

Biotecnologia ambiental. Aplicacions biotecnològiques en la millora del medi ambient

Anicet R. Blanch

Universitat de Barcelona

1

La biotecnologia i el medi ambient

El manteniment i la preservació dels recursos naturals que alhora faciliten el desenvolupament de les diverses activitats humanes en les societats desenvolupades han esdevingut un dels reptes més importants del segle XXI. Aquesta gestió del medi ambient, degudament coordinada i complementària del desenvolupament social, l'entendem i definim actualment com a sostenibilitat. Aquest nou i complex concepte econòmic, social i ecològic entorn de les relacions entre les societats i el medi ambient s'ha anat consolidant progressivament com una demanda social imperativa.

Al mateix temps, el gran desenvolupament científic i tecnològic, particularment en l'àmbit de les ciències de la vida, que s'ha donat des dels anys cinquanta del segle passat, ens ha permès aplicar principis científics i d'enginyeria a la transformació de materials per acció d'agents biològics (microorganismes,

enzims, cèl·lules d'animals o de plantes, principalment) amb la finalitat de proveir la nostra societat de béns i serveis. Actualment ens referim al conjunt d'aquests tipus d'activitats humanes amb el terme *biotecnologia*. Hi ha diferents activitats biotecnològiques que ens estan aportant noves eines metodològiques per tal de poder respondre a aquest repte d'un desenvolupament socioeconòmic sostenible, respectuós amb el medi ambient i la preservació dels recursos naturals. Així, definim la biotecnologia ambiental com el conjunt d'activitats tecnològiques que ens permeten comprendre i gestionar els sistemes biològics (principalment els sistemes microbians) en el medi ambient per tal de proveir la societat de productes i serveis.

El desenvolupament de la biotecnologia ambiental continua depenent en gran part dels avenços de diferents àrees científiques així com del coneixement dels materials, però ha anat adquirint en els darrers anys un paper destacat entre les diferents activitats de la biotecnologia. Aquest fet resulta entenedor si tenim en compte que dintre de les necessitats determinades

per la sostenibilitat hi trobem dos recursos que han esdevingut els principals reptes del segle XXI: l'aigua i l'energia.

En les nostres societats, disposar d'aigua adient que s'ajusti als diferents usos i demandes de les activitats humanes presenta de manera inherent un compromís de qualitat, que comporta sovint diferents tractaments per eliminar o mitigar riscos sanitaris i millorar les característiques organolèptiques de l'aigua. Aquest proveïment s'ha de realitzar de manera contínua i sostenible. Això comporta que cal assegurar el retorn de l'aigua usada a la natura mantenint uns nivells de qualitat sanitària i ecològica que ens permetin una protecció de la salut humana i un impacte limitat o controlat en els ecosistemes naturals. S'estima que actualment hi ha al voltant d'un 20% de la població humana que no disposa d'un proveïment d'aigua de qualitat i quasi un 40% que no disposa de sistemes de sanejament acceptables. Per tant, el subministrament i el sanejament de l'aigua tenen un protagonisme important dintre de les aplicacions biotecnològiques en el medi ambient.

Els requeriments energètics són necessaris en els diferents àmbits de les activitats humanes, tant les domèstiques com les industrials, agrícoles i ramaderes, o les relacionades amb el lleure o els serveis. La disponibilitat d'energia és una necessitat determinant per al funcionament de les societats desenvolupades. L'increment de la població mundial i una millor qualitat de vida per a un nombre més gran d'humans en el darrer segle ens han situat davant d'un escenari de crisi energètica global. Aquests dos aspectes han fet que en les darreres dècades la utilització de fonts energètiques fòssils s'hagi accelerat i, atesa la seva disponibilitat limitada i el plantejament de sostenibilitat abans indicat, ens enfrontem a un imminent repte tecnològic: la disponibilitat de fonts energètiques renovables i que veritablement resultin alternatives. La biotecnologia ambiental pot contribuir en part al desenvolupament de processos que ens permetin disposar de fonts energètiques renovables –principalment biomassa i energia solar– que hauran d'esdevenir reserves energètiques útils. Aquestes bioenergies renovables

poden ser una contribució important per alleugerir una crisi energètica global, però sobretot presenten interès perquè pretenen produir energia a partir de recursos renovables sense una emissió neta de diòxid de carboni. Els desenvolupaments de mètodes més destacables s'estan fent tot estudiant processos alternatius de producció d'electricitat.

Ara bé, les aportacions de la biotecnologia ambiental a la gestió del medi ambient tenen implicacions científiques i tecnològiques que van més enllà del proveïment de millores tecnològiques als recursos i la gestió de l'energia i l'aigua. Hi ha una estreta relació entre els avenços científics i metodològics de l'ecologia microbiana i els progressos que s'estan fent en la biotecnologia ambiental, tant des del punt de vista de les bases científiques conceptuals, els avantatges i les limitacions de les metodologies tradicionals i les noves aproximacions moleculars, com en les activitats humanes a les quals es poden aplicar els seus nous coneixements.

