Un altre factor que pot reduir l'efectivitat de les transformacions microbianes durant el land farming és la manca d'humitat, aquesta estratègia de remediació pot incloure una sèrie de transformacions del terreny que permetin el manteniment d'un grau d'humitat òptim per al metabolisme microbià.

El pH del sòl és un altre factor que convé controlar en el land farming ja que es poden produir reaccions metabòliques durant el procés de degradació que facin variar el pH del medi. Per aquest motiu és convenient monitoritzar l'emplaçament per tal d'evitar que s'arribin a condicions desfavorables per al creixement bacterià.

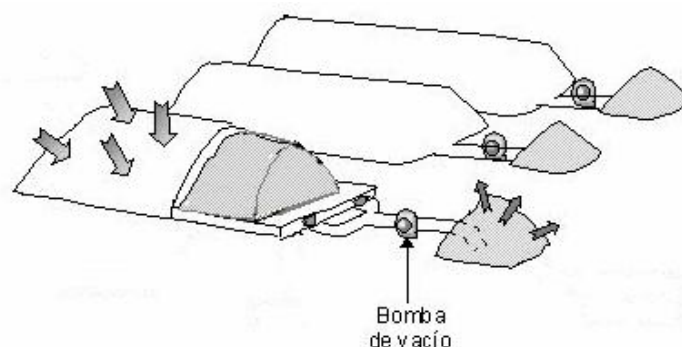
Finalment la temperatura també pot limitar l'efectivitat del land farming. Aquesta tècnica és especialment adequada en zones temperades, on els rangs de temperatura afavoreixen el desenvolupament de les poblacions microbianes.

El principal avantatge del land farming és el seu baix cost, incloent equipaments, construcció i operació.

Les biopiles són una tecnologia similar a l'anterior però en aquest cas s'utilitzen sistemes d'enginyeria per optimitzar el procés de biodegradació. L'aportació de nutrients i aigua es realitza mitjançant sistemes d'irrigació per aspersió; la renovació d'oxigen s'assegura mitjançant un sistema d'aireació i es situa una barrera de contenció, de materials argilosos o sintètics al fons del sòl, per impedir el pas de lixiviats tòxics i un col·lector d'aquests lixiviats. El grau de sofisticació dels diferents components tindrà una gran incidència en el control que es tingui del procés així com en el cost final del tractament.

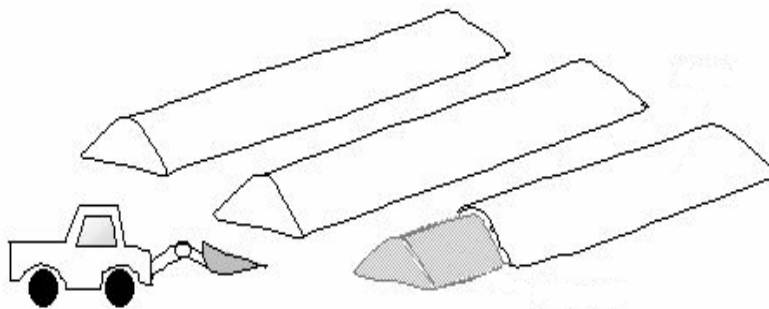
En funció del sistema utilitzat per airejar la biopila es pot distingir entre biopiles estàtiques i dinàmiques. En el primer cas l'oxigen és proporcionat a través d'un sistema de canonades situades per sota de la biopila, mitjançant la injecció d'aire utilitzant bufadors o bé, mitjançant la seva extracció utilitzant bombes de buit; en les biopiles dinàmiques l'aireació es realitza mitjançant el volteig periòdic de la biopila utilitzant equips mòbils com tractors.

FIGURA 3_ Esquema d'un sistema de biopiles estàtiques.³²



³² T.L. VOLKE (2.003). *Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo*, p. 6

FIGURA 4_ Esquema d'un sistema de biopiles dinàmiques³³.



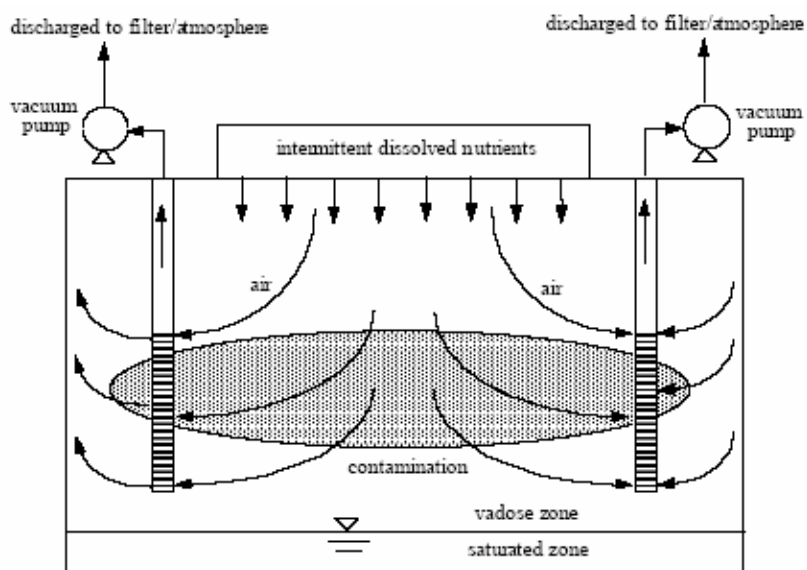
Si els compostos que es volen eliminar són volàtils o es poden formar compostos volàtils tòxics durant la biodegradació, s'han de retenir les emissions gasoses, sovint s'utilitzen filtres de carboni actiu amb aquest objectiu. L'efectivitat de les biopiles s'ha comprovat en molts casos de descontaminació de HAP's; un possible dimensionat que s'ha demostrat òptim són 4 m³ per pila de sòl.

1.5.2. Bioventeig i biosparging

El bioventeig es basa en l'aplicació de diferents mètodes que introdueixen oxigen a la zona no saturada del sòl. Habitualment s'utilitzen pous d'extracció o d'injecció d'aire que cobreixen tota la zona contaminada (veure Figura 3). El volum d'aire a circular es dissenya simultàniament per a proporcionar oxigen i minimitzar la volatilització de contaminants.

Els pous d'extracció s'utilitzen més habitualment que els d'injecció ja que permeten controlar la pèrdua dels gasos volàtils cap a l'atmosfera; tot i que el sòl no contaminat pot actuar com un filtre natural d'aquests COV's, sovint, depenent del tipus de contaminació l'aire extret s'ha de tractar per tal d'eliminar-los, això s'aconsegueix habitualment amb filtres o biofiltres de carboni actiu.

³³ T.L. VOLKE (2.003). *Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo*, p. 6

FIGURA 5_ Esquema d'un sistema de bioventejig.³⁴

Una part essencial del bioventejig és l'anàlisi de l'atmosfera del sòl que ha de permetre prendre les mesures necessàries per tal de controlar la concentració d'oxigen i COV's. Els gasos del sòl es supervisen mitjançant pous on s'instal·len els aparells de mesura.

El bioventejig és una tècnica poc viable pel tractament de sòls poc permeables ja que dificulten el pas de l'aire a través seu reduint l'aportació d'oxigen als bacteris i la seva activitat metabòlica. Tot i això, quan l'aplicació d'aquesta tecnologia es considera apropiada, els costos del tractament solen ser baixos; particularment si no hi ha necessitat de tractar les emissions gasoses produïdes.

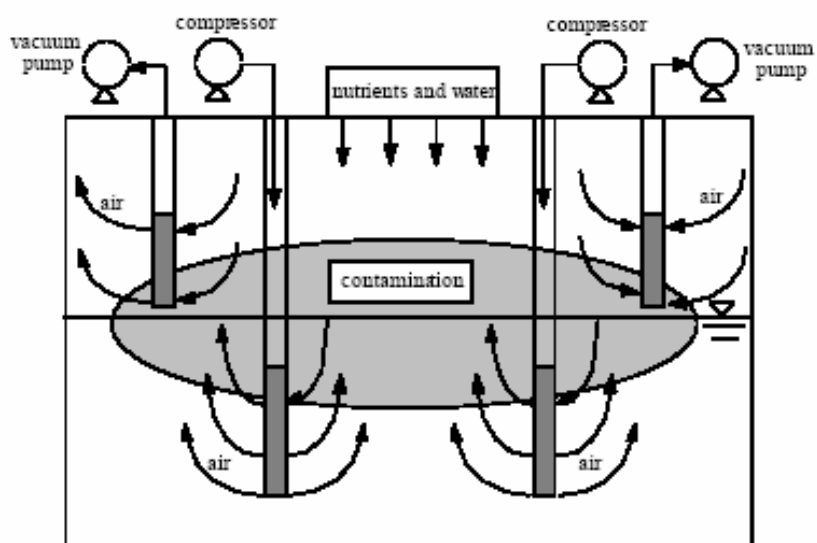
El biosparging té per objectiu estimular la biodegradació del contaminant tant en la zona saturada i com en la no saturada. Va ser desenvolupat per superar els dos inconvenients principals associats als processos de bioremediació in situ de la zona saturada: augmentar disponibilitat d'oxigen i promoure la dissolució de la fase aquosa no líquida (NAPL's). El biosparging ha demostrat ser una tècnica de remediació efectiva per a molts emplaçaments contaminats.

³⁴ A. DAVID I ALTRES (2.003). *Bioremediation of soils contaminated with industrial wastes: a report on the state-of-the-art in bioremediation.*, p. 7

A la tècnica de biosparging s'injecta aire a la zona saturada per tal de proporcionar oxigen i afavorir la biodegradació aeròbica del contaminant en aquesta zona (veure Figura 4). La injecció d'aire no només augmenta la concentració d'oxigen, també afavoreix la dissolució de NAPL's gràcies a l'agitació i a la barreja produïdes per les bombolles d'aire. Normalment la injecció d'aire es realitza a les zones amb major contingut de contaminant.

Sovint el biosparging inclou pous d'extracció d'aire (és a dir bioventeig) per tal de proporcionar oxigen per a la biodegradació a la zona no saturada i per al control dels COV's. Els nutrients i l'aigua son afegits normalment a la zona no saturada de la mateixa forma que en el bioventeig. A la zona saturada els nutrients arriben amb els lixiviats de la zona no saturada o mitjançant la injecció de líquid i/o gas amb els propis nutrients.

FIGURA 6_ Esquema d'un sistema de biosparging.³⁵



³⁵ A. DAVID I ALTRES (2.003). *Bioremediation of soils contaminated with industrial wastes: a report on the state-of-the-art in bioremediation.*, p. 6

1.5.3. Bioreactors.

Els bioreactors es poden classificar en dos grans grups segons si els microorganismes es troben en suspensió en el medi o bé si estan immobilitzats. En el primer cas els microorganismes es mantenen en suspensió contínua i creixen de forma lliure en el medi aquós o adherits a partícules de sòl, també en suspensió. En aquest tipus de reactors l'agitació ha de ser constant, sigui mitjançant un sistema d'agitació mecànica o mitjançant la injecció contínua d'aire. En el segon grup de bioreactors els microorganismes estan fixats en algun tipus de suport que permet que els microorganismes no siguin arrossegats pel pas de l'efluent. El suport pot estar fixat al reactor, o si consisteix en una matriu particulada de petites dimensions, mantingut en suspensió. Aquest tipus de bioreactors presenten un gran ventall de dissenys diferents.

Els bioreactors utilitzats per a dur a terme processos de biodegradació de contaminants poden funcionar en mode continu o en mode batch. Els reactors que operen en mode batch són més freqüents en el tractament de sòls que requereixen grans períodes de temps.

El disseny del funcionament d'un bioreactor ha de permetre el control dels paràmetres que afecten al procés de biodegradació. Alguns dissenys inclouen un sistema de captura dels COV's que es puguin formar. El nivell d'oxigen dissolt, el pH, la concentració de nutrients i la temperatura s'han de poder monitoritzar i controlar. En alguns casos s'inoculen soques aïllades de microorganismes o consorcis bacterians dels quals se sap que la seva activitat és màxima en les condicions d'operació.

En molts assaigs de laboratori s'ha demostrat l'eficàcia dels bioreactors per l'eliminació d'HAP's; concretament de dos, tres i fins a quatre anells. S'ha demostrat que alguns hidrocarburs com els heterocíclics, HAP's de baix pes molecular i alguns fenols de la creosota poden ser degradats en tan sols 3-5 dies, en aquests assaigs de laboratori s'observava que els HAP's d'elevat pes molecular només eren degradats parcialment.

**“STATE OF THE ART” DE LA
BIOREMEDIACIÓ A CATALUNYA.**

2.1. LA SITUACIÓ DELS SÒLS CONTAMINATS A CATALUNYA.

Donada la manca de dades sobre la situació real de la contaminació de sòls a Catalunya i la seva evolució, en aquest apartat s'avaluarà la problemàtica de la contaminació de sòls a partir de l'evolució d'indicadors indirectes del risc existent, en concret de les activitats que potencialment poden provocar contaminació del sòl. A banda de la contaminació produïda a l'actualitat cal considerar l'herència dels llocs contaminats per les activitats industrials que es donaven al passat, és a dir, la contaminació històrica.

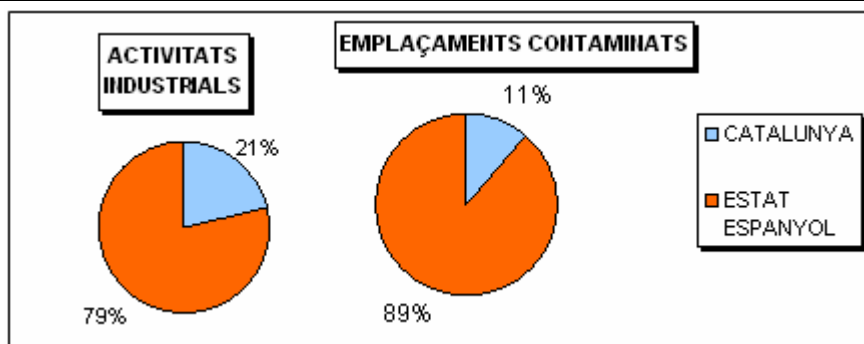
Els 31.895 Km² de Catalunya es caracteritzen per tenir una elevada diversitat de relleus, clima i vegetació en un espai relativament petit. Amb una població que representa el 16% del total de l'Estat, Catalunya contribueix en un 19% al PIB d'Espanya i concentra el 24% de la població empleada en el sector industrial³⁶.

L'inventari de sòls contaminats publicat al Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados (1995-2005) il·lustra la magnitud del problema de la contaminació de sòls. Al 1995 es van inventariar 4.913 activitats industrials a Catalunya considerades com a possibles focus de contaminació de sòls. Així mateix es van inventariar 577 emplaçaments considerats com potencialment contaminats. A la resta de l'Estat el nombre d'activitats industrials i espais potencialment contaminats inventariats van ser respectivament 18.142 i 4.532. Els espais potencialment contaminats al territori català representaven al 1995 el 12'73 % del total d'espais detectats a l'Estat Espanyol (veure Taula 4). La major part dels emplaçaments contaminats, un 27 %, es trobava a menys de 100 metres de zones urbanes i en el 60 % els casos el risc de contaminació de les aigües subterrànies era greu.

³⁶ Instituto Nacional de Estadística, www.ine.es (dades del 2005).

TAULA 4_ Activitats industrials i espais potencialment contaminats (1995)³⁷.