2

Àmbits d'actuació de la biotecnologia ambiental

Els àmbits d'actuació de la biotecnologia ambiental es relacionen amb la gestió del medi ambient i/o amb l'aprofitament dels recursos naturals. Les diferents accions es realitzen en els sistemes biològics amb un objectiu final de prevenir, mitigar o eliminar la presència de compostos contaminants en el medi ambient (Blanch, 2007). Evidentment es poden utilitzar, en certs casos, altres eines tecnològiques, com poden ser tractaments de tipus físic o químic, però hi ha un avantatge diferencial en la utilització de tractaments biològics viables, ja que aquests presenten un cost relativament més baix i comporten una menor alteració del medi ambient. El principi bàsic d'actuació dels mètodes biològics es basa en una degradació dels compostos orgànics contaminants a compostos inorgànics, que en els casos ideals resulten innocus (per exemple, CO₂, H₂O, Cl⁻, etc.). A més, aquests proces-

sos biotecnològics procuren realitzar-se en la mesura de les possibilitats al mateix lloc on s'ha produït l'impacte contaminant i s'eviten els costos associats al desplaçament del material contaminat a plantes de tractament específiques, a abocadors controlats o a altres ubicacions. Aquesta característica també resulta diferencial respecte dels procediments físics i/o químics que sovint simplement transfereixen el contaminant a una ubicació diferent per tal de mitigar i/o controlar-lo més adequadament.

Tradicionalment, les activitats biotecnològiques relacionades amb el medi ambient s'han fonamentat principalment en la capacitat degradadora dels compostos contaminants per part de l'activitat metabòlica dels microorganismes presents en els ecosistemes naturals. Aquesta necessitat d'utilitzar la biodegradació microbiana ha fet que durant molt temps l'esforç tecnològic i de recerca de la biotecnologia ambiental s'orientés cap a aïllar microorganismes del medi ambient, classificar-los i caracteritzar-los fisiològicament, analitzar-ne les capacitats enzimàtiques degradadores per desenvolupar processos tecnològicament aplicables a gran escala i intentar, en determinats casos, una millora genètica dels microorganismes utilitzats per tal d'obtenir soques més eficients en la degradació de compostos orgànics contaminants. S'ha observat que sovint els microorganismes aïllats no presenten les mateixes capacitats degradadores dels contaminants que el conjunt de poblacions microbianes tal com les trobem en el medi natural. Aquest limitat coneixement de l'ecologia microbiana i de les relacions metabòliques entre els microorganismes constituents d'aquests consorcis microbians ha fet que els considerem com "caixes negres" amb capacitats degradadores (Bragg *et al.*, 1994; Swannell *et al.*, 1996). En els darrers anys, el desenvolupament i l'adaptació de nous mètodes moleculars en els estudis d'ecologia microbiana ens han permès constatar que les poblacions microbianes del medi ambient són molt més diverses que els microorganismes aïllats i estudiats en condicions de cultiu pur al laboratori.

Tradicionalment la biotecnologia ambiental ha estat utilitzant durant molt temps l'aproximació metodolò-

gica basada a aïllar primer un microorganisme, valorar-ne la capacitat degradadora al laboratori i posteriorment intentar desenvolupar un procediment amb cultiu pur del microorganisme en la biodegradació a gran escala. Els avenços metodològics, sobretot basats en les noves tècniques moleculars, ens estan permetent fer altres aproximacions conceptuals i aplicades en els estudis de l'ecologia microbiana i la seva aplicació a la gestió dels recursos naturals.

Les noves tecnologies moleculars i l'estreta relació entre l'ecologia microbiana i la biotecnologia ambiental ens han permès un nou enfocament de l'estudi dels consorcis microbians i estendre l'àmbit de les aplicacions biotecnològiques més enllà dels processos degradadors de compostos contaminants en el medi ambient. Com a conseqüència, existeix un efecte de cooperació i sinergia entre l'ecologia microbiana i la biotecnologia ambiental. La primera proveeix els fonaments científics per al desenvolupament de processos aplicats, que són els objectius pràctics perseguits per la biotecnologia ambiental. Al mateix temps, les experiències derivades de la biotecnologia ambiental faciliten l'estudi dels ecosistemes en l'ecologia microbiana, la qual cosa comportarà continuar aportant nous avenços conceptuals i noves metodologies i tècniques que la biotecnologia ambiental podrà considerar de nou per a les seves aplicacions i que li permeten avançar conceptualment i desenvolupar noves metodologies (Rittmann, 2006). Tenim un bon exemple en la pràctica si considerem que la biotecnologia ambiental no pot considerar només la microbiota present en l'aigua, l'aire i el sòl que ens envolta per tal de desenvolupar aplicacions biotecnològiques mediambientals, sinó que també ha de tenir en compte, per exemple, les poblacions microbianes presents en el tracte gastrointestinal. Aquestes poblacions són una part del món exterior a l'interior dels animals vius, que en el cas concret de l'aigua estan en comunicació a través del cicle de l'aigua. Les noves tècniques de metagenòmica ens han permès estimar que hi ha un enorme recurs de gens i de funcions biològiques quan s'estudien aquestes poblacions microbianes i que a mesura que puguem caracteritzar-los poden esdevenir

noves eines aplicades a la gestió dels recursos naturals per part de la biotecnologia ambiental.