	ACTIVITATS INDUSTRIALS	EMPLAÇAMENTS POTENCIALMENT CONTAMINATS
CATALUNYA	4913	577
ESTAT ESPANYOL	18142	4532



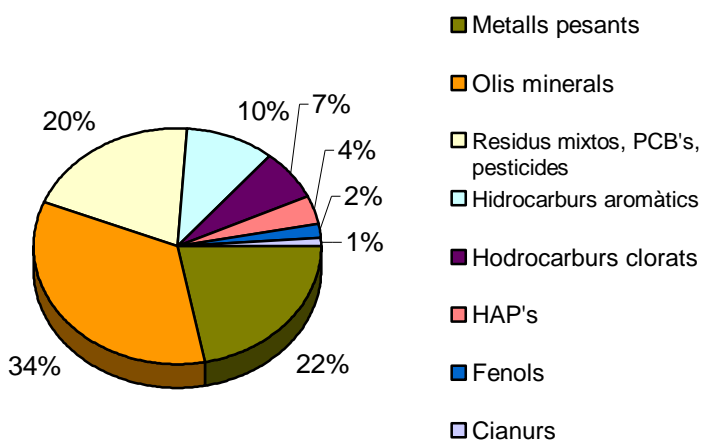
A finals del 2.004 el nombre d'emplaçaments potencialment contaminats identificats a Catalunya era de 1.512, dels quals després dels estudis de caracterització es van classificar com a contaminats 455. D'aquests emplaçaments 237 han estat recuperats³⁸.

Els contaminants majoritaris trobats en aquests emplaçaments són metalls pesats, olis minerals, hidrocarburs, en especial els aromàtics (BTEX) i fenols, i alguns compostos altament tòxics com l'HCH, el DDT, PCB's, arsènic i mercuri (veure Figura 7).

³⁷ Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados (1995-2005), BOE núm 114 de 13/5/1995, p. **13.928**

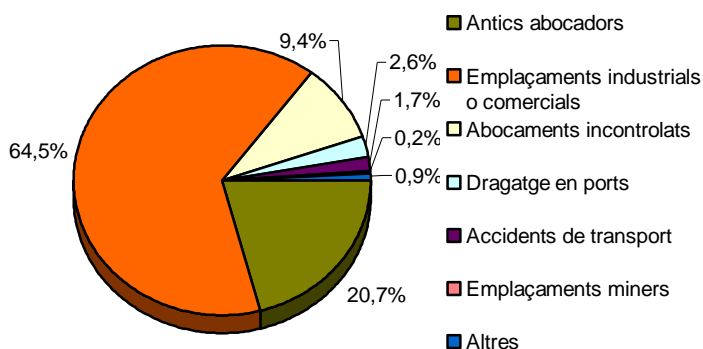
³⁸ AGÈNCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA (2.005). *Informe sobre el medi ambient i desenvolupament sostenible*, p. **135**

FIGURA 7_ Contaminants presents als emplaçaments potencialment contaminats.³⁹



El 94% dels casos de contaminació de sòls a Catalunya té el seu origen en pèrdues, abocaments o males pràctiques de gestió de matèries primeres i residus en instal·lacions industrials i comercials, així com en antics abocadors que funcionaven sense les mesures de protecció i control necessàries, i en l'abocament incontrolat de residus.

FIGURA 8_ Origen de la contaminació per tipus d'activitat als emplaçaments potencialment contaminats.⁴⁰

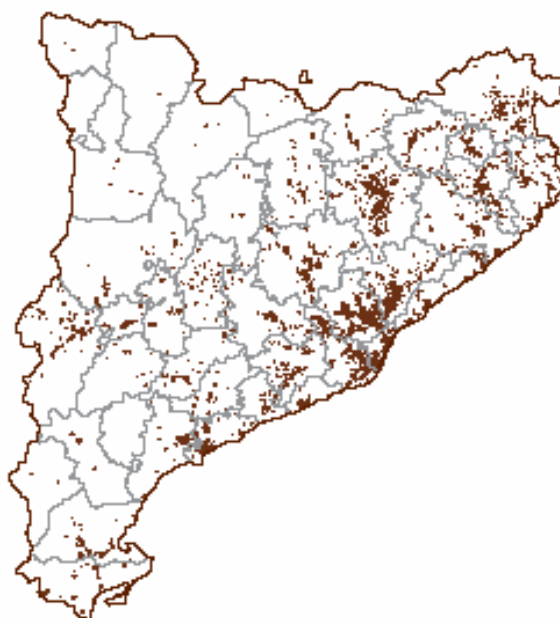


³⁹ AGÈNCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA (2.005). *Informe sobre el medi ambient i desenvolupament sostenible*, p. 136

⁴⁰ AGÈNCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA (2.005). *Informe sobre el medi ambient i desenvolupament sostenible*, p. 136

Les activitats industrials a Catalunya es concentren sobretot a les comarques que envolten l'Àrea Metropolitana de Barcelona. Amb una extensió de 3.236 Km², l'Àrea Metropolitana de Barcelona representa el 70% de la població de Catalunya i l'11% de la població estatal espanyola. És una zona econòmicament dinàmica: contribueix al 14% del PIB estatal i concentra el 21% de les indústries espanyoles⁴¹. (veure Figura 9). Una altra zona amb una activitat industrial important és la Catalunya Central, especialment les comarques d'Osona i el Bages.

FIGURA 9_ Localització de les activitats industrials i comercials a Catalunya (1997).⁴²



La legislació catalana vigent en matèria de sòls contaminats queda limitada a l'Article 15 de la Llei 6/1.993, del 15 de Juliol, reguladora dels residus, que defineix jurídicament el concepte d'espai degradat i estableix el règim de responsabilitats per a la seva recuperació. D'altra banda, tal com s'ha explicat al punt 1.2, la Llei bàsica 10/1.998, del 21 d'Abril, de residus, estableix la regulació bàsica estatal en matèria

⁴¹ Instituto Nacional de Estadística, www.ine.es (dades del 2005).

⁴² AGÈNCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA (2.003). Informe sobre l'evolució de l'estat del medi ambient a Catalunya, p. 300

de sòls contaminats, el desenvolupament reglamentari que preveu s'aborda en el Real Decreto 9/2.005, de 14 de Gener de 2.005, pel que s'estableix la relació d'activitats potencialment contaminants del sòl i els criteris i estàndards per a la declaració de sòls contaminats. Aquesta legislació pot ser consultada als Annexos A.III, A.V i A.VI.

A l'any 1.997 es va publicar un informe que determinava els criteris provisionals de qualitat del sòl a Catalunya(CQS)⁴³. Aquest estudi es basa en els criteris establerts a altres països europeus i als EEUU i, fins l'aprovació del Real Decreto 9/2.005, determinava els valors numèrics de concentració de substàncies al sòl a partir dels quals era necessari avaluar el risc de la contaminació. Actualment per als sòls contaminats amb metalls pesats encara s'empren aquests valors. (veure Annex A.IV). En l'aplicació dels CQS cal considerar els següents punts:

- Consideren tres tipus d'ús del sòl: industrial, urbà i una tercera classificació que engloba totes les altres possibilitats (ús agrícola, recreatiu, etc.).
- Amb la seva superació no es pot afirmar ni que un terreny estigui contaminat, ni que sigui necessari dur a terme accions correctives.
- En aquells casos especialment sensibles, en que les condicions són més desfavorables, i sobretot per aquells emplaçaments d'ús no industrial, caldrà utilitzar els CQS amb precaució.
- Cal associar mètodes d'anàlisi per cadascun dels contaminants inclosos en la llista.

Actualment l'Agència de Residus de Catalunya està elaborant un Inventari de Sòls Contaminats a Catalunya, que ha d'estar finalitzat l'any 2.007 i està desenvolupant la definició de criteris per establir els nivells acceptables de risc, els objectius de protecció i els paràmetres d'exposició. El 2.006 l'Agència de Residus de Catalunya ha atorgat als ens locals 1.000.000 € en concepte de subvencions per finançar projectes de recuperació de sòls contaminats.⁴⁴

⁴³ E. BUSQUET (1.997). Elaboració dels Criteris de Qualitat del Sòl a Catalunya. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient, Junta de Residus.

⁴⁴ Departament de Medi Ambient i Habitatge.(www.mediambient.gencat.net)

2.2. LA GESTIÓ DELS SÒLS CONTAMINATS A CATALUNYA.

La finalitat de la gestió d'un sòl contaminat és avaluar la gravetat del problema, determinar la necessitat o no de recuperar l'emplaçament segons uns criteris establerts prèviament i, en cas necessari, establir mesures d'urgència per atenuar la contaminació fins a uns nivells de risc acceptables. El procés de gestió dels sòls contaminats a Catalunya es divideix en quatre fases:

TAULA 5_ Fases del procés de gestió de sòls contaminats a Catalunya.

FASE	EMPLAÇAMENT	AVALUACIÓ	CRITERI PER LA PRESA DE DECISIONS
Reconeixement preliminar	Emplaçament Potencialment Contaminat	Identificació inicial del problema	Avaluació simplificada del risc
Avaluació preliminar	Sòl sospitós d'estar contaminat	Investigació per identificar el problema	Criteris de Qualitat del Sòl/RD 9/2.005
Avaluació detallada	Emplaçament contaminat	Selecció de mesures de remediació i definició dels objectius de remediació	Millors Tècniques Disponibles/Factors socioeconòmics
Recuperació i monitorització	Emplaçament contaminat	Implementació de l'estratègia de remediació i monitorització	

La investigació d'un emplaçament sospitós de patir contaminació es basa en una sèrie d'actuacions graduals. Es parteix d'accions ràpides i amb baix cost econòmic fins arribar a actuacions de confirmació, més lentes i costoses. L'adopció d'un esquema d'investigació progressiva permet optimitzar els resultats del procés amb els recursos que se li assignen. En aquest esquema d'investigació l'avaluació dels resultats obtinguts en cadascuna de les fases ha de permetre prendre decisions sobre les actuacions posteriors.

En cada fase d'estudi s'avalua tota la informació per determinar si cal continuar cap a fases més avançades, que aportin informació més detallada, iniciar el procés de remediació del sòl o descartar-lo com a sòl contaminat.

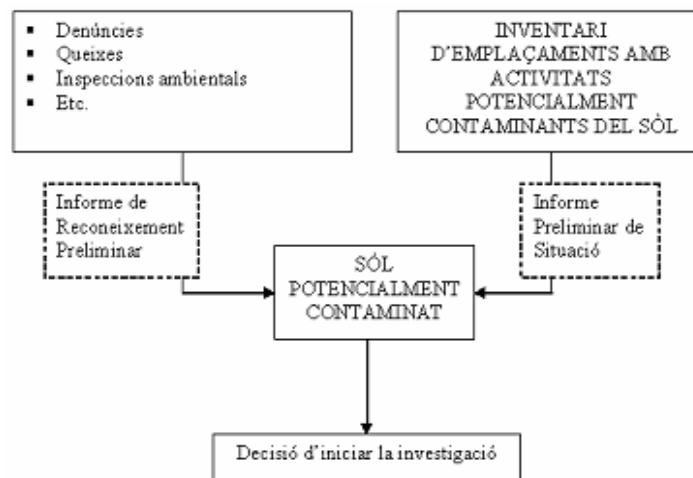
2.2.1. Fase de reconeixement preliminar.

La Fase de Reconeixement Preliminar consisteix en recollir informació per establir si hi ha indicis de que s'hagi produït en el passat o s'estigui produint actualment contaminació significativa en un sòl determinat.

La identificació d'un sòl potencialment contaminat inicia el procés d'investigació. Els emplaçaments considerats com potencialment contaminats són:

- A. Emplaçaments en els que s'ha desenvolupat (en el passat o actualment) una activitat potencialment contaminant. En aquest cas el titular del sòl haurà de presentar l'Informe Preliminar de Situació. El Real Decreto 9/2005 estableix les activitats potencialment contaminants als seus articles 3.1 i 3.2:
- Activitats incloses a l'Annex I del mateix reial decret.
 - Activitats que produeixen, utilitzen o emmagatzemen més de 10T per any d'una o vàries de les substàncies incloses en el Real Decreto 363/1995, del 10 de Març (veure Annex A.VI).
 - Activitats en les que s'emmagatzema combustible per a ús propi segons el Real Decreto 1523/1999, d'1 d'Octubre, amb un consum anual mig superior a 300.000 litres i un volum total d'emmagatzematge igual o superior a 50.000 litres
- B. Emplaçaments dels que es tingui informació de contaminació històrica, relacionats amb denúncies d'abocaments incontrolats, accidents on es vegin involucrades substàncies perilloses, etc. En aquest cas el titular haurà de presentar l' Informe de Reconeixement Preliminar, que ha d'incloure:
- Identificació de la problemàtica: tipus d'incident, contaminants involucrats, extensió de l'afecció, actuacions d'emergència desenvolupades, etc.
 - Informació bàsica de les característiques físiques de l'emplaçament i el seu entorn.
 - Informació addicional que es consideri rellevant.

FIGURA 10_ Identificació d'emplaçaments potencialment contaminats



INFORME PRELIMINAR DE SITUACIÓ.

El contingut mínim de l'Informe Preliminar de Situació està especificat a l'Annex II del Real Decreto 9/2005. A Catalunya aquest contingut mínim s'ha ampliat amb camps d'informació addicionals amb l'objectiu de fer una caracterització més específica de l'activitat que es desenvolupa a l'emplaçament.

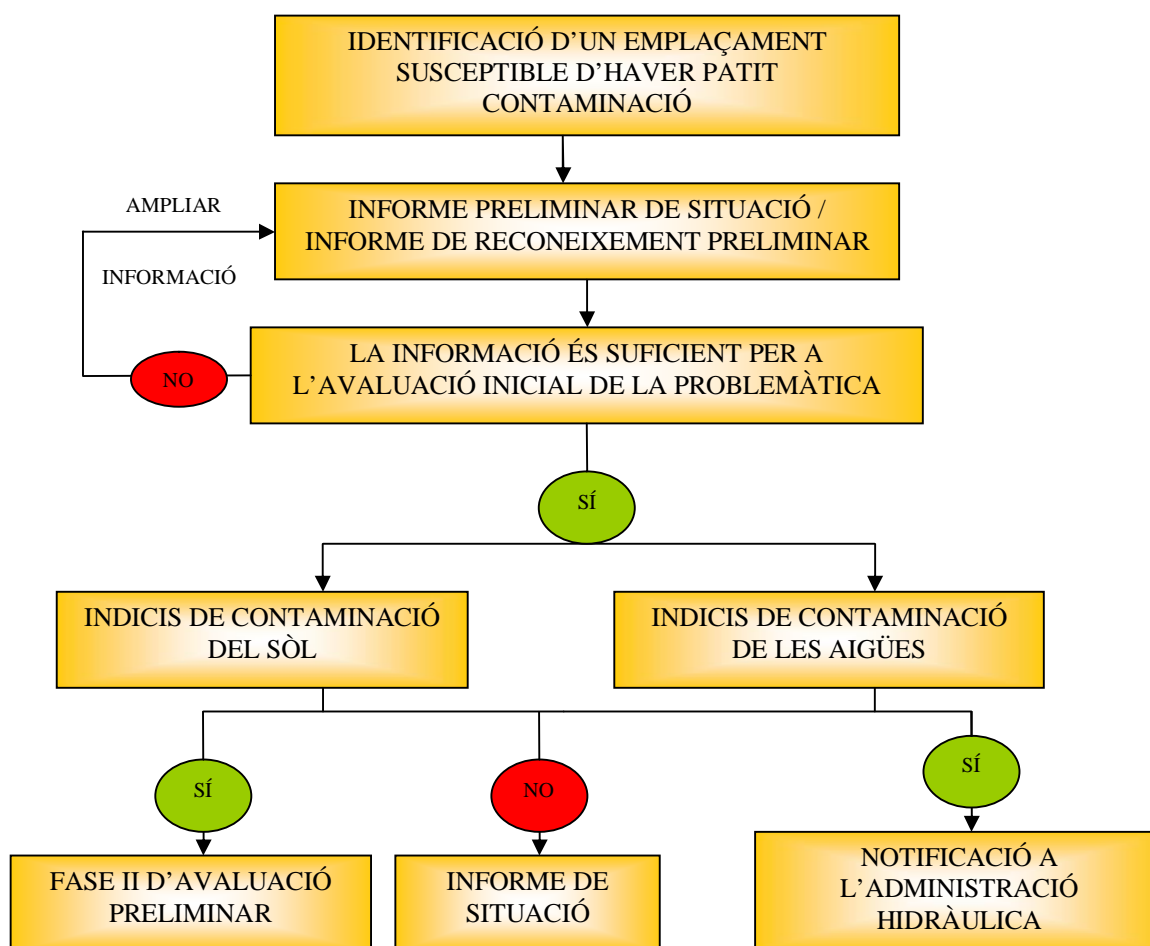
L'objectiu de l'Informe Preliminar de Situació és valorar la possibilitat de que s'hagi produït o s'estigui produint contaminació del sòl. Es basa en la recopilació d'informació, principalment sobre dades històriques de les activitats que s'han desenvolupat i es desenvolupen a l'emplaçament així com dades sobre les característiques físiques de l'emplaçament. L'Informe Preliminar de Situació contempla l'elaboració un model conceptual inicial de la problemàtica que ha d'incloure, entre altres qüestions, una hipòtesi preliminar sobre els possibles contaminants i la seva distribució.