En els darrers anys, els estudis impartits a les escoles d'estudis empresarials i de negocis han introduït i utilitzat el concepte de la gestió dels recursos humans com una eina essencial per poder dirigir empreses i establir plans estratègics. Similarment, un dels reptes actuals de la biotecnologia ambiental i, en general, de la microbiologia és el coneixement i la gestió d'aquests recursos microbians (els gens i les seves funcions biològiques) com a eines essencials per poder gestionar els recursos naturals i per establir plans estratègics mediambientals. Aquesta nova visió de l'aprofitament de la biodiversitat microbiana dels ecosistemes per tal de proveir la nostra societat de productes i serveis biotecnològics s'anomena gestió dels recursos microbians (MRM, sigles de l'anglès *microbial resource management*) (Verstraete, 2007).

3

Diferents enfocaments metodològics aplicats per la biotecnologia ambiental

Tal com ja hem indicat anteriorment, podem diferenciar dues maneres metodològiques de realitzar els estudis en la biotecnologia ambiental:

1. Les metodologies basades en l'aïllament del microorganisme d'interès i en la caracterització de les seves funcions metabòliques a partir del seu estudi al laboratori mitjançant el seu cultiu pur. Ja hem comentat que la limitació d'aquest enfocament metodològic rau principalment en el fet que les situacions generades al laboratori i la informació que se'n deriva sota condicions de cultiu pur sovint no resulten fàcils de transferir al que ocorre en el medi natural, o fins i tot no resulta possible interpretar aquesta informació quan s'analitzen aquestes funcions metabòliques com una part de tot l'ecosistema. Però això no vol dir que hàgim de menystenir qualsevol actuació de la biotecnologia ambiental

que es basi en aquestes metodologies. Aquesta limitació és conseqüència de la complexitat dels consorcis microbians i les seves interaccions amb l'entorn.

2. Les metodologies basades en l'anàlisi del consorci microbià considerant-lo tot ell com una unitat funcional. Les aplicacions basades en aquesta aproximació conceptual poden resultar més empíriques, sobretot quan es té un desconeixement del consorci. Ara bé, en determinades circumstàncies pot resultar més pràctica. No obstant això, presenta la limitació que no detectem les estructures i/o els grups rellevants fisiològicament en el consorci i perdem possibilitats d'intervenció sobre aquests.

La combinació de totes dues aproximacions metodològiques no ha resultat fàcil fins als darrers temps. Les noves tècniques moleculars ens estan permetent explorar i començar a comprendre el funcionament d'aquesta "caixa negra" que fins ara ens resultava el consorci microbià. Un nombre important de les tècniques moleculars es fonamenta en les seqüències específiques que presenten els àcids nucleics en els éssers vius. Aquestes noves tècniques de biologia molecular ens faciliten el coneixement dels consorcis microbians *in situ*, l'avaluació de la composició i l'estructura de poblacions presents i les funcions metabòliques que realitzen, la identificació dels microorganismes rellevants en el consorci, l'aïllament d'aquests microorganismes i la manipulació o gestió dels processos desenvolupats pel consorci. Per tant, ens estem proveint de nou coneixement per a una gestió mediambiental que es pugui fonamentar millor en un sistema d'MRM. Tot i el suport que suposen aquestes tècniques d'anàlisi molecular (genòmica o metagenòmica) en poblacions microbianes ambientals, tot just hem encetat l'aprenentatge de la diversitat i la complexitat dels sistemes naturals que contenen desenes de milers de microorganismes diferents, tal com ens els trobem al tracte intestinal o en un llot actiu d'una planta depuradora d'aigües. Per això, ens cal encara identi-

ficar i comprendre quins microorganismes són essencials i com ens podem beneficiar selectivament de les seves accions metabòliques dintre d'un ecosistema en concret.

L'èxit de processos d'intervenció ambiental, basats en la utilització d'un microorganisme o d'un consorci microbià específic que ens interessin, necessita mecanismes actius per al manteniment d'aquests microorganismes i del metabolisme pel qual els hem escollit, ja que els processos naturals de selecció microbiana fàcilment desplacen aquests microorganismes del nostre interès. També s'ha plantejat la introducció de microorganismes manipulats genèticament per realitzar tasques específiques en el medi, però aquests microorganismes seleccionats de manera artificial resulten sovint molt mals competidors en entorns naturals i, a més, les aplicacions mediambientals basades en aquests tenen una baixa acceptació social. Els microorganismes manipulats genèticament sovint no poden superar els diferents condicionants ambientals per al seu creixement o fins i tot per a la seva supervivència. Actualment moltes de les aplicacions de la biotecnologia ambiental miren més de fonamentar-se en tècniques que ens permetin l'ús de soques microbianes naturals per tal de mantenir-les adequadament dintre d'un entorn natural, que no pas de generar sofisticats microorganismes manipulats genèticament per tal d'obtenir noves combinacions artificials de gens. Aquesta aplicació pràctica ens hauria de permetre estabilitzar els microorganismes autòctons del medi natural que poden realitzar la funció de biodegradació que pretenem en la nostra actuació.

4

Activitats d'interès actual en la biotecnologia ambiental

Es diferencien cinc grans àmbits d'aplicació de la biotecnologia ambiental, en què probablement veurem les contribucions més destacables durant els propers anys:

1. *El canvi climàtic.* El control de les emissions de CO₂ pel sòl així com la possibilitat de segrestar quantitats importants de carboni en el sòl mitjançant canvis significatius en les pràctiques agrícoles rutinàries poden esdevenir una de les contribucions de la biotecnologia ambiental, i en particular de la biotecnologia microbiana, a la regulació del canvi climàtic que tal vegada ens podria afectar durant les properes dècades (Rosenberg i Izaurre, 2001). Un altre aspecte relacionat amb aquest àmbit és el control o la prevenció de les emissions de metà procedent de residus, de pràctiques agrícoles i de sistemes naturals. Tot i que estan en fase d'estudi, existeixen algunes metodologies per intentar eliminar metà atmosfèric a través de bacteris metanotròfics del sòl (Boecks *et al.*, 1997; Mohanty *et al.*, 2006).
2. *Energies alternatives.* La disponibilitat de noves fonts energètiques renovables està esdevenint un dels objectius tecnològics més destacables del segle XXI, tal com hem indicat anteriorment. Cal indicar que fins ara les possibles contribucions per part de microorganismes són limitades. Moltes de les propostes s'han quedat a escala experimental de laboratori o com a molt en assaigs de planta pilot. No obstant això, no podem menystenir algunes aportacions potencials, com per exemple la síntesi d'hidrogen per part de noves soques d'arqueobacteris o la producció de l'anomenada bioelectricitat mitjançant els generadors microbians d'energia dintre d'una escala molt modesta (*microbial fuel cells*). Altres potencials fonts energètiques alternatives estan considerant la utilització del metabolisme microbià per produir gas natural (metà), etanol o hidrogen. Aquestes unitats estan basades a generar electricitat directament a partir de l'oxidació de compostos orgànics pel metabolisme bacterià (soques dels gèneres *Geobacter* o *Rhodospirillum rubrum*) en transferir els electrons a un ànode en lloc de fer-ho a un acceptor tradicional d'electrons (Lovley, 2006; Du *et al.*,

2007). També caldrà valorar en un futur els progressos de tècniques que s'aconsegueixin per tal d'augmentar el rendiment energètic a gran escala de les diferents fonts de bioenergia, principalment la síntesi de metà, etanol i hidrogen. A més, la potencial aplicació d'aquestes millores tecnològiques està supeditada al fet de si resulten econòmicament competitives respecte dels preus de mercat de les energies fòssils (petroli, gas i carbó). Les fonts de bioenergia procedeixen de la degradació de la matèria orgànica per diverses rutes del catabolisme microbiana i presenten diferents eficiències energètiques i diferents costos per la seva síntesi. Aquesta requereix habitualment tres processos tecnològics que comporten la preparació de les primeres matèries, la posterior síntesi del compost bioenergètic normalment per un procés de fermentació microbiana i finalment una sèrie de manipulacions que ens permetran obtenir el compost bioenergètic (*downstream processing*). L'eficiència i els costos associats a aquests tres processos tecnològics ens determinaran si el compost bioenergètic resulta veritablement alternatiu a altres fonts energètiques presents en el mercat.

3. *Processos de reciclatge*. El reciclatge efectiu de molts elements i compostos en els ecosistemes ens determina la sostenibilitat mediambiental de determinades activitats humanes. La comprensió de l'estructura i de les funcions dels consorcis microbians ens pot proporcionar eines per a la descontaminació de sòls i sediments, l'eliminació de contaminants en l'aire i la degradació de compostos recalcitrants procedents de diferents activitats humanes. Podem destacar en aquest àmbit la biodegradació microbiana de compostos aromàtics derivats de les activitats industrials que resulta essencial per mantenir el cicle del carboni al planeta. Molts dels processos de degradació dels compostos aromàtics s'han basat en la utilització de soques del gènere *Pseudomonas*, tot i

que no exclusivament, ja que no podem descartar l'ús d'altres grups bacterians (Díaz *et al.*, 2001).

4. *Els recursos hídrics*. L'aprofitament i la gestió optimitzada dels recursos hídrics resulten un element clau en el desenvolupament social i econòmic de les societats actuals. D'una banda, existeix una estreta relació entre el creixement econòmic i la demanda d'aigua i, de l'altra, els recursos hídrics (en termes qualitatiu i/o quantitatiu) de què es disposa no sempre poden satisfer la demanda de les nostres societats. El resultat és que la qualitat en el subministrament d'aigua potable (amb continuïtat i de manera sostenible), el sanejament de les aigües residuals (per processos eficients i de baix consum energètic) i la seva potencial regeneració estan esdevenint un repte cabdal per poder garantir aquest recurs amb la qualitat adient que requereixen les diferents activitats humanes a moltes zones del planeta amb recursos hídrics limitats o molt variables. La regeneració d'aigües és un factor ambiental estratègic a molts territoris, com per exemple en els casos de recuperació d'aqüífers, la gestió integral de conques fluvials o zones costaneres, o el proveïment de recursos hídrics alternatius a les aigües potables de subministrament per a diferents activitats industrials i de lleure (Jofre, 2007). Resulta cada vegada més important la identificació de les contaminacions de les aigües en el seu origen. Les aportacions de matèria orgànica es troben entre les contaminacions més importants que reben les aigües i, dintre d'aquesta aportació, té una proporció molt important la contaminació fecal, que hi arriba provinent principalment de les aigües residuals urbanes, els lixiviats i les escorrenties d'activitats ramaderes, d'effluents d'escorxadors i de plantes de processament i manufactura d'aliments d'origen animal. En els darrers anys s'estan fent esforços importants en el desenvolupament de metodologies per detectar l'origen de la conta-