La realització d'aquest informe no suposa l'obligació de realitzar cap tipus d'assaig o d'anàlisi específica tot i que es pot presentar la informació complementària que es consideri convenient per a una millor valoració de la situació del sòl.

De l'anàlisi d'aquest informe es pot arribar a dues conclusions:

- Que no existeixen indicis fonamentats de contaminació del sòl. En aquest cas es classifica l'emplaçament com no contaminat. Aquesta informació queda recollida en un Informe de Situació i al Registre de la Propietat.
- Que existeixin indicis de contaminació del sòl. En aquest cas cal recórrer a fases posteriors que inclouen la presa de mostres per obtenir proves concloents de l'estat de qualitat del sòl.

FIGURA 11_ Fase de Reconeixement Preliminar en la gestió de sòls contaminats.⁴⁵



⁴⁵ Agència de Residus de Catalunya.

2.2.2. Fase d'avaluació preliminar.

La Fase d'Avaluació Preliminar té per objectiu avaluar de forma específica, amb dades qualitatives i quantitatives, la magnitud de la problemàtica als sòls que, després d'un reconeixement preliminar, presenten característiques que fan suposar indicis de contaminació.

Més en concret els objectius d'aquesta fase són definir l'origen i naturalesa de la contaminació, els vectors de transferència, els subjectes que s'han de protegir i determinar la necessitat d'establir mesures d'emergència sobre el terreny. Amb aquests objectius s'elaborarà un Informe d'Avaluació Preliminar.

CONTINGUT DE L'INFORME D'AVALUACIÓ PRELIMINAR

L'Informe d'Avaluació Preliminar comença amb una visita a l'emplaçament, un reconeixement visual de la zona, la recopilació d'informació bàsica de les característiques físiques del medi i una avaluació inicial de la problemàtica, amb l'objectiu d'establir la necessitat o no d'implantar mesures d'urgència.

L'Informe d'Avaluació Preliminar contempla la realització de mostres de sòls, sediments i/o aigües amb l'objectiu de quantificar els contaminants presents al medi. S'haurà de presentar un informe on s'especifiquin i justifiquin els paràmetres analitzats i la metodologia de mostreig emprada. Tant el procediment de mostreig com la conservació de les mostres hauran de garantir la fiabilitat i representativitat dels resultats obtinguts.

En aquest informe s'amplia la informació de les activitats que a nivell històric han pogut contaminar l'emplaçament, tant pel que fa a la ubicació com a les substàncies emprades. Ha d'incloure també una investigació detallada de la geologia i l'hidrogeologia del medi, incloent la identificació d'aqüífers, direcció de flux de les aigües subterrànies, mapa d'isopiezes, etc.

Els criteris de decisió per considerar que el sòl està contaminat varien en funció de l'objecte de protecció, ésser humà o ecosistema. Quan l'objecte de protecció és l'ésser humà, els criteris per a decidir si el sòl es considera contaminat o no varien en funció dels usos del sòl. Quan hagi un canvi en els usos del sòl s'haurà de revisar aquest informe per assegurar que es segueixen complint els requisits legals per al nou ús. A les taules següents es troben resumits els criteris establerts al Real Decreto 9/2005, per a considerar que un sòl està contaminat o que requereix una avaluació de riscos.

TAULA 6_ Criteris de decisió per considerar un sòl contaminat.

OBJECTE DE PROTECCIÓ: SALUT HUMANA	OBJECTE DE PROTECCIÓ: ECOSISTEMES
La concentració al sòl d'alguns dels contaminants presents a l'Annex V del RD 9/2005 és 100 vegades superior als NGR establerts en aquest annex per a l'ús actual.	La CL(E)50 ⁴⁶ per organismes del sòl és inferior a 10 mg de sòl contaminat/g sòl
La concentració al sòl d'alguns contaminants no present a l'Annex V del RD 9/2005, és 100 vegades superior als NGR calculats segons el que s'estableix a l'Annex VII.	La CL(E)50 ⁴⁷ per organismes aquàtics és inferior a 10 ml de lixiviat ⁴⁸ /l d'aigua sòl

TAULA 7_ Criteris de decisió per considerar la necessitat d'una avaluació de risc.

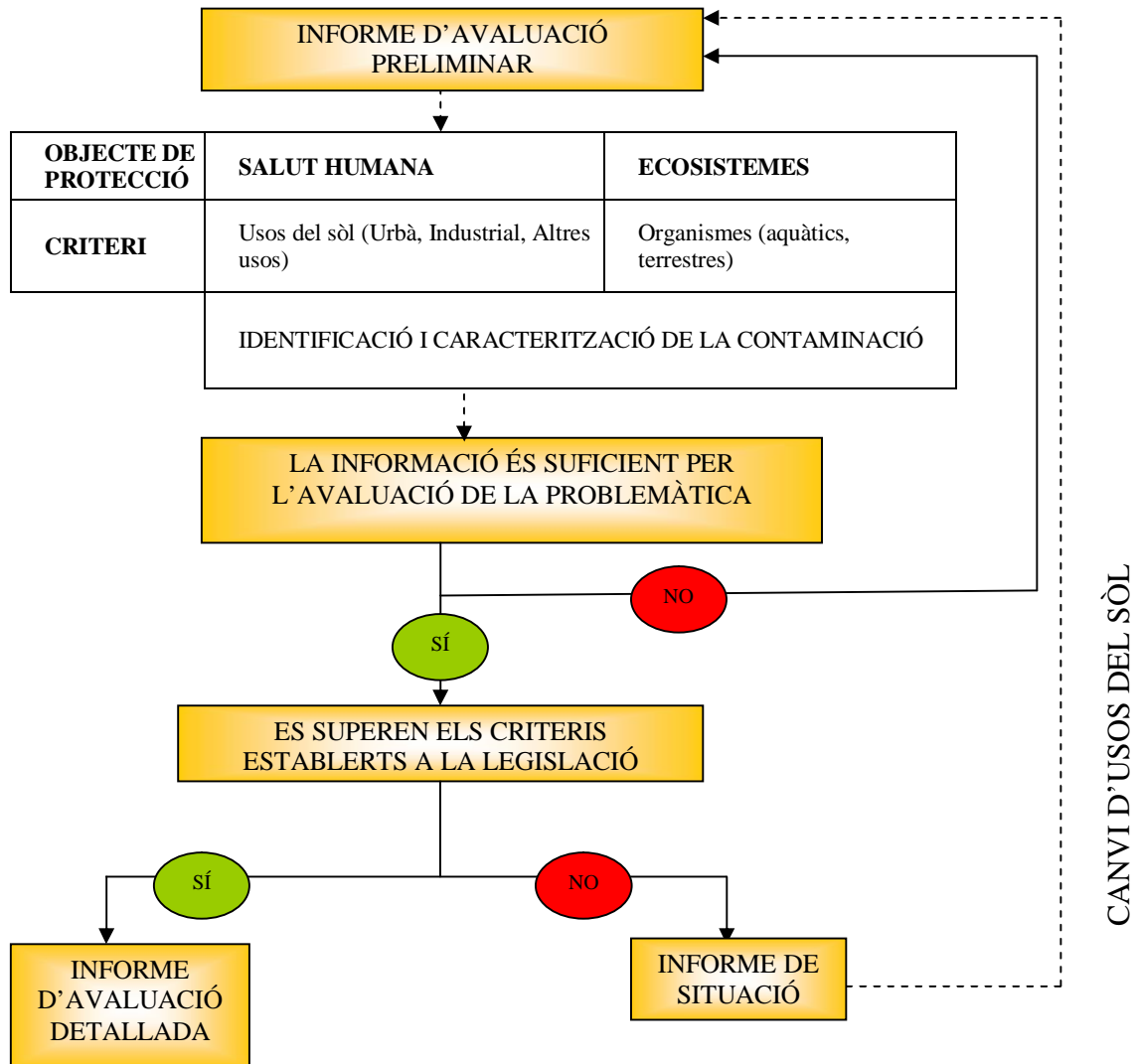
OBJECTE DE PROTECCIÓ: SALUT HUMANA	OBJECTE DE PROTECCIÓ: ECOSISTEMES
La concentració al sòl d'alguns dels contaminants presents a l'Annex V del RD9/2005 supera els NGR establerts per a l'ús del sòl actual o previst.	La concentració d'alguna de les substàncies presents a l'Annex VI del RD9/2005 supera els NGR per al grup o grups d'organismes objecte de protecció.
La concentració al sòl d'alguns contaminants no present a l'Annex V del RD 9/2005, és superior als NGR calculats segons el que s'estableix a l'Annex VII.	La concentració d'alguns contaminants no recollit a l'Annex VI del RD 9/2005, és superior als NGR calculats segons els criteris establerts a l'Annex VII
Concentració de Hidrocarburs Totals de Petroli (TPH's) superior a 50 mg/Kg	Existeix toxicitat en bioassaigs amb mostres diluïdes

⁴⁶ Concentració letal o efectiva mitja mesurada segons els assaigs de toxicitat OCDE 207, OCDE 208, OCDE 216, OCDE 217 o equivalents segons el Ministeri de Medi Ambient.

⁴⁷ Concentració letal o efectiva mitja mesurada segons els assaigs de toxicitat OCDE 201, OCDE 202, OCDE 203 o equivalents segons el Ministeri de Medi Ambient.

⁴⁸ Obtingut segons el procediment normalitzat DIN-38414

FIGURA 12_ Fase d'Avaluació Preliminar en la gestió de sòls contaminats.⁴⁹



⁴⁹ Agència de Residus de Catalunya

2.2.3. Fase d'avaluació detallada

Els sòls considerats contaminats segons els criteris explicats anteriorment o que es consideri que necessiten una caracterització dels riscos associats als contaminants presents hauran de presentar un Informe d'Avaluació Detallada.

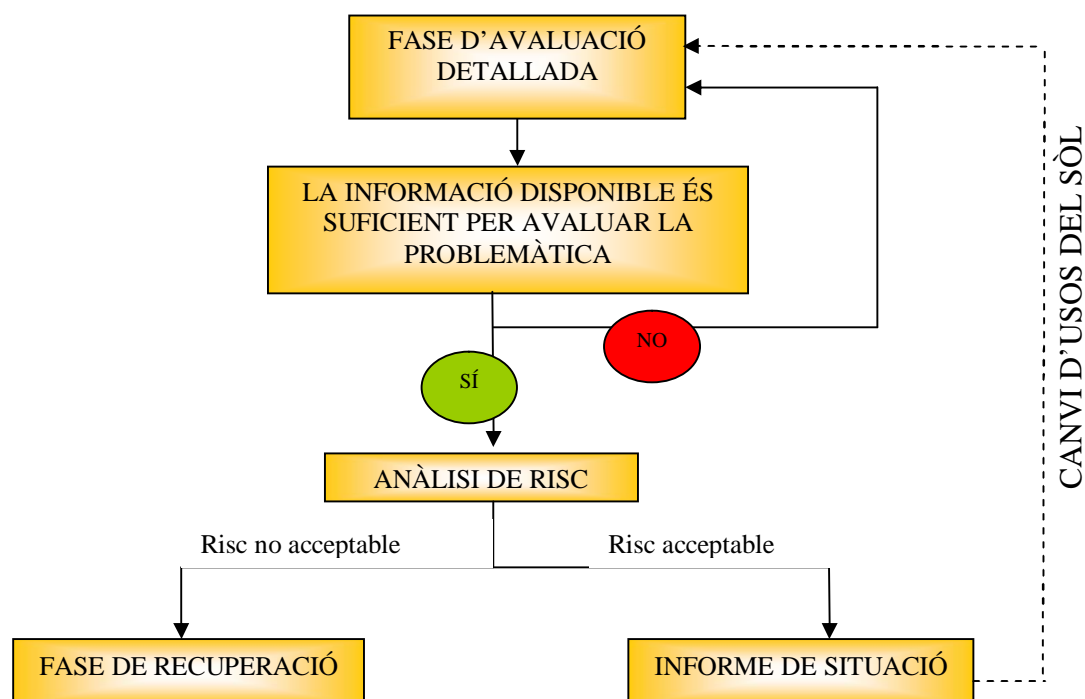
L'objectiu final d'aquest estudi serà la realització d'un anàlisi de riscos actuals i futurs derivats de la contaminació. Per fer aquesta avaluació serà necessària la caracterització precisa de la contaminació:

- Concentració i tipus de contaminant.
- Distribució espacial (horitzontal i vertical) del contaminant.
- Distribució temporal del contaminant.
- Possibles migracions, ja siguin dins de l'emplaçament contaminat o fora d'ell.
- Model conceptual del problema de contaminació.

Una part fonamental d'aquesta fase és la realització d'un mostreig del medi afectat que ha de permetre una caracterització completa, tant en superfície com en profunditat, dels diferents contaminants presents. En funció dels resultats pot ser necessària la realització de mostres successius fins a considerar que es disposa de la informació suficient per avaluar el risc i planificar el sanejament.

L'anàlisi de riscos actuals i futurs és l'eina que permetrà prendre decisions sobre les actuacions a implantar sobre el terreny. L'anàlisi del risc determinarà si aquest és acceptable o no; si es considera que el risc és inacceptable caldrà implantar mesures per tal de reduir aquest risc fins a nivells acceptables. Aquestes mesures es decidiran tenint en compte factors socioeconòmics i les millors tecnologies disponibles. En general les mesures de recuperació aniran acompanyades d'altres de control i seguiment de la seva efectivitat.