minació fecal en les aigües superficials (detecció de l'origen microbià o *microbial source tracking*) i poder detectar, contenir i eliminar aquest tipus de contaminació fecal estretament lligat a les malalties de transmissió hídrica. Els riscos sanitaris associats deguts a la presència d'aquesta contaminació fecal resulten diferents segons si és d'origen humà o animal. Això ha fet que darrerament s'hagin proposat diferents mètodes microbiològics o químics per a la determinació de l'origen de la contaminació fecal (Blanch *et al.*, 2006). També hi ha hagut més interès per la detecció de contaminants i patògens en l'aigua per tal de determinar els riscos sanitaris i prendre mesures per controlar-los i/o eliminar-los. Això ha fet potenciar el desenvolupament de noves tècniques i tests comercials per a la detecció de patògens en aigües i per a l'anàlisi de la transferència horitzontal de gens que codifiquen per factors de virulència o per la resistència a antibiòtics.

5. *Salut i medi ambient.* El gran èxit de l'ús clínic dels antibiòtics de manera universal, sobretot als països desenvolupats, va fer que alguns analistes pensessin durant la dècada dels anys setanta del segle xx que en pocs anys aconseguiríem l'eradicació de les malalties infeccioses. Aquestes expectatives s'han quedat sense fonament en els darrers anys, ja que s'ha constatat l'aparició de soques microbianes resistents a antibiòtics per un ús intensiu o inapropiat d'aquests en la medicina humana i veterinària per al tractament i la prevenció de malalties, o bé per usar els antibiòtics com a promotors de creixement en la producció ramadera. L'ús excessiu d'antibiòtics ha donat com a resultat la selecció de resistències a alguns d'ells per part d'algunes poblacions bacterianes al tracte intestinal dels animals que s'utilitzen en la cadena alimentària humana. Això ha contribuït a l'aparició de soques de patògens resistents als antibiòtics en la medicina humana. En conseqüència, el coneixement i la gestió de les po-

blacions bacterianes intestinals –tant dels humans com dels animals relacionats amb la cadena alimentària– i d'altres poblacions microbianes extraintestinals, ja siguin simbiotes o comensals (principalment a mucoses i a l'epidermis), que estan directament o indirectament relacionades amb l'estat sanitari, estan adquirint un paper essencial. Hi ha una demanda creixent de mètodes de diagnòstic i detecció efectius i operatius (fàcil ús i baix cost), que ha esdevingut una activitat de desenvolupament important per a la biotecnologia ambiental per al control i la contenció dels patògens en la nostra societat. Els recents coneixements en aquest àmbit permeten establir nous processos actius i alternatius de prevenció i control dels agents causants de malalties. Entre aquests processos poden destacar la utilització dels autoinductors i inhibidors dels mecanismes o percepció de quòrum o *quorum sensing* bacterians (Waters i Bassler, 2005). Aquests mecanismes permeten la coordinació poblacional de l'expressió gènica relacionada amb la concentració cel·lular d'una població bacteriana. També tenim la utilització dels bacteriòfags per al control de patògens emergents o com a alternativa a les resistències als antibiòtics i també com a organismes model per validar processos de depuració d'aigües residuals o processos d'higienització de llots de depuradora o de sòls contaminats per microorganismes. Cal afegir que l'increment de la mobilitat de les persones per tot el planeta, acompanyat per una economia globalitzada que permet una mobilitat més fàcil i més recursos materials i consegüentment més microorganismes, ha facilitat l'extensió de determinades malalties infeccioses que estaven limitades territorialment i, al mateix temps, també ha contribuït a l'aparició dels anomenats patògens emergents. Ens calen noves tècniques de control dels agents infecciosos no només en l'entorn clínic o sanitari sinó també en el medi ambient.

5

Actuacions biotecnològiques ambientals a Catalunya

Hi ha diferents àmbits en els quals es pot esperar que alguns processos biotecnològics es puguin aplicar al nostre país. No obstant això, cal ponderar-los segons l'eficiència (i, per tant, la competitivitat econòmica) de la seva aplicació davant d'altres instruments de gestió ambiental.