FIGURA 13_ Fase d'Avaluació Detallada en la gestió de sòls contaminats.⁵⁰



2.2.4. Fase de recuperació.

L'objectiu d'aquesta fase és reduir la concentració de contaminants al sòl fins a nivells que suposin un nivell de risc acceptable per a les persones i els ecosistemes. En general les etapes en que es divideix aquesta fase són:

- Redacció d'un projecte de recuperació a partir d'un estudi on s'analitzen les diferents alternatives amb criteris ambientals, tècnics i econòmics.
- Execució del projecte de remediació aprovat.
- Seguiment de l'evolució de la contaminació al medi.
- Comprovació de l'efectivitat de les actuacions realitzades mitjançant un monitoratge a mig o llarg termini.
- Si els resultats no s'ajusten als esperats, implementació de noves mesures de remediació.

⁵⁰ Agència de Residus de Catalunya

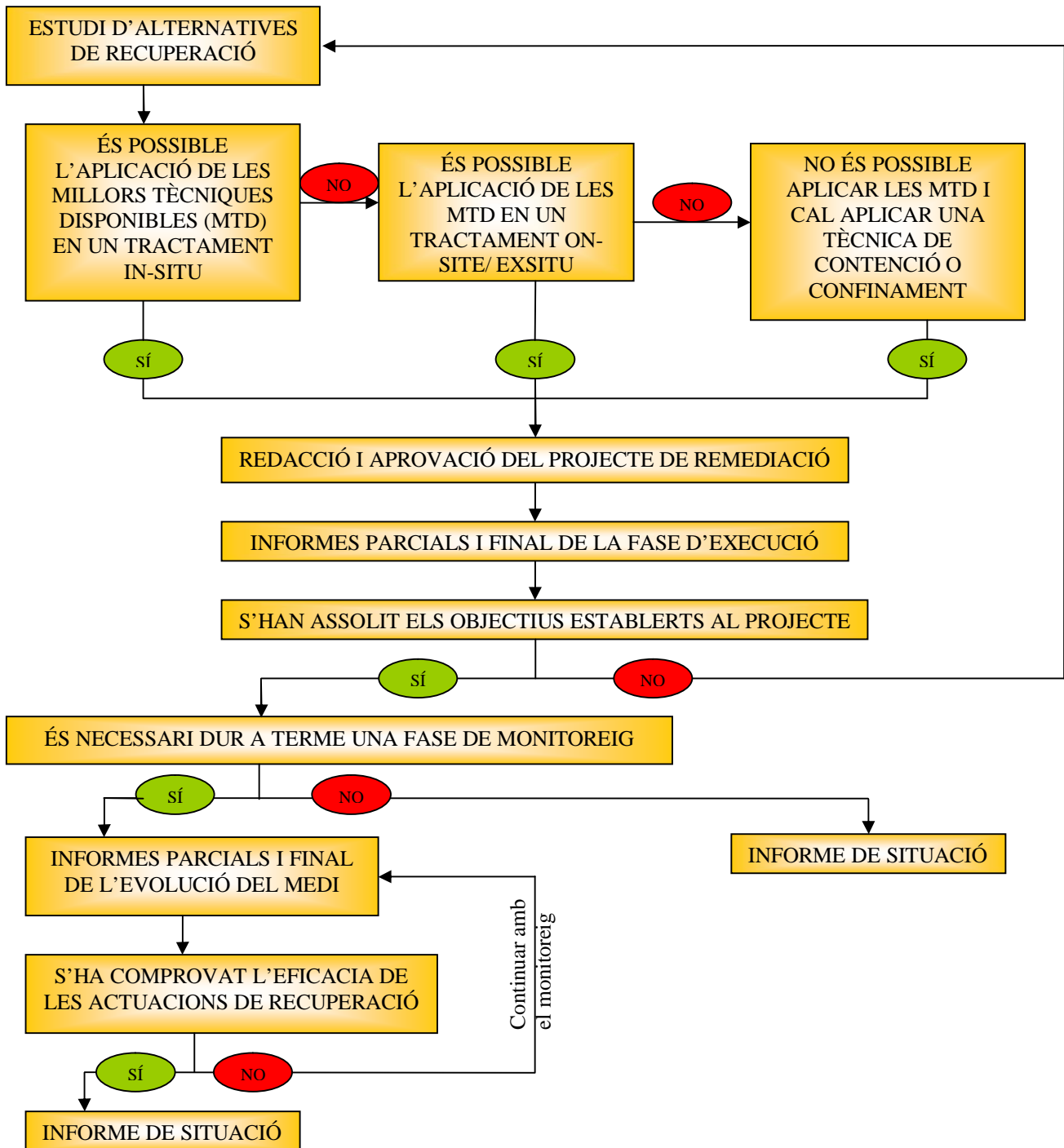
Segons el que estableix el Real Decreto 9/2005, amb l'objectiu de fer una gestió ambientalment sostenible, sempre que sigui possible i la situació ambiental, econòmica i els coneixements tècnics ho permetin, s'aplicaran les millors tècniques disponibles per fer la remediació.

Durant l'execució de les tasques de recuperació s'haurà de presentar una descripció de les activitats realitzades, així com informes sobre l'evolució de la contaminació i una representació gràfica de la contaminació a les zones tractades. S'hauran de presentar balanços sobre els tractaments executats, superfícies i volums tractats i informes sobre l'eficiència d'aquests tractaments i, al final de la fase de recuperació, s'haurà de fer una investigació que garanteixi que s'han assolit els objectius marcats al projecte de remediació.

Quan finalitzi el procés de recuperació es pot implementar la fase de monitoratge per tal de comprovar que es mantenen els objectius de sanejament establerts a mesura que passa el temps i que el medi evoluciona favorablement. En aquest cas s'haurà de presentar un informe on s'inclogui la durada, metodologia i intervals de mostreig, i un plànol on quedin representats els punts de mostreig proposats. S'haurà de garantir la conservació i representativitat de les mostres, així com la fiabilitat dels resultats.

La declaració de sòl no contaminat es farà constar a l'Informe de Situació i al Registre de Propietat. Quan hagi un canvi d'ús del sòl en aquell emplaçament s'haurà de comprovar que el nivell de contaminació continua suposant un risc acceptable per al nou ús.

FIGURA 14_ Fase de Recuperació en la gestió de sòls contaminats.⁵¹



⁵¹ Agència de Residus de Catalunya

2.3. LA BIOREMEDIACIÓ AL MERCAT DE TÈCNiques DE RECUPERACIÓ DE SÒLS CONTAMINATS: ÚS DELS TRACTAMENTS BIOLÒGICS AL TERRITORI CATALÀ.

La realització d'aquest punt del projecte s'ha fonamentat en informació proporcionada pels òrgans públics de la Generalitat de Catalunya responsables de la gestió dels sòls contaminats. Les consultes s'han fet personalment en reunions amb en Josep Miquel Subirana Tècnic del Departament de Gestió de l'Àrea Industrial de l'Agència Catalana de Residus, a través de consultes telefòniques amb el propi Josep Miquel Subirana i amb en Joan Bartolls, Responsable de Documentació de Sòls Contaminats. La informació també s'ha sol·licitat a través de cartes formals dirigides a Josep Antón Domènech, Cap del Departament de Gestió de l'Agència de Residus de Catalunya.

Malauradament la informació sol·licitada consistent en informació sobre el percentatge d'ús de la bioremediació als projectes realitzats en relació a l'ús d'altres tecnologies, no ha pogut ser facilitada donada la inexistència d'estudis que proporcionin dades precises sobre aquest tema. Tot i això, des de l'Agència de Residus de Catalunya es considera que l'aplicació de la tecnologia de remediació fins al moment correspon al 5% dels treballs realitzats. L'Agència de Residus de Catalunya considera que la bioremediació és una tecnologia avantatjosa donat que permet actuar in situ evitant la generació, trasllat i eliminació de residus.

2.3.1. Opinió de professionals del camp de la descontaminació de sòls.

Aquesta part del projecte està basada en converses mantingudes amb professionals d'empreses, principalment catalanes, que treballen habitualment en la gestió de sòls contaminats. En les línies que segueixen es presenta l'opinió alguns d'aquests experts, que tenen una visió molt directa de la situació de l'ús de les tecnologies de descontaminació de sòls. En aquesta part del projecte no es pretén que les empreses que aquí es presenten representin al conjunt. Però sí, que aquesta petita mostra permeti il·lustrar amb casos concrets quina és la realitat de la situació, alhora que ens permeti reflexionar sobre el futur.

VERÒNICA ARROYO – Ingenieros Asesores Profesionales (IAP). Barcelona

Generalment la necessitat de gestionar amb urgència un sòl contaminat, molt sovint per raons urbanístiques, de transmissions d'immobles, ... i l'aspecte econòmic, fan que el tractament més utilitzat actualment sigui l'abocament, imposant-se moltes vegades aquestes qüestions econòmiques i de temps per davant de l'opció més sostenible tècnica i ambientalment.

Dins de les tecnologies de bioremediació, el biosparging in situ és una de les tecnologies de bioremediació més competitives tècnicament, ja que combina la biodegradació in situ per estimulació microbiològica gràcies a l'aport d'oxigen i l'efecte del "stripping" o volatilització de contaminants a l'aire (amb posterior tractament de descontaminació d'aquest).

Previsiblement la tendència d'aplicació de la bioremediació és cap a l'augment. L'aparició del RD 9/2005 obre un nou horitzó atorgant una encertada rellevància al vector del sòl (i com a conseqüència a les aigües subterrànies) que fins fa poc ni la consciència social ni la llei reconeixien. El RD 9/2005 dóna prioritat a les tècniques de tractament in situ que evitin la generació, trasllat i eliminació de residus, i que garanteixin solucions permanents. En aquest sentit, la bioremediació és un bon exemple de tractament tècnicament eficaç i ambientalment sostenible.

Daniel Fernández – CENSA. Barcelona.

A CENSA la majoria de projectes de descontaminació de sòls realitzats des del 2005 han consistit en l'excavació del material contaminat i el transport cap a abocadors, també es va aplicar un cas de land farming que va resultar efectiu. Les tecnologies de bioremediació són les més econòmiques i donen resultats molt bons, per aquest motiu en un futur haurien de ser majors el projectes de bioremediació que es duguin a terme.

Xavier Barberà – Entitat Col·laboradora de l'Administració (E.C.A) Barcelona.

ECA és una empresa que treballa habitualment en temes de contaminació de sòls tot i no ser la principal activitat de l'empresa. Als últims dos anys els projectes de bioremediació corresponen a menys d'un 25 % dels casos. El factor que és més important per als clients alhora de remediare un sòl és el temps aquest fet fa que en molts casos s'opti per la solució més ràpida, és a dir l'excavació del material i el seu transport cap a abocadors. Previsiblement aquesta situació en un futur proper no canviarà, per tant l'ús de la bioremediació al futur seran semblants als actuals.

Pilar Riera – Ambiente y Tecnología Consultores. Barcelona.

El volum de treball en relació a als projectes de descontaminació de sòls a Ambiente y Tecnología Consultores és baix, al període 2005-06 es va dur a terme un projecte de remediació de la contaminació d'un sòl. En aquest cas es va dur a terme l'operació d'excavació i transport del material contaminat cap a un abocador.

La bioremediació es considera una tecnologia barata dins el mercat de les tecnologies de remediació i és eficaç sobre tot en casos de contaminació superficial. La seva eficàcia en quant al factor temps depèn sobretot del nivell de contaminació inicial i el nivell de descontaminació desitjat. En general es pot aplicar amb contaminants orgànics per tant el seu ús pot augmentar en el futur en aquests casos;

d'altra banda però, és una tecnologia que no serveix per tractar tots els tipus de contaminació, per exemple no és útil en casos de contaminació per metalls pesats.

Núria Guasca – Tecnomia. Barcelona.

Segons la seva experiència els tractaments més habituals són l'excavació i abocament del material contaminat, la bioremediació es va utilitzar en menys del 25% dels casos duts a terme per Tecnomia.

Previsiblement l'ús de la bioremediació en el futur es mantindrà com a l'actualitat ja que tot i ser una tecnologia econòmicament competitiva i que dona bons resultats de qualitat del sòl quan s'aplica, globalment no és competitiva donat que, comparada amb altres tecnologies, la seva eficàcia en quant al factor temps és molt baixa.

Jordi Boronat – MEDITERRA CONSULTORS. Barcelona.

A Mediterra Consultors es treballa habitualment en projectes de descontaminació de sòls. Des del 2.005 s'han dut deu projectes de descontaminació, en els que la bioremediació s'ha emprat en menys del 25% dels casos, tot i que sovint quan s'ha empleat els resultats han estat majors del que inicialment s'havia esperat.

Possiblement en el futur l'ús de la bioremediació augmentarà donat que és una tecnologia econòmicament competitiva. A més a més, en molts casos és una tècnica més respectuosa amb el medi que altres tecnologies com els tractaments físico-químics o el transport cap abocador del material contaminat. D'altra banda el factor temps també és molt important per al client i en aquest sentit actualment la bioremediació no és eficaç.

Santiago Ramas – IEP EUROPE S.L. Madrid.

La decisió d'aplicar una tècnica de descontaminació de sòls depèn de molts factors, tot i que existeixen unes poques variables que són fonamentals a l'hora de determinar el tractament a aplicar, com són el pH, la concentració, el tipus de contaminant, etc.

En general el tractament més emprat és l'excavació i transport del material cap a un abocador, però si la contaminació afecta de forma molt extensa a aquífers aquesta solució no és rentable. A més a més, aquesta solució no és sostenible a llarg termini. En altres països, com el Regne Unit, s'han aplicat mesures per reduir l'excavació i transport de sòls contaminats cap a abocadors augmentant l'impost que s'ha de pagar per l'ús de l'abocador i reduint per tant la rendibilitat d'aquesta operació. A Espanya encara no estem en aquesta situació, per tant encara és rentable per als promotors de l'obra excavar i transportar el material contaminat cap a abocadors.

En vessaments que afecten a la capa superficial del sòl, semblants al que va ocórrer l'any 2.004 amb l'enfonsament del buc petroler Prestige, generalment la bioremediació és una tècnica eficient si s'empren fertilitzants oleofílics que promoguin el creixement bacterià. Alguns d'aquests fertilitzants tenen la propietat d'adherir-se al cru augmentant l'eficiència de la descontaminació.

L'aplicació de la bioremediació a Catalunya està limitada per la manca de professionals formats en l'ús d'aquesta tècnica. En general a l'Estat espanyol hi ha una manca de professionals formats en l'ús de la bioremediació, el mercat de la bioremediació augmentaria si el coneixement dels avantatges de la bioremediació estigués més estès, tant pel que fa als professionals i tècnics que han de prendre les mesures de correcció com als promotors de les obres i als titulars dels sòls contaminats.

Adolfo Andrés – DIEPROSA, SA Madrid.

El tractament dels sòls contaminats més emprat és l'excavació i transport del material contaminat cap a un abocador. Quan es decideix bioremediar un sòl el tractament més emprat segons la seva experiència professional és la bioremediació in-situ. Aquesta tècnica proporciona resultats positius i, en general, s'arriba als nivells de descontaminació desitjats. En alguns casos però no s'aconsegueixen els objectius de remediació, això succeeix quan no es coneixen prou bé les característiques de l'emplaçament o quan es donen processos durant el tractament que no estaven previstos (com la volatilització de contaminants) com a conseqüència d'un coneixement deficient del procés bioquímic de la bioremediació.

La bioremediació es dona sobretot com a fase final o segona fase de tractament de sòls contaminats, però s'aplica només en un percentatge menor del 25% dels projectes de remediació.

Al futur l'ús de la bioremediació augmentarà tal com ho ha fet en altres països europeus. L'ús d'aquesta tècnica s'està donant sobretot com a tècnica complementària d'altres tractaments in-situ i la tendència és que continuï augmentant en aquest sentit.

Carlos Alfaro – C.G.S. Madrid.

La bioremediació és una tecnologia molt eficaç quan les condicions són òptimes, però com totes les tecnologies té els seus punts forts i el seus punts febles. Totes les empreses busquen reduir els costos, això la bioremediació ho proporciona, però d'altra banda només és eficaç quan la concentració de contaminant és petita i no hi ha producte lliure en el medi contaminat.

Normalment s'empra com a segona fase en els projectes de remediació ja que sovint els processos que originen la contaminació del medi, com els vessaments, provoquen concentracions elevades de contaminant. Aplicar la

bioremediació en emplaçaments amb aquestes característiques suposa molt de temps i per tant uns costos elevats.

En comparació amb altres tecnologies, l'aspecte més positiu de la bioremediació és la seva senzillesa, especialment pel que fa a l'equip necessari per a la seva aplicació i manteniment. Tot i que en alguns casos els resultats són molt difícils de predir donada la complexitat dels processos que la dominen i aquest fet pot fer que el client es decanti cap a altres tipus de tractament

Als últims anys els usos de la bioremediació han crescut molt i en alguns casos s'han pres com exemple experiències dutes a terme als EEUU, tot i això segons la seva opinió l'ús de la bioremediació en el futur es mantindrà al nivell actual si no es troba un producte que permeti reduir el temps de tractament i tractar eficaçment la fase lliure de contaminant.

2.3.2. DIRECTORI D'EMPRESES DEDICADES A LA REMEDIACIÓ DE SÒLS.

Aquest directori es va confeccionar a partir d'empreses registrades a l'Agència de Residus de Catalunya i a la Fundació Fòrum Ambiental, a l'Anuari Acicsa 2006, així com a les bases de dades Axesor i Camerdata de la facultat d'Economia de la UB i de la Facultat d'Empresarials.

ABT INGENIERIA Y CONSULTORÍA MEDIO AMBIENTAL, S.A.

Adreça Rda. Can Fatjó, 19 A, Parc Tecnològic del Vallès Codi Postal 08290 Població CERDANYOLA DEL VALLÈS
Telèfon 93 594 21 52 Fax 93 594 20 37
Correu electrònic abt@ptv.es Responsable Medi Ambient JOSÉ LUÍS ARCO
Subsector professional CONTROL, CONSULTORIA
Vector ambiental AIGUA, SÒL

AGA-Q

Adreça Cassalañç Duran 52, local 2 SABADELL (08203)
Telèfon 93 720 63 30
E-mail aga-q@aga-q.com

AMBIENTE Y TECNOLOGÍA CONSULTORES, S.L.

Adreça París, 206, 4^o 2^a Codi Postal 08008 Població BARCELONA
Telèfon 93 415 09 90 Fax 93 237 06 27
Correu electrònic malmarcha@ecotecnologia.com Responsable Medi Ambient MANEL ALMARCHA
Subsector professional CONTROL, CONSULTORIA
Vector ambiental AIGUA,AIRE, SÒL

AMBIO, S.A.

Adreça Taquígraf Serra, 26 Codi Postal 08029 Població BARCELONA
Telèfon 93 419 49 38 Fax 93 322 82 02
Correu electrònic mwagensberg@yahoo.com Responsable Medi Ambient MAURICIO WAGENSBERG
Subsector professional CONTROL, CONSULTORIA
Vector ambiental ENERGIA,AIGUA,AIRE, SÒL, RESIDUS INDUSTRIALS, SOROLLS I OLORS

CENSA, CATALANA D'ENGINYERIA

Adreça Doctor Trueta 50-54 planta 2 (Vila Olímpica) BARCELONA (08005)
Telèfon 93 221 39 40

CEPICMA, S.A.

Adreça Independència, 64-66 Codi Postal 08225 Població TERRASSA
Telèfon 93 735 31 90 Fax 93 735 18 56
Correu electrònic --- Responsable Medi Ambient JOSEP M^a GARCÍA COLOMA
Subsector professional MAQUINÀRIA, CONSULTORIA
Vector ambiental AIGUA, SÒL, RESIDUS INDUSTRIALS

CESPA GESTIÓN DE RESIDUOS, SA

Adreça Gran Via de les Corts Catalanes, 657 BARCELONA (08010)
Telèfon 93 413 65 95

ECA Entidad Colaboradora de la Administración, SAU

Adreça Terré, 11-19 BARCELONA (08017)
Telèfon 93 253 03 30
E-mail central@ecaglobal.com Contacte: Xavier Barberà

ECOCAT, SL

Adreça: Camino Can Bros, 6 MARTORELL (08760)
Telèfon: 93 776 67 00 Fax: 93 776 65 60

ECOTEC, Ecologia Técnica, SA

Adreça Esteve Terradas 37A MANRESA
Telèfon 93 877 31 33

GEAS INTEGRAL, SL

Adreça: Ronda Santa Eulàlia, 18 PALLEJÀ (08780)
Telèfon: 93 663 30 51 Fax: 93 663 30 52
Correu electrònic: GEAS@GEAS.ES

GESTORIA AMBIENTAL G.A.

Adreça C/Deu i mata 156-158 ent 6 BARCELONA (08029)
Telèfon: 93 419 23 67

INGENIEROS Y ASESORES AMBIENTALES, SL

Adreça: C/Roselló 253, 3º 2º BARCELONA (08008)
Telèfon: 93 217 06 92 Fax: 93 415 24 87
Correu electrònic: IAP@IAPSL

LIMONIUM, SOCIETAT D'ACTUACIONS AMBIENTALS

Adreça Baix del Carme 10, bxs REUS (43205)
Telèfon 97 731 47 64

LITOCLEAN

Montenegre 14-16, BARCELONA (08029)
Telèfon 93 366 75 35
Fax 93 366 75 34
E-mail: litoclean@litoclean.es

MEDITERRA CONSULTORS AMBIENTALS, SL

Adreça Via Laietana, 47 3-2 BARCELONA (08003)
Telefon 93 481 38 52 Contacte: Jordi Boronat

RIUDEL, S.A./ HALECO

Adreça Travessia Industrial, 77 L'HOSPITALET DE LLOBREGAT (08907)
Telèfon 93 264 39 39

S.M. SISTEMAS MEDIOAMBIENTALES, S.L.

Adreça Bailèn, 234, Entl. 2on. 3^a Codi Postal 08037 Població BARCELONA

Telèfon 93 285 70 82 Fax 93 285 72 45

Correu electrònic sm@sct.ictnet.es Responsable Medi Ambient FRANCISCO GONZÁLEZ

Subsector professional CONSULTORIA, FORMACIÓ

Vector ambiental ENERGIA,AIGUA, RESIDUS INDUSTRIALS

STACHYS, S.A.

Adreça Josep Tarradellas, 97 Codi Postal 08029 Població BARCELONA

Telèfon 93 419 62 63 Fax 93 419 66 21

Correu electrònic stachys@interplanet.es Responsable Medi Ambient ALEJANDRO MARSOL

Subsector professional OBRA CIVIL, MAQUINÀRIA

Vector ambiental ENERGIA,AIGUA, SÒL, RESIDUS MUNICIPALS, ESPAIS NATURALS,
SOROLLS

TANDEM SOLUCIONS AMBIENTALS, S.L.

Adreça Avda. República Argentina, 228, baixos Codi Postal 08023 Població BARCELONA

Telèfon 93 418 19 12 Fax 93 212 53 73

Correu electrònic tandem@cetib.ictnet.es Responsable Medi Ambient JERÓNIMO GONZÁLEZ

Subsector professional CONTROL, CONSULTORIA, FORMACIÓ

Vector ambiental ENERGIA,AIGUA,AIRE, SÒL, SOROLLS, OLORS

TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE, S.A.

Adreça Mallorca, 272-276, 3er. 1^a Codi Postal 08037 Població BARCELONA

Telèfon 93 487 91 99 Fax 93 487 81 38

Correu electrònic cataluña@typsa.es Responsable Medi Ambient JOSEP MARIA RUÍZ

Subsector professional GESTIÓ, CONTROL, CONSULTORIA

Vector ambAIGUA,AIRE, SÒL, RESIDUS INDUSTRIALS, RESIDUS MUNICIPALS, SOROLLS,
OLORS

**ESTUDI D'UN CAS PRÀCTIC: LA
RECUPERACIÓ DE LES INSTAL·LACIONS DE
CLIPPER OIL, SA A LLIÇÀ DE VALL**

3.1. ANTECEDENTS.

El 20 de Novembre de 1988 es va instal·lar a Lliçà de Vall l'empresa Clipper Oil, SA sol·licitant a l'Ajuntament d'aquest municipi la Llicència Municipal per a l'activitat de tractament i envasat d'olis lubricants per a l'automoció i la indústria, activitat inclosa dins el Reglament d'activitats molestes, nocives, insalubres i perilloses del 30/11/1961.

Des d'un primer moment l'atorgament de la Llicència d'Activitats va ser denegada degut a mancances del projecte tècnic d'execució de l'activitat. El responsable de Clipper Oil, SA posteriorment acusat, entre d'altres, de delictes contra el medi ambient va eludir reiteradament els requeriments de l'Ajuntament de Lliçà de Vall d'aportar la documentació necessària per tal d'obtenir la Llicència Municipal d'Activitats. Finalment, el 5 de Novembre de 1991 tècnics de l'Ajuntament van realitzar un informe que determinava que les activitats realitzades a les instal·lacions de Clipper Oil, SA tenien deficiències importants en quant a la protecció del medi i l'Ajuntament va decidir denegar expressament la Llicència d'Activitats.

Després de dos inspeccions realitzades per tècnics municipals el 24/12/91 i el 7/1/92 es va comprovar la mala gestió dels olis emmagatzemats i l'acumulació de basses d'oli al sòl de les instal·lacions. El 31/3/92 empleats de la Junta de Residus van prendre mostres dels olis emmagatzemats i van comprovar la presència de PCB's, donant els resultats de les anàlisis valors de fins 3.827mg/Kg. Els PCB's trobats van ser del tipus Aroclor 1254 i Aroclor 1260.

El 10 d'Abril de 1992 tècnics de la Junta de Residus van precintar tres dipòsits d'oli donat l'elevat contingut de PCB's que contenien. Aquest precinte va ser trencat posteriorment pel titular de Clipper Oil, SA que va vessar el contingut fora de les instal·lacions amb l'objectiu de desfer-se'n de l'oli contaminat.

Després de varis requeriments per part de l'Ajuntament de Lliçà de Vall i de la Junta de Residus per retirar i gestionar de forma adequada els residus acumulats, el 22 d'Agost de 1994 es va adjudicar d'ofici a la Junta de Residus la gestió del terreny contaminat.

En aquest moment els contaminants ja s'havien mobilitzat cap a nivells més profunds del sòl, fins a arribar al nivell freàtic, tal com es va demostrar als sondeigs i cates realitzats per experts de la Junta de Residus l'11 de Novembre de 1993. Segons aquests treballs la contaminació tenia una longitud transversal al flux de l'aqüífer superior a 125 m. i es podien trobar al medi continguts elevats de components d'olis minerals, PCB's i Ftalats que superaven àmpliament els nivells establerts per la llei.



Imatges de les instal·lacions de Clipper Oil, SA prèvies als treballs de Sanejament. Font: Junta de Residus

Entre els efectes tòxics dels PCB's sobre la salut humana cal destacar la supressió dels sistema immunològic, danys renals, efectes carcinogènics, danys al sistema nerviós, canvis de comportament i danys al sistema reproductiu.

El problema de contaminació era greu degut a l'elevat contingut i característiques tòxiques dels contaminants, a l'afecció de l'aquífer; a la proximitat de pous d'aigua de consum humana, com el pou número 7, situat aigües amunt de les instal·lacions d'abastament del nucli urbà de Lliçà de Vall; i a la proximitat del terreny al riu Tenes, tributari de Besòs. La gravetat de la situació va establir la necessitat de dur a terme una actuació d'urgència per a confinar la contaminació.

L'any 1998 Tecnología Química y Medio Ambiente, SL va ser l'empresa adjudicatària del projecte de recuperació del subsòl, amb un pressupost de 789.156'63 €. El projecte va consistir en un confinament actiu dels terrenys contaminats. L'execució es va dividir en tres fases:

- Neteja i condicionament de l'emplaçament.
- Confinament de la zona contaminada.
- Extracció de la fase lliure de contaminant.

Així mateix, es va encarregar al Departament de Microbiologia de la Universitat de Barcelona la realització d'assaigs de tractabilitat del sòl contaminat per tal d'avaluar l'eficàcia d'aplicar un tractament de bioremediació dels contaminants confinats.

L'any 2.000 es va implantar també un pla de control i monitoreig per comprovar l'efectivitat de l'aïllament realitzat i l'evolució de la recuperació del subsòl. Al llarg del 2.002 es va fer un pla de seguiment a mig i llarg termini de l'evolució de la degradació biològica i de l'extracció de la fase lliure.

3.2. NETEJA I CONDICIONAMENT DE L'EMPLAÇAMENT.

Aquesta fase va ser realitzada al llarg de l'any 1.999 i va consistir en el desballestament de les estructures i tancs existents, la retirada dels líquids acumulats, i l'excavació i abocament controlat de la capa més superficial del sòl.

Els cinc tancs existents a l'emplaçament, amb un volum que oscil·lava entre 25 i 80 m³, estaven contaminats per PCB's i, tot i que prèviament a l'adjudicació d'aquest projecte se'ls havia retirat els líquids que contenien, es va estimar que un 10% del seu volum encara emmagatzemava residus. Es va procedir a la seva retirada i es va realitzar una descontaminació mitjançant el rentat a pressió amb agents específics i el tractament amb material absorbent. Així mateix, es va tenir que tractar un dipòsit de 75 m³ d'una bàscula present a les instal·lacions, el passadís d'accés i l'habitació de control, i una cubeta de 5 m³ que contenia restes d'aigua i olis amb un contingut de 3.500 ppm de PCB's.

Cal dir que prèviament, l'any 1994, l'Agència de Residus de Catalunya havia procedit d'ofici a la retirada d'una quantitat elevada de bidons i elements tòxics contaminats amb PCB's; en concret es van retirar 415.374Kg de residus, d'entre els quals 59.020Kg corresponien a olis i altres líquids, 93.920Kg corresponien a terres i 11.760Kg corresponien a materials variats com runa i ferralla. El cost d'aquestes operacions de retirada i eliminació de residus va ser de 390.106'98 €.



Imatge dels dipòsits i tancs presents a les instal·lacions de Clipper Oil, SA . Font: Junta de Residus

La quantitat de sòl transportat cap a abocadors va ser de 160 Tn, que corresponien als primers 25 cm de sòl. El sòl amb un contingut de PCB's inferior a 50 ppm. i amb un contingut de substàncies lipòfiles superior a 40.000 ppm. es va gestionar com a residu industrial especial i va ser transportat a una planta de tractament físico-químic. El sòl amb un contingut de PCB's inferior a 50 ppm. i un contingut de substàncies lipòfiles inferior a 40.000 ppm. es va gestionar com a residu industrial no especial i va ser transportat a l'abocador de Classe II de Palautordera.



Imatge de l'acumulació de basses d'oli i terres contaminades a les instal·lacions de Clipper Oil, SA. Font: Junta de Residus

3.3. CARACTERITZACIÓ DEL TERRENY.

Abans de començar la instal·lació de la barrera semipermeable per al confinament actiu es va fer una caracterització hidrogeològica i una caracterització de la contaminació del terreny.