5.1

Actuacions potencials sobre el canvi climàtic

Les possibles intervencions significatives a través de la biotecnologia ambiental que poguessin modificar qualsevol efecte del clima al nostre país resulten pràcticament i econòmicament poc probables, si podem dir que existeixen. En l'*Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*, elaborat pel Servei Meteorològic de Catalunya i amb el suport de l'Institut d'Estudis Catalans (Llebot *et al.*, 2005), es considera oportú valorar els impactes i els instruments de gestió vinculats a l'adaptació i la mitigació de les emissions causants de l'escalfament global. Els instruments que es plantejen estan relacionats amb la modificació d'algunes pràctiques en el sector energètic, en les infraestructures, el transport i el medi urbà; amb canvis en algunes activitats industrials, agrícoles i ramaderes, i amb l'eliminació de residus, la gestió dels sòls i dels recursos hídrics. Per tant, algunes de les aportacions sobre el canvi climàtic que es poden fer des de la biotecnologia ambiental estan més relacionades amb els altres àmbits d'actuació que es comenten a continuació (biodegradació de residus, recursos hídrics, energies alternatives i gestió de sòls). Conseqüentment, en el millor dels casos, aquestes pràctiques biotecnològiques ambientals presenten un efecte menor i indirecte d'actuació sobre les modificacions en el clima. Per exemple, si es fa una valorització de la matèria orgànica tenint en compte la generació d'emissions de CO₂, el compostatge (procés basat en la degradació de

la matèria orgànica realitzat principalment pel metabolisme microbià) és un procés que genera menys emissions de CO₂ que els abocadors, la utilització directa de purins com a adob en els camps o les incineradores (Llebot *et al.*, 2005). Ara bé, cal avaluar els costos associats a l'aplicació indiscriminada del compostatge a qualsevol lloc del territori, ja que els costos econòmics i energètics del transport del residu ric en matèria orgànica a la planta de compostatge poden resultar negatius en un balanç final d'aquest procés. Per tant, el control de les emissions de CO₂ es basa principalment a segrestar quantitats importants de carboni del sòl o bé en el control o la prevenció de metà procedent de la degradació de la matèria orgànica derivada de diferents activitats (degradació de residus, pràctiques agrícoles o dels sistemes naturals). El segrest de carboni en el sòl està més relacionat amb accions sobre les pràctiques agrícoles i de silvicultura i amb la gestió fisicoquímica dels sòls. L'interès pel control de l'emissió de metà derivat de la degradació de la matèria orgànica està més relacionat, en el nostre context, amb l'aprofitament energètic (sistemes de cogeneració) del biogàs, principalment en els digestors anaerobis de llots procedents del tractament biològic d'aigües residuals. L'aplicació de les metodologies en desenvolupament que pretenen eliminar metà atmosfèric mitjançant bacteris metanotròfics del sòl comporta una complexitat important i encara estan lluny de ser considerades biotecnologies efectives i aplicables a gran escala per a aquest objectiu.

5.2

Actuacions en la cerca d'energies alternatives

La contribució realitzada amb processos biotecnològics que s'han desenvolupat per aportar noves fonts d'energia renovable és molt modesta tant a Catalunya com al conjunt de l'Estat. En diversos estudis que analitzen el potencial de les diferents tecnologies renovables a Espanya (Maure i Baras, 2010) les úniques energies renovables basades en processos biotecnològics són la producció de biogàs i d'etanol. Els consums d'energia primària que s'estimen per a Catalu-

Quadre 1

Consum d'energia primària estimada per l'any 2015 segons el Pla de l'energia 2006-2015 (revisió 2009)		
Font d'energia renovable	Pla de l'energia 2006-2015 (Revisió 2009)	
	ktep	%
Solar	358,9	13,28
Solar tèrmica	111,7	4,13
Solar fotovoltaica	57,9	2,14
Solar termoelèctrica	189,3	7,00
Eòlica	698,4	25,83
Hidràulica	504,3	18,65
Biomassa forestal i agrícola	306,6	11,34
Biogàs	205,6	7,61
Bioetanol	93,9	3,47
Biodièsel	348,0	12,87
Altres residus renovables	187,7	6,94
Total	2.703,40	

ktep: kilotona equivalent de petroli.

Font: Departament d'Economia i Finances de la Generalitat de Catalunya.

nya l'any 2015 (Pla de l'energia 2006-2015, revisió 2009) respecte d'aquestes dues energies basades en biotecnologies resulten ser les aportacions menors a les altres energies renovables i són inferiors als que resulten del conjunt dels diferents tipus d'energia solar (quadre 1). Aquests consums estimats són 205,6 ktep per al biogàs i 93,9 ktep per al bioetanol.

El biogàs és un gas amb un alt contingut de metà que prové de la conversió de biomassa residual humida mitjançant un procés de digestió (fermentació) anaeròbia per un consorci microbià complex. Una aplicació d'aquest procediment a Catalunya són els digestors anaerobis de llots de les plantes de tractament d'aigües residuals, on s'aconsegueix reduir el volum de llots de depuració i generar biogàs, que en algunes plantes s'aprofita en processos de cogeneració elèctrica. El bioetanol procedeix d'un procés biotecnològic que comprèn 3 fases. En la primera es prepara la matèria primera (sucre de la remolatxa, sucre de canya, midó, cel·lulosa, residus i subproductes, etc.) rica en hidrats de carboni mitjançant tractaments químics o enzimàtics que facilitin la mobilització (hidròlisi) dels hidrats de carboni de manera que puguin ser metabolitzats posteriorment pels microorganismes. La

segona fase consisteix en un procés de fermentació alcohòlica, habitualment realitzat amb llevats, que transforma els sucres mobilitzats en etanol. Finalment, cal recuperar l'etanol produït per un procés de destil·lació. Aquest bioetanol serà llavors utilitzat com a combustible.

S'ha considerat durant molt temps la possibilitat de trobar mecanismes de fabricació de biocarburants a partir del creixement de microalgues aprofitant la fotosíntesi, que els permet la fixació de CO₂ atmosfèric en biomassa verda. S'ha plantejat utilitzar el cultiu d'aquestes microalgues per produir biodièsel basat en l'alt contingut de lípids que poden arribar a acumular. Actualment no podem considerar-ho una alternativa d'energia renovable a partir del coneixement i els estudis que s'han fet. Per tant, no es disposa d'una tecnologia eficient per tal d'aconseguir aquest objectiu, tot i que hi ha qui estima que en un futur tal vegada podrien contribuir a les estratègies d'emissió zero de CO₂ i es considera el procés de captació de CO₂ que es dona per la fotosíntesi.

Finalment, cal indicar que la biomassa, com a aprofitament de residus agrícoles i forestals, i el biodièsel, tot i que es consideren biocombustibles, no es poden associar a una activitat biotecnològica, atès que no es realitzen per processos de fermentació o digestió microbiana. Aquestes bioenergies es fonamenten en processos de conversió termoquímica (piròlisi, gasificació, combustió) o de transesterificació (biodièsel).

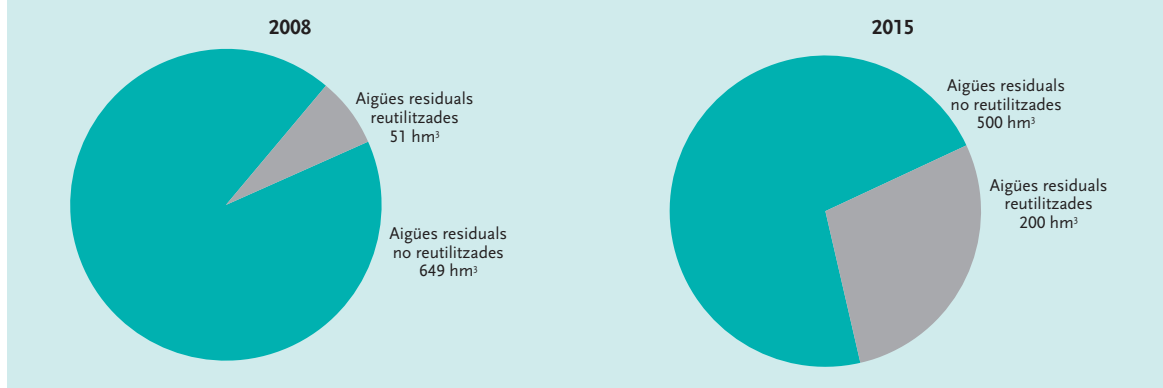
5.3

Actuacions sobre els recursos hídrics

La contribució de la gestió de l'aigua al PIB de Catalunya és més important del que hom podria pensar. En estudis sobre la indústria de l'aigua a l'àrea metropolitana de Barcelona (AMB) s'estima que el sector té unes 550 empreses que representen entre un 20% i un 22% del total de les empreses del sector a l'Estat, que ocupen un 0,7% de la població activa de l'AMB i que generen més del 2% del PIB. A més, tot indica que el sector industrial i de serveis relacionat amb la gestió dels recursos hídrics té un bon poten-

Gràfic 1

Cabals d'aigua residual generats a les depuradores catalanes durant el 2008 i estimats pel 2015, distribuïts entre aigües no reutilitzades i reutilitzades



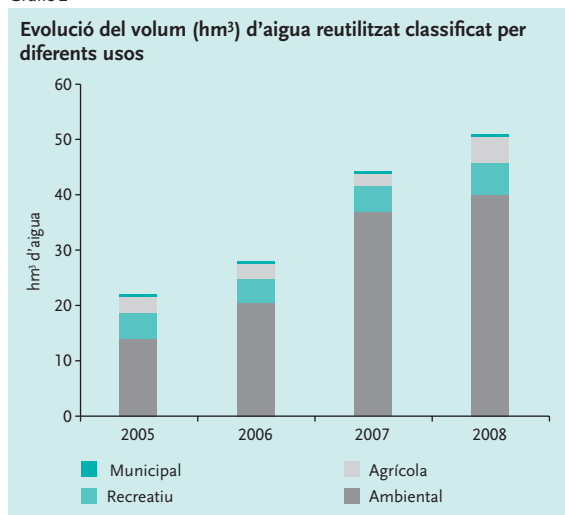
Font: programa de reutilització d'aigües a Catalunya. Juny 2009. Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya.

cial de creixement tant en el mercat nacional com en l'internacional (Jofre, 2007).