Els terrenys de Clipper Oil, SA estan formats principalment per material detrític de graves, arenes i, en menor proporció, d'argiles. La profunditat màxima de sòl fins al nivell freàtic és de 4 m. L'estudi hidrològic de la zona va demostrar l'existència d'un l'aquífer lliure, amb una permeabilitat i porositat eficaç elevades i una extensió al seu pas per les instal·lacions de Clipper Oil, SA de 700 m. d'ample i 3'75 m. de gruix. El nivell freàtic presentava fluctuacions estacionals màximes de fins a 1m.

Per avaluar la contaminació es va realitzar un programa de sondeigs mitjançant la instal·lació de dos piezòmetres de 80mm. de diàmetre, un aigües amunt de la zona a confinar, amb l'objectiu d'obtenir uns valors de referència de la qualitat de les aigües, i l'altre aigües avall amb l'objectiu de caracteritzar la contaminació de la zona annexa a l'emplaçament contaminat. També es van utilitzar nou piezòmetres instal·lats anteriorment a la zona, i el pou número 7 d'abastament públic.

El mostreig del sòl va consistir en una mostra per cada sondeig dins dels primers 4m. de sòl. El mostreig in situ de les aigües subterrànies va consistir en mesures de la conductivitat, pH, oxigen dissolt i temperatura. L'anàlisi ex situ de les mostres preses va consistir en:

- | | |
|---------------------|----------------------------------|
| ▪ Sòl. | ▪ Aigua |
| - Humitat | - TPH |
| - Matèria orgànica. | - En funció de la mostra: PCB's, |
| - TPH | BTEX, DOP, PAH's i TCE. |

La zona no saturada de contaminant tenia una superfície de 2.000 m³, localitzada principalment al voltant de les instal·lacions i edificis de Clipper Oil, SA. i la majoria de contaminants es trobaven retinguts al sòl amb una mobilitat baixa. La contaminació corresponia al vessament superficial i a la migració, principalment vertical, de contaminants. El contingut màxim de contaminants trobats en aquesta zona va ser:1

- PCB's: 70'4 ppm.
- Olis i greixos: 134.000 ppm.
- TPH: 10.000 ppm

La contaminació de la zona saturada comprenia una superfície d'11.000 m², es van distingir tres zones, una situada a les instal·lacions de Clipper Oil, SA, una altra situada també a les instal·lacions, però per sota dels edificis i una tercera, situada al Sud de les instal·lacions de Clipper Oil, SA. Els valors màxims de contaminants trobats van ser:

- PCB's: 19 ppm.
- Diocetil Ftalat: 197 ppm
- Olis i greixos: 16.000 ppm.
- TPH: 20.000 ppm
- PAH: 3'52 ppm.

Es va estimar que 9.000 m² de l'aquífer estaven recoberts per una capa d'entre 1 i 2 cm. de producte lliure, que en total corresponien a entre 5 i 10 m³ de producte lliure contaminant. Es van distingir dos tipus de producte lliure, que corresponien a dos focus de contaminació diferents, un tenia el seu origen en les antigues instal·lacions de Clipper Oil, SA i l'altre tenia el seu origen en les instal·lacions adjacents. La composició del producte lliure era:

- Focus: instal·lacions de Clipper Oil.
 - PCB's: 1-50 ppm.
 - Diocetil Ftalat: 690 ppm.
- Focus: instal·lacions adjacents:
 - PCB's: menys d'1 ppb.
 - Diocetil Ftalat: 29.000 ppm

La caracterització de la contaminació present al pou número 7 d'abastament de la població de Lliçà de Vall permetre trobar valors de TPH's de 0'6 ppm, PCB's per sota d'1 ppb i traces de PAH i COV's.

3.4. CONFINAMENT DE LA ZONA CONTAMINADA.

Coneixent les característiques i extensió de la contaminació a les darreries de l'any 2.000 es va instal·lar una barrera de contenció dels contaminants al voltant del subsòl afectat amb l'objectiu d'evitar la migració del contaminant. La barrera disposava de dues portes filtrants que permetien el pas de l'aigua i la retenció dels contaminants en un llit de carbó actiu.

El material del que està constituïda la barrera és una lletada de ciment - bentonita; amb un perímetre de 400 m. va confinar una àrea de 12.000 m². El gruix correspon a l'amplada de la pala de la retroexcavadora que es va emprar per a construir-la (0'6 m) i té una profunditat de 5 m. quedant un metre de la barrera incrustada a l'estrat impermeable del subsòl.



Imatges de la construcció de la barrera impermeable.

Font: Agència de Residus de Catalunya.

La característica fonamental de la barrera és que permet el flux d'aigua subterrània des de la zona contaminada cap a l'exterior a través de les dues portes filtrants, capaces de retenir el contaminant. La seva localització es va determinar tenint en compte la direcció de l'aqüífer i la topografia de l'estrat impermeable.

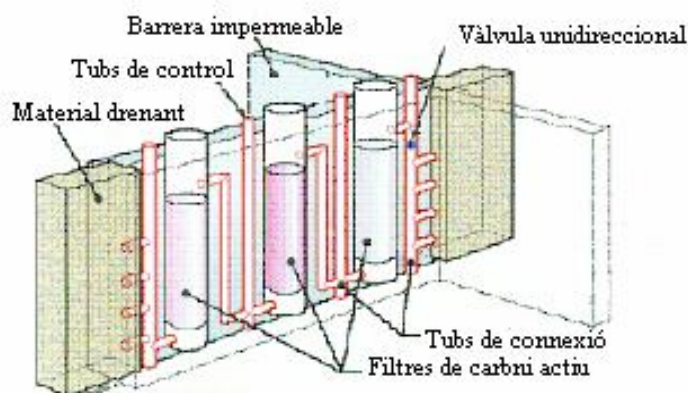


Imatges de la instal·lació de les portes filtrants.

Font: Agència de Residus de Catalunya.

Els cartutxos, de 100 litres de volum, contenen carbó actiu en gra. Tenen una alçada d'1 m. i 350 mm. de diàmetre i una capacitat de retenció de 7 Kg. de contaminant. Tenint en compte el contingut mitjà de contaminant a l'aqüífer i la quantitat d'aigua que passaria per les portes filtrants es va calcular que els cartutxos tenien un període de funcionament de 5 anys, després dels quals quedarien saturats i seria necessària la seva retirada i tractament específic i la instal·lació de nous cartutxos.

FIGURA 15_ Esquema de les portes filtrants amb els filtres de carboni actiu.⁵²



⁵² ETC-EIONET Workshop (2.003). *Visit to a remediation project on a contaminated site: Clipper-Oil (Lliçà de Vall, Barcelona)*, p. 8.

3.5. EXTRACCIÓ DE LA FASE LLIURE.

L'objectiu d'aquesta fase de recuperació va ser la retirada d'un volum d'entre 5.000 i 10.000 litres de contaminant present en fase lliure flotant sobre l'aqüífer a una profunditat d'entre 2'5 i 3m.

Es van utilitzar dos mètodes d'extracció de la fase lliure un mètode actiu mitjançant d'extracció d'aigua i oli i un mètode passiu mitjançant scimmers. En el mètode actiu el procediment utilitzat va ser l'excavació de rases en la mateixa direcció de l'aqüífer en les zones on la quantitat de producte lliure era més gran. A l'extrem de la rasa es va instal·lar un pou d'extracció dotat d'un mesurador de nivell. El funcionament discontinu de les bombes permetia que el bombeig tingués lloc únicament quan el nivell de l'aigua a l'interior del pou arribava a un nivell establert. Per a l'extracció passiva de producte lliure es van utilitzar scimmers, que basen el seu funcionament en l'adherència de l'hidrocarbur a la superfície del metall.



Imatge de l'extracció de la fase lliure.

Font: Agència de Residus de Catalunya.

3.6. BIOREMEDIACIÓ DELS TERRENYS CONTAMINATS.

L'Agència de Residus de Catalunya va encarregar a la Universitat de Barcelona la realització d'assaigs de tractabilitat del sòl contaminat de les instal·lacions de Clipper Oil, SA per tal determinar les condicions òptimes per a estimular l'activitat microbiana del sòl i avaluar la possibilitat d'implantar mesures de bioremediació sobre el terreny. Aquests assaigs van consistir en l'avaluació a escala microcosmos i mesocosmos de diferents paràmetres sobre l'activitat degradadora dels microorganismes presents al sòl. Així mateix es va realitzar un assaig a escala pilot amb l'objectiu d'avaluar l'eficàcia d'aplicar un tractament de bioventeig sobre el sòl contaminat.

3.6.1. ELS ASSAIGS DE TRACTABILITAT.

L'objectiu dels assaigs de tractabilitat va ser permetre conèixer les característiques microbiològiques, edafològiques i físico-químiques de l'emplaçament així com els factors que podien condicionar la bioremediació.

3.6.1.1. ASSAIGS A ESCALA MICROCOSMOS.

El microcosmos es va desenvolupar en tres fases: caracterització microbiològica del sòl, assaig de biodegradabilitat dels contaminants i avaluació dels paràmetres que condicionen la biodegradació.

Els resultats de la caracterització microbiològica van demostrar que el sòl contaminat contenia una flora microbiana autòctona elevada, amb una elevada activitat metabòlica.

Els assaigs de biodegradabilitat dels contaminants i els paràmetres que condicionen aquesta biodegradabilitat es van avaluar mitjançant assaigs en safates de 3 Kg. de sòl en les que es van aplicar diferents condicionants com l'addició de poblacions microbianes alòctones i nutrients; aquests assaigs van determinar una

bona biodegradació dels contaminants .Es va establir que l'addició de nutrients millorava la quantitat de producte degradat, mentre que l'addició de poblacions microbianes alòctones no millorava l'eficàcia del procés.

Donat que l'extrapolació del comportament del contaminant en un microcosmos a l'escala real pot donar lloc a errors, es van realitzar assaigs a una escala més propera a la realitat per tal de poder determinar amb més seguretat el comportament del contaminant al medi front els tractaments aplicats. Amb aquest objectiu es van dissenyar els assaigs a escala mesocosmos.

3.6.1.2. ASSAIGS A ESCALA MESOCOSMOS.

L'objectiu dels assaigs de tractabilitat a escala mesocosmos era establir els efectes de la variació de tres paràmetres (humitat, aireació i nutrients) en l'eficàcia de la biodegradació de contaminant.

La realització d'aquests assaigs es va fer mitjançant lisímetres de polietilè d'1 m. d'alçada i 0'66 m. de diàmetre. L'interior dels lisímetres es va folrar amb espuma per tal d'evitar la reducció de la circulació dels gasos en el sòl en contacte amb la paret del lisímetre. El sistema de drenatge es va situar als 5 cm. inferiors del lisímetre, mitjançant una base d'amberlita, separada del fons per una capa de geotèxtil de polipropilè. En la base del lisímetre es va col·locar una aixeta que permetia la sortida dels lixiviats.

Els punts de mostreig es van establir a 35, 55 i 75 cm. de profunditat. Es van instal·lar sistemes de presa de mostres de l'atmosfera del sòl i sensors fixes d'humitat (TDR) i de potencial redox (senyors de platí).

Es va instal·lar un tub de PVC folrat amb espuma al centre del lisímetre per a la injecció d'aire mitjançant un compressor. El tub, tancat per l'extrem inferior, estava perforat en els últims 20 cm.

Es van omplir set lisímetres amb 3.000 Kg. de sòl contaminat procedent de les instal·lacions de Clipper Oil, SA. El material va ser homogeneïtzat al propi emplaçament mitjançant una retroexcavadora. Per tal de simular les condicions originals del sòl el material no va ser tamisat i es va compactar per tal que tingués una textura semblant a l'original. En sis d'aquests lisímetres es va avaluar l'efecte de diferents paràmetres i l'últim es va utilitzar com a control. Als lisímetres 1, 2 i 3 es va afegir aigua destil·lada i al 4, 5 i 6 es van aplicar nutrients.

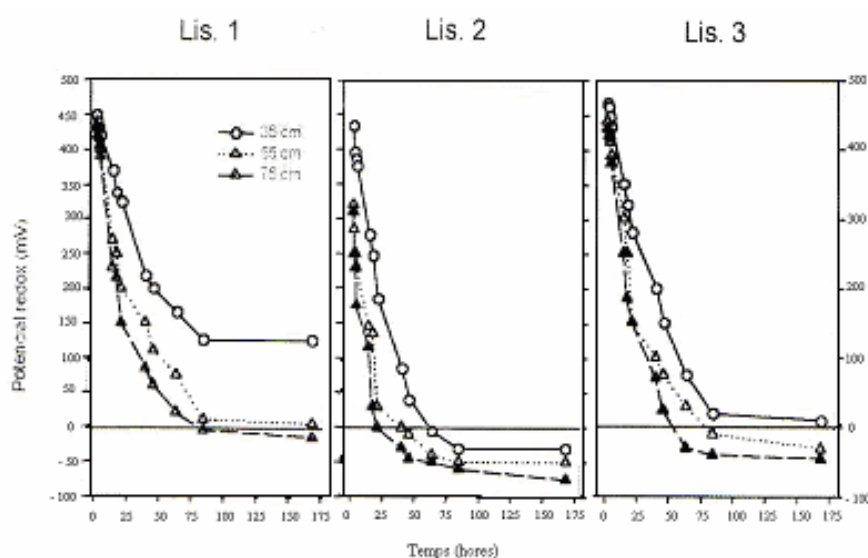
Les mostres de sòl es van prendre al primer, segon, tercer i setè mes de tractament. Es van prendre tres mostres per a cada profunditat i es van avaluar els següents paràmetres: concentració de contaminants, número de microorganismes, concentració de nutrients i concentració d'O₂ i CO₂.

Les condicions òptimes d'humitat es van establir prèviament en microcosmos de 50 g. de sòl fertilitzat amb nitrogen i fòsfor. Es va avaluar la resposta de la reducció de contaminant front a tres valors de capacitat de camp diferents (20, 40 i 60% de la capacitat de camp). En aquest assaig es va evidenciar que la biodegradació era òptima quan els valors de la capacitat de camp estaven entre el 40 i el 60% i que la bioremediació s'aturava quan la capacitat de camp era inferior al 20%.

Per establir el règim d'aireació òptim es va treballar amb els valors del potencial redox i de l'evolució de la concentració d'O₂ i CO₂ a diferents règims d'aireació. Els objectius de l'aireació eren maximitzar la concentració d'O₂ al sòl i minimitzar la pèrdua de contaminants cap a l'atmosfera degut a processos de volatilització.

Després de la injecció d'aire durant 6 h. seguides el potencial redox era similar a tots els lisímetres i profunditats, amb valors propers a 400 mV., que corresponen a un nivell elevat d'O₂ al medi. Amb el pas de les hores però el potencial redox s'anava reduint. A profunditats elevades aquesta disminució era més ràpida, arribant a valors per sota dels 0 mV. entre les 20 i 75 h. posteriors a l'aturada de la injecció d'aire.

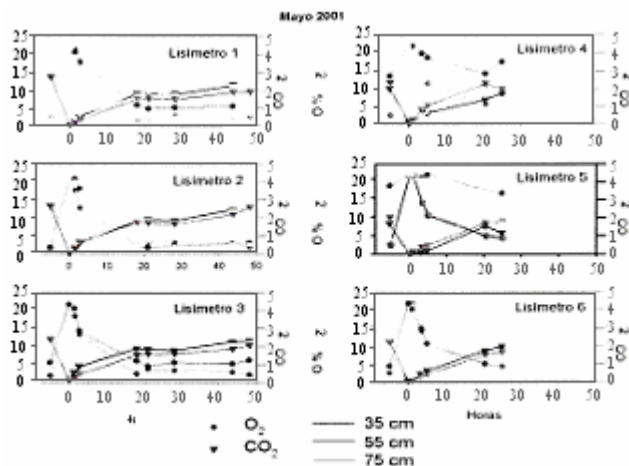
FIGURA 16_ Evolució del potencial redox (mV) a diferents profunditats després d'injectar aire durant 6 hores (temps 0).⁵³



L'anàlisi de la respirometria de les poblacions microbianes va indicar que l'activitat microbiana era molt elevada. Es va observar que en alguns casos la concentració d'oxigen es reduïa fins a valors per sota del 5% dels valors màxims (saturació d'oxigen) a les 10 h. d'haver-se aturat la injecció d'aire. Aquesta reducció d'oxigen, provocada per la respiració microbiana, tindria efectes sobre l'activitat dels microorganismes aeròbics.

⁵³ R. MARTINEZ I ALTRES. Determinación de las condiciones óptimas de bioremediación con bioventing en un suelo contaminado con aceites minerales, p. 76

FIGURA 17_ Respirometries realitzades als lisímetres a l'inici de l'experiment.⁵⁴



Tenint en compte les dades anteriors es va establir un règim d'aïreació de 10 h. diàries amb intervals entre aireacions no superiors a 4 h.

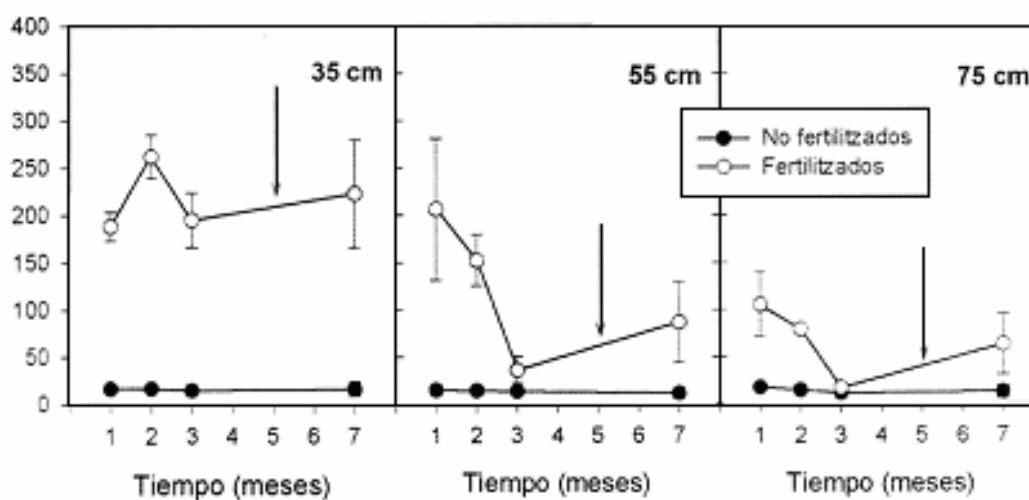
Els nutrients necessaris per al creixement bacterià són carboni, nitrogen, fòsfor, potassi, sofre, així com un nombre elevat de micronutrients. Als sòls contaminats per hidrocarburs es produeix un desequilibri en la relació C:N:P ja que els hidrocarburs suposen un aportament molt elevat de carboni (v. 1.4.1.2) Per tal de conèixer la proporció de C:N:P més adequada es va tenir en compte la composició cel·lular i el rendiment dels microorganismes degradadors del contaminant. A partir d'aquestes dades i del coneixement del contingut inicial de N i P al sòl es va ajustar el contingut de nutrients mitjançant l'addició de NH_4NO_3 i K_2HPO_4 per tal que la relació C:N:P fos 300:10:1.

Als lisímetres fertilitzats es va poder observar un contingut elevat de nitrogen que s'anava reduint a mesura que avançava el temps. Aquesta reducció era més acusada a profunditats elevades. D'altra banda, el contingut de fòsfor als lisímetres

⁵⁴ R. MARTINEZ I ALTRES. Determinación de las condiciones óptimas de bioremediación con bioventing en un suelo contaminado con aceites minerales, p. 77

no fertilitzats es va mantenir en uns nivells molt baixos en tot moment. El fet que el fòsfor no mostrés una major disponibilitat als lisímetres fertilitzats pot ser degut a la baixa solubilitat i mobilitat del fòsfor. Aquest fet planteja la dificultat d'aplicar fòsfor en el procés de bioremediació del sòl.

FIGURA 18_ Nitrogen mineral soluble als lisímetres fertilitzats i no fertilitzats a les tres profunditats estudiades. Les fletxes indiquen el moment de la segona aplicació de fertilitzant.⁵⁵



3.6.1.3. CONCLUSIONES DELS ASSAIGS DE TRACTABILITAT.

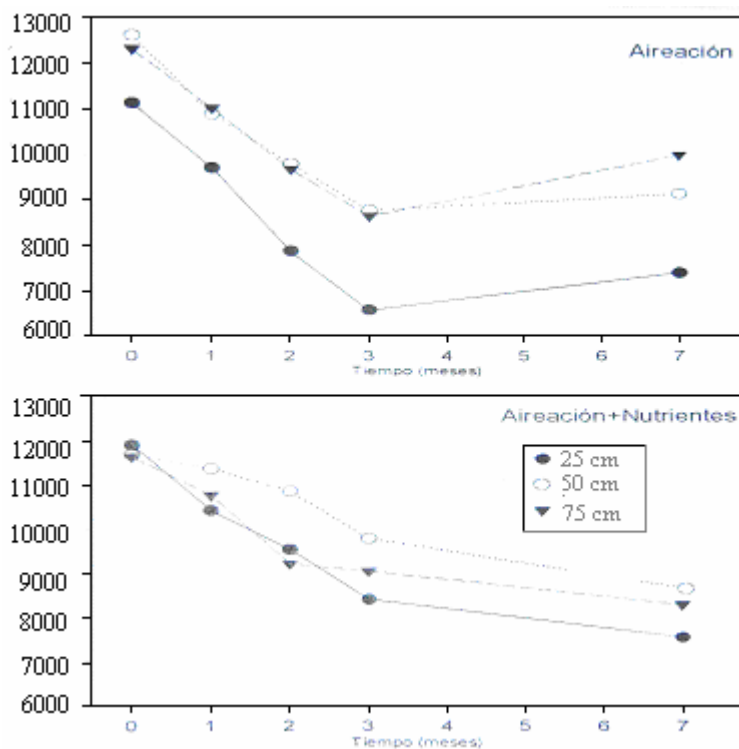
⁵⁵ R. MARTINEZ I ALTRES. Determinación de las condiciones óptimas de bioremediación con bioventing en un suelo contaminado con aceites minerales, p. 77

Inicialment el tamany de les poblacions microbianes era de 10^4 microorganismes per gram de sòl per a poblacions degradadores d'hidrocarburs i de 10^6 microorganismes per gram de sòl per a les poblacions heteròtrofes. Aquests valors van augmentar fins a 10^7 microorganismes per gram de sòl després del tractament. Per tant va succeir un enriquiment relatiu de les poblacions microbianes degradadores respecte a les poblacions heteròtrofes. Als lisímetres fertilitzats el tamany de les poblacions bacterianes va ser superior al de les presents als lisímetres no fertilitzats, tant pel que fa a les degradadores d'hidrocarburs, com a les heteròtrofes. També es va poder observar que el tamany de la població es reduïa amb la profunditat dels mostrejos.

Als lisímetres no fertilitzats, les poblacions microbianes van començar a disminuir a partir dels 2 mesos d'iniciar-se l'assaig, mentre que als lisímetres fertilitzats la tendència de les poblacions microbianes era de mantenir-se constant al llarg del temps.

L'efecte de l'aireació en la reducció de contaminants va ser molt important. En els tres primers mesos de tractament i en els nivells més superficials el contingut de TPH es va reduir fins un 33'2% en els lisímetres airejats. En els lisímetres en que es va aplicar aireació i addició de nutrients aquesta reducció va ser del 36'5%.

FIGURA 19_ Evolució de la concentració de TPH's en les profunditats estudiades als lisímetres.⁵⁶



Als lisímetres airejats la disminució de contaminant segueix una cinètica de pal de hockey, és a dir, una reducció important en una primera etapa i un estancament a la part final, mentre que als lisímetres airejats i fertilitzats el descens de contaminants succeeix durant tot el tractament al mateix ritme.

3.6.2. MESURES APLICADES SOBRE EL TERRENY.

Donada l'escassa diferència als assaigs de tractabilitat a escala mesocosmos entre el tractament del sòl amb nutrients i aireació i el tractament només amb aireació, es va decidir aplicar un tractament de bioventeig a escala al terreny sense l'addició de nutrients. Es van instal·lar dos pous d'aireació de 50 mm. de diàmetre amb una profunditat de 2'80 m. i separats entre sí 15 m. Els pous es van localitzar a la zona on es trobava la màxima concentració de contaminant.

⁵⁶ R. MARTINEZ I ALTRES. Determinación de las condiciones óptimas de bioremediación con bioventing en un suelo contaminado con aceites minerales, p. 80

Durant els 7 mesos que va durar el tractament es va injectar aire de forma continua amb un cabal mig de 25 m³/h a cada pou, aturant-se la injecció en 4 ocasions durant 5 dies cadascuna per tal de determinar les taxes d'activitat metabòlica. Durant l'assaig no es van aplicar nutrients ni aigua. Per tal d'analitzar el contingut d'olis, humitat, nutrients i poblacions microbianes es van obtenir mostres del sòl a l'inici i final de l'assaig.

L'evolució de l'activitat microbiana es va controlar mitjançant 10 sondes de gasos situades a diferents distàncies dels pous d'injecció i a diferents profunditats, en els anomenats pous de control. Un pou de control, amb 3 sondes, es va col·locar entre els 2 pous d'injecció, a una distància de 7'5 m. d'ells, 3 sondes més es van col·locar a 3m de distància d'un dels pous d'injecció, altres dos es van col·locar a 6m i dos més a 9m.

Durant els set mesos de tractament es va monitoritzar la concentració de gasos de l'atmosfera del sòl. L'evolució de la concentració de l'oxigen i del diòxid de carboni va permetre observar que les columnes d'injecció eren eficaces per al subministrament d'oxigen al medi, que inicialment era molt reduït, sobretot a profunditats superiors als 2 m.

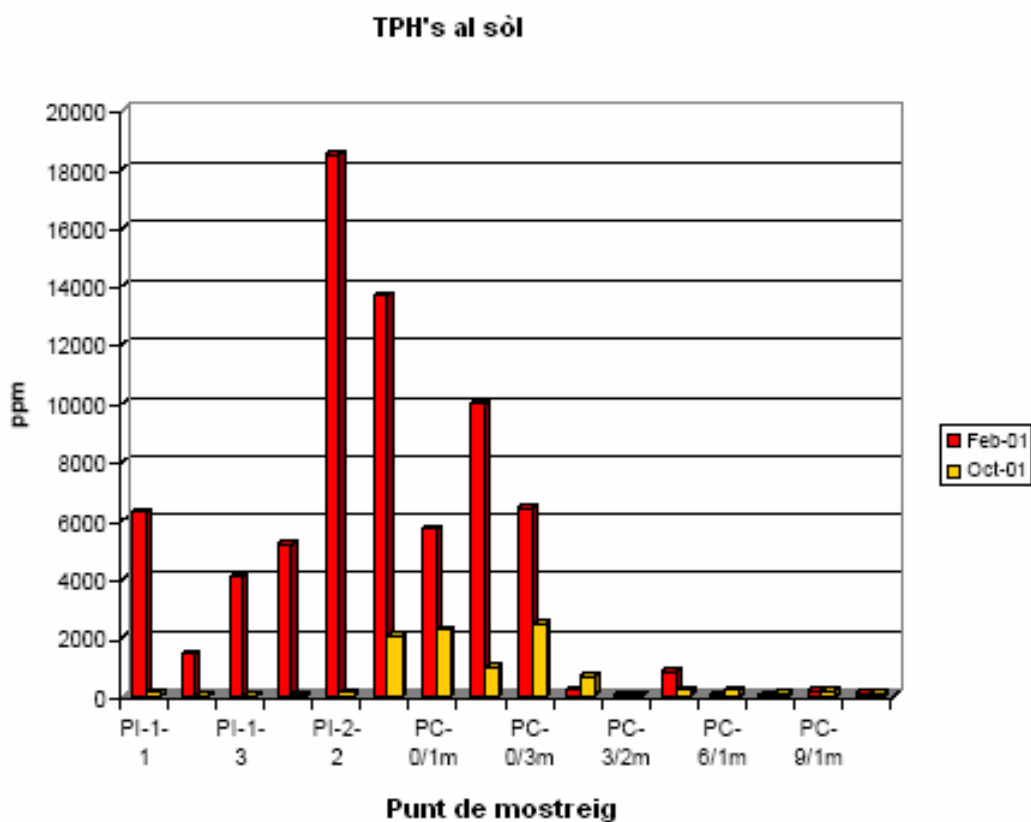
La respirometria de les poblacions microbianes es va determinar en absència d'aireació. Es va observar que la concentració d'oxigen disminuïa molt ràpidament i arribava a valors molt baixos entre els 2 i 5 dies un cop aturada l'aireació. També es va observar un augment de la concentració de diòxid de carboni a mesura que l'oxigen disminuïa. Aquest comportament és degut a l'activitat degradadora de les poblacions microbianes que consumeixen oxigen per degradar els hidrocarburs generant diòxid de carboni. La major reducció d'oxigen i producció de diòxid de carboni es va observar a les zones més contaminades.

L'anàlisi de l'evolució de l'activitat metabòlica es va realitzar a les 24 h. i als 3 i 7 mesos d'iniciar l'assaig. Es va observar que la injecció d'aire provocava inicialment una estimulació important de l'activitat metabòlica dels microorganismes i que a

mesura que passava el temps l'activitat metabòlica es reduïa. Aquest comportament està provocat per l'enriquiment relatiu dels contaminants menys biodegradables respecte als fàcilment biodegradables. D'altra banda, es va observar que l'aireació provocava un increment del tamany de les poblacions, sobretot a les zones més contaminades.

L'anàlisi del contingut de TPH's al sòl va permetre determinar l'efectivitat del bioventeig. Tal com havien permès predir els assaigs de tractabilitat a escala microcosmos i mesocosmos, l'aplicació d'oxigen al sòl proper als pous d'aireació va produir una estimulació important de l'activitat microbiològica de les poblacions presents. Molt possiblement aquestes poblacions estaven adaptades a la presència d'hidrocarburs en elevades concentracions, donat l'elevat temps que feia que aquests sòls estaven contaminats. Així, es va poder observar una reducció molt important del contingut de TPH's després dels set mesos de subministrament d'oxigen per al metabolisme microbià. Cal dir que una part d'aquesta disminució de la concentració de TPH's es va poder produir com a conseqüència de la volatilització de contaminants.

FIGURA 20_ Evolució de la concentració de TPH's durant el tractament de bioventeig a escala pilot.⁵⁷



⁵⁷ ETC-EIONET Workshop (2.003). *Visit to a remediation project on a contaminated site: Clipper-Oil (Lliçà de Vall, Barcelona)*, p. 11

4. CONCLUSIONS.

La manca d'una regulació estatal específica destinada a la protecció del sòl front a la contaminació ha creat un problema ambiental greu, que tot just comença a revelar la seva magnitud. El sòl és un medi ric i complex, amb una elevada capacitat d'autodepuració, aquest fet sovint ha fet menystenir els efectes, tant per als ecosistemes com per a la salut humana, de la seva contaminació. A més a més fins fa pocs anys no es coneixia o no es tenia en compte l'elevat cost que suposa per a la societat la remediació dels sòls contaminats. Actualment es fa evident que, com en altres impactes ambientals, és més car remediador que prevenir.

El Real Decreto 9/2005 és un instrument necessari per avaluar exactament la magnitud de la problemàtica de la contaminació de sòls a l'Estat espanyol i dirigir la seva correcció. Sota el meu punt de vista, un aspecte fonamental d'aquest reial decret és que obvia el principi d'innocència i pressuposa que tots els emplaçaments on es desenvolupen activitats que potencialment poden contaminar el sòl són sospitosos d'estar contaminats i han de demostrar el seu bon estat presentant l'Informe Preliminar de Situació.

D'altra banda, la catalogació al Registre de la Propietat d'un sòl com a contaminat té conseqüències jurídiques sobre els usos que es poden donar sobre aquest sòl i per tant, hi ha una devaluació econòmica implícita, que afavoreix la iniciativa privada per evitar els episodis de contaminació i prendre mesures per a la seva recuperació en el cas que es produeixin. Tot i això, existeixen mancances en aquest reial decret que fan pensar que haurà de ser modificat en el futur. Una mancança important és que les activitats agrícoles i ramaderes, origen d'un nombre elevat de casos de contaminació de sòls, no estan incloses a la llista d'activitats potencialment contaminants.

L'elevat grau d'industrialització de Catalunya fa que el problema de la contaminació de sòls en aquesta Comunitat Autònoma sigui més important que a d'altres. L'administració catalana, responsable del desenvolupament dels

instruments que preveu el Real Decreto 9/2005, haurà de vetllar pel compliment dels nivells legals de contaminants que preveu aquest reial i té un volum de treball important per realitzar, començant per l'inventariat dels emplaçaments contaminats i el seguiment de la seva recuperació.

La decisió de quina tecnologia aplicar en cada cas de contaminació dependrà de diferents factors entre els que es troben els objectius de remediació, la disponibilitat de temps, les característiques del contaminant i de l'emplaçament, la relació entre el cost i l'efectivitat de la tecnologia, o la seva disponibilitat al mercat de tecnologies de remediació. Sovint es deixen de banda factors importants com els costos ambientals, consum energètic i d'aigua, i els impactes ambientals, com les emissions de contaminants volàtils cap a l'atmosfera.

La bioremediació és una tecnologia que s'adapta perfectament a les directrius proposades pel Real Decreto 9/2005 i per diferents grups de treball de la Unió Europea, com Clarinet, donat que permet actuar in situ, eliminant el focus de contaminació. A més a més, és una tecnologia respectuosa amb el medi, es fonamenta en l'afavoriment dels processos que es donen de forma natural al sòl, no destrueix la seva estructura ni les seves característiques físico-químiques ni biològiques i permet una reducció important de la contaminació quan del tipus de contaminant i les característiques de l'emplaçament són les adequades.

A Catalunya hi ha diferents factors que fan que la bioremediació encara sigui una tecnologia d'aplicació minoritària, l'elevat temps necessari per a assolir els objectius de remediació es revela com el principal impediment per a la seva aplicació a les empreses consultades en aquest projecte. Així mateix, factors com el desconeixement per part de les persones responsables de la presa de decisions, la dificultat per tractar determinades substàncies com metalls pesats o barreges molt complexes de contaminants, o la incertesa del tractament, són factors amb un pes específic elevat que impedeixen en molts casos la consideració de la bioremediació com una alternativa. Sovint s'obvien els criteris exigits per la llei que prioritzen l'ús de tecnologies in situ i es busquen solucions ràpides i econòmiques, com l'excavació

del material i el seu abocament, que malauradament no sempre són solucions respectuoses amb el medi natural.

En general, la percepció de la bioremediació com a tècnica de tractament per part dels professionals encarregats de dur a terme els projectes de remediació és bona, no obstant el seu ús està frenat per la baixa competitivitat en quant al factor temps. L'Administració Pública també percep la bioremediació com una tècnica positiva que s'adapta a les directrius de sostenibilitat que s'exigeixen al Real Decreto 9/2005 i que s'aconsellen des de la Unió Europea. Per aquest motiu penso que és necessari el desenvolupament d'una política que afavoreixi la implantació de la bioremediació. Un camí possible per aconseguir aquest objectiu és incrementar el cost d'abocar, tal com s'ha fet en altres països de la Unió Europea, com Anglaterra o Bèlgica, mitjançant l'increment dels impostos i taxes que s'han de pagar per a l'ús dels abocadors.

D'altra banda, el coneixement dels processos de destrucció de contaminants durant la bioremediació, als nivells més fonamentals, no és complet. L'esforç investigador per a millorar l'eficiència dels tractaments de bioremediació, és també un aspecte molt important per al desenvolupament d'aquesta tecnologia. En aquest sentit és molt important investigar el desenvolupament de mètodes que permetin determinar l'extensió, localització i l'impacte dels canals preferents de pas de l'aire i l'aigua circulants.

Així mateix, és fonamental aprofundir en el coneixement dels processos d'humificació i retenció de contaminants a la matèria orgànica i inorgànica del sòl per tal de potenciar les possibilitats de la bioremediació en el futur. El desenvolupament de nous consorcis microbians degradadors, productes estimulants de l'activitat microbiana o surfactants que afavoreixin la biodisponibilitat dels contaminants sense malmetre el medi, és una prometedora línia d'investigació que pot proporcionar avanços molt importants en l'ús de la tecnologia de la bioremediació en el futur a curt termini.

El desconeixement de la tecnologia de bioremediació per part del món empresarial i per la societat en general contribueix al retràs del seu desenvolupament. En aquest sentit la meua opinió és que seria convenient impulsar l'ús d'aquesta tecnologia mitjançant la realització de cursos de formació, promoguts per l'Administració Pública, i dirigits especialment a les persones que tenen un paper important en la presa de decisions a les empreses de tractament de sòls.

Un altre factor que redueix l'aplicació de la bioremediació és la incertesa del tractament. Molts promotors dels treballs de descontaminació desconeixen els precedents d'aplicació de la bioremediació i opten per implantar altres tecnologies que, tot i ser ambientalment menys sostenibles, i econòmicament menys rentables s'apliquin de forma més generalitzada. Una possible solució a aquest problema seria el desenvolupament d'una memòria que inclogués tots els treballs de bioremediació fets a Catalunya, on s'exposessin les característiques del problema de contaminació, el tractament concret aplicat i els resultats obtinguts. Un objectiu més ambiciós seria el desenvolupament d'aquesta memòria a una escala major, a nivell estatal, o fins i tot a nivell europeu. Penso que aquesta recopilació d'experiències de bioremediació, tot i presentar una elevada complexitat en la seva elaboració, podria promoure de forma molt efectiva el desenvolupament del mercat d'aquesta tecnologia.

La magnitud del problema de la contaminació de sòls, fa pensar que aquest serà un impacte ambiental que trigarà molt a ser resolt. En molts casos de contaminació poden passar anys fins que el sòl recuperi el seu estat natural, fins i tot després d'haver estat remediado, i en alguns casos la recuperació no arriba mai a restaurar la complexitat original del sòl. Cal per tant una voluntat política ferma i una conscienciació de la societat per abordar aquest problema i no deixar-lo per a les generacions futures.

Vull finalitzar la redacció d'aquest projecte amb un missatge optimista. No hi ha dubte que hi ha importants avanços, político-econòmics, tècnics i científics, a desenvolupar per a que la bioremediació ocupi el lloc prioritari que li correspon dins el mercat de les tecnologies de remediació, però no hi ha dubte tampoc que els

beneficis de la substitució de determinats tipus de tractaments per la bioremediació suposa beneficis molt importants per al medi i per tant, també per a la societat. Aquests beneficis són els que han d'incentivar als diferents actors que intervenen en la gestió dels sòls contaminats, Administració Pública, en representació de la societat, sector privat i personal investigador a desenvolupar el mercat de la bioremediació a Catalunya, i són també els que, en el futur, faran que en el tractament dels contaminants del sòl, s'imposi el criteri de la sostenibilitat per sobre de qualsevol altre.

5. BIBLIOGRAFIA

A. DAVID I ALTRES. *Bioremediation of soils contaminated with industrial wastes: a report on the state-of-the-art in bioremediation*. SBR Technologies, Inc. 2003, p. **6, 7**

B. MARHO. *Bioavailability of Contaminants*; dins H.J. REHM I G. REED (Eds.). *Environmental Processes II. Soil Decontamination, Biotechnology*, Vol. 11b, 2nd Edition. Wiley-VCH, Weinheim, FRG. 2.000, p. **63, 65, 68, 81**

BIOTECHNOLOGY AND BIOLOGICAL SCIENCES RESEARCH COUNCIL (BBSRC). *A joint research council review of remediation research in UK*; 1999, p **5**
[en línia] <<http://www.bbsrc.ac.uk/tools/download/biorem/biorem.doc>>

CESPA, GESTIÓN DE RESIDUOS S.A. *Documentació tècnica de la redacció del projecte i execució de la recuperació del subsòl de les antigues instal·lacions de Clipper Oil a Lliçà de Vall*. 1998,p. **3 - 40**

CESPA, GESTIÓN DE RESIDUOS S.A. *Documentación técnica de la redacción del proyecto y ejecución de la recuperación del subsuelo de las antiguas instalaciones de Clipper Oil a Lliçà de Vall. FASE II: Trabajos complementarios y previos*. 1.988,p. **3 - 13**

C. HOLLIGER I ALTRES. *Contaminated environments in the subsurface and bioremediation: organic contaminants*, dins *Microbiology Reviews*, núm 20, 1997, p. **520**

COM (2002) 179 FINAL. *Towards a thematic strategy for soil protection*. Commission of the European Communities. Bruselas, 2002, p. **17**
[en línia]< http://europa.eu/eur-lex/en/com/pdf/2002/com2002_0179en01.pdf>

Con los pies en la Tierra: la degradación del suelo y el desarrollo sostenible en Europa. Copenhague: Agencia Europea de Medio Ambiente. 2002, p. **7**

[en línia]

<http://reports.es.eea.europa.eu/Environmental_issue_series_16/es/Spanish%20soil%20for%20the%20www.pdf>

D.C. ADRIANO I ALTRES. *Bioremediation of Contaminated Soils*, American Society of Agronomy, Inc. (Col·lecció Agronomy, num 37); 1999; p. **7 – 11**

E. BOWER I ALTRES. *Degradation of xenobiòtic compounds in situ: Capabilities and limits*; Microbiology Reviews 15; 1994, p. **316**.

FUNDACIÓ FÒRUM AMBIENTAL. *Directori i estudi del sector econòmic del medi ambient a Catalunya.* 2.000, p. **87 - 128**

[en línia]< <http://www.forumambiental.org/pdf/estudio.pdf>>

FUNDACIÓ FÒRUM AMBIENTAL. *Informe sobre el medi ambient i desenvolupament sostenible.* Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament de medi ambient i habitatge. 2.005, p. **135 - 136**

[en línia]

<http://mediambient.gencat.net/cat/ciudadans/informacio_ambiental/estat_del_medi/Catalunya2005Informesobremediambientidesenvolupamentsostenible.jsp>

Informe sobre l'evolució de l'estat del medi ambient a Catalunya . Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament de medi ambient i habitatge. 2.003, p. **298 - 302**. [en línia]< <http://www.cat-sostenible.org/publicacions.htm>>

J. E. T. VAN HYLCKAMA I D. B. JANSEN. *Bacterial Degradation of Aliphatic hydrocarbons*; Dins H.J. REHM I G. REED (Eds.). *Environmental Processes II. Soil Decontamination, Biotechnology*, Vol. 11b, 2nd Edition. Wiley-VCH, Weinheim, FRG. 2.000, p. **200**

K. T. SEMPLE I ALTRES. *Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis*; European Journal of Soil Science, 2003, n°54, p. **811**

LEY 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. *Boletín oficial del Estado*, núm 96 (22.4.1998).

LLEI 6/1993, de 15 de juliol, reguladora dels residus. *Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya*, Núm. 1776 (28.7.1993).

L.Y. YOUNG I ALTRES. *Microbial transformation and degradation of toxic organic chemicals*; Wiley-Liss, Inc; 1995, p. **77**

M. ALEXANDER. *Biodegradation and Bioremediation (second edition)*; Academic Press, 1999, p. **17, 20, 137, 327-338, 356-365**

M. KÄSTNER. "Humification" Process or Formation of Refractori Soil Organic Mater, Dins H.J. REHM I G. REED (Eds.). *Environmental Processes II. Soil Decontamination, Biotechnology*, Vol. 11b, 2nd Edition. Wiley-VCH, Weinheim, FRG, 2.000, p. **90, 94, 95**

M. P. LANFRANCONI I ALTRES. *A strain isolated from gas oil contaminated soil displays chemotaxis towards gas oil an hexadecane*, Environmental microbiology, (2003), p. **1002**.

O. ORTÍNEZ I ALTRES. *La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México*.

[en_línea]<<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/422/restauracion.html>>

P. DEBARATI I ALTRES. *Assessing microbial diversity for bioremediation and environmental restoration*; TRENDS in Biotechnology Vol.23 No.3 2005, p. **135**.

Real decreto 9/2006, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. *Boletín oficial del Estado*, núm 15 (18.1.2005).

RESOLUCIÓN de 28 de abril de 1995, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Vivienda, por la que se dispone la publicación del acuerdo del Consejo de Ministros de 17 de febrero de 1995, por el que se aprueba el Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados. *Boletín oficial del Estado*, núm 1114 (13.5.1995).

R.M. ATLAS I R. BARTHA. *Ecología microbiana i microbiología ambiental*; Pearson Educación, S.A.; 2002, p. **367**

R. MARTINEZ I ALTRES. *Determinación de las condiciones óptimas de biorremediación con bioventing en un suelo contaminado con aceites minerales*. Dins Revista Suelos Contaminados núm 74, 2.003, p. **72 – 82**

R. ROMÁN I M. CONCEPCIÓN. *Guía técnica de Atenuación Natural Monitorizada en emplazamientos contaminados. Técnicas de bioestimulación y bioaumentación para la potenciación de la biodegradación de contaminantes*; ETSEIB (UPC), 2005, p. **5** (AnnexA)

SECOND ETC-TE EIONET WORKSHOP. *Visit to a remediation project on a contaminated site: Clipper-Oil (Lliçà de Vall, Barcelona)*. 2003, p. **2 - 11**
[en línia]<<http://terrestrial.eionet.europa.eu/activities/announcements/ann1049190441/2ndEIONETws/presentations/Field%20trip%20guide>>

T.L. VOLKE. *Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo*; Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno de México; 2003, p. **6**

W. FRITSCHÉ I M. HOFRTICHTER. *Aerobic Degradation by Microorganisms*. Dins H.J. REHM I G. REED (Eds.). *Environmental Processes II. Soil Decontamination, Biotechnology*, Vol. 11b, 2nd Edition. Wiley-VCH, Weinheim, FRG, 2.000. p. **146**

Bases de Dades:

AXESOR: www.axesor.es

CAMERDATA: www.camerdata.es:8081/fr_fichero.html

ARANZADI: <http://www.bib.ub.es/cdrom/aranzadi.ica>

Pàgines Web:

AGÈNCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA: www.arc-cat.net/ca/home.asp [consulta: 9/3/2006]

INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA: www.idescat.net [consulta: 10/5/2006].

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA: www.ine.es [consulta: 10/5/2006].