La limitació de recursos hídrics i l'ordenació del territori, juntament amb la distribució de la població, fan que ens trobem amb dues situacions antagòniques en la manera en què es fa servir l'aigua a Catalunya: les conques de l'Ebre concentren les zones de regadiu amb una menor incidència en el consum domèstic urbà i industrial, i a les conques internes, on hi ha el 92% de la població i una part important de l'activitat industrial, aquest efecte és encara més accentuat si considerem la situació generada a l'AMB (Armengol i Dolz, 2009). Aquesta realitat condiona significativament la política hidràulica a Catalunya i hem hagut d'anar identificant mesures per poder corregir aquest antagonisme i, al mateix temps, gestionar apropiadament els recursos hídrics. Entre aquestes mesures, hi trobem una moderació del consum domiciliari, industrial i sobretot agrícola de l'aigua. L'actitud més conscient dels ciutadans en temes mediambientals relacionats amb les reserves d'aigua s'ha vist incrementada després de la situació crítica de les reserves disponibles l'estiu de 2008 a Catalunya. Això ha fet que una altra mesura d'aprofitament dels recursos hídrics, com és la reutilització d'aigües (aigua regenerada), s'hagi anat fent més

popular i hagi augmentat actualment la seva acceptació social. Anomenem *aigua regenerada* aquella aigua residual que s'ha depurat fins a un nivell de tractament secundari (degradació de la matèria orgànica biodegradable per l'activitat del metabolisme microbià) i que a continuació rep un tractament addicional per tal de poder-la fer apta per a moltes activitats humanes, tot i que no es pot considerar habitualment per al seu ús com a aigua potable. En els diversos tractaments de les aigües residuals i regenerades, hi participen diferents processos biotecnològics. El disseny i la validació d'aquests processos, així com el desenvolupament de tècniques d'anàlisi i detecció dels indicadors microbians i patògens per assegurar la qualitat i seguretat sanitària d'aquest nou recurs hídric, són activitats biotecnològiques ambientals de màxim interès i prioritat en el sector. No obstant això, encara no podem considerar que la reutilització d'aigües residuals regenerades sigui una activitat econòmica consolidada i important dintre de la gestió dels recursos hídrics del nostre país. Ara bé, les estimacions fetes per l'Agència Catalana de l'Aigua en el Programa de reutilització d'aigua a Catalunya (ACA 2009) ens indiquen que l'ús d'aquest nou recurs hídric va creixent i s'espera que arribem a un aprofitament del 31% de les nostres aigües re-

Gràfic 2



Font: Agència Catalana de l'Aigua. Generalitat de Catalunya.

siduals l'any 2015 (gràfic 1); per tant, cal esperar un increment d'activitats de la biotecnologia ambiental en aquest àmbit. És important destacar que aquest increment del volum d'aigua regenerada de diferents

qualitats s'ha donat més destacadament en els darrers anys pels diferents usos dels sectors agrícola i ambiental (gràfic 2), que reuneixen algunes de les demandes més grans (reg i recuperació de recursos hídrics naturals, respectivament).

És important destacar la tecnologia, el coneixement i l'aplicació pràctica de les aigües residuals que ja s'està fent al nostre país des de fa uns anys. En tenim el millor exemple en el programa i les actualitzacions de reutilització que està fent el Consorci Costa Brava (www.ccbgi.org). S'han realitzat progressos significatius en el desenvolupament de processos de regeneració d'aigües residuals, en el seu control de qualitat i en els sistemes de distribució, que han anat incrementant no només els cabals tractats i disponibles sinó també l'àmbit municipal de prestació d'aquests recursos (quadre 2). Si les expectatives indicades per l'Agència Catalana de l'Aigua es compleixen i s'estén l'experiència del Consorci Costa Brava a la resta del territori català, cal esperar una forta contribució de la biotecnologia ambiental a aquesta activitat creixent del sector.

Quadre 2

Cabals tractats en milers de m³																						
Any	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	
Blanes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	222	3.199	3.298	3.634	3.155	2.830	2.127	2.402	
Cadaqués	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	19	15	15	14	30	6	6	6	
Castell - Platja d'Aro	40	146	280	248	289	152	198	217	194	231	1.071	1.198	1.292	1.212	1.045	899	944	982	868	780	1.018	
Colera	-	-	-	-	-	-	-	-	3	16	10	10	15	9	13	19	23	16	4	9	3	
El Port de la Selva	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	12	7	36	65	96	58	69	53	
Empuriabrava - Pitch & Putt Castelló d'E.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	14	10	9	25	
Empuriabrava - PNAE	-	-	-	-	-	-	-	-	442	511	527	536	557	745	467	439	903	661	948	1.018	1.032	
Llançà	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39	87
Lloret de Mar	-	-	-	-	-	44	103	77	106	101	101	95	75	53	74	64	58	54	64	252	492	
Palamós	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	3	11	4	4	
Pals	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	122	254	207	264	270	240	263	281	440	456	
Portbou	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	7	10	12	10	7	11	9	
Roses	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	20	
Torroella de Montgrí	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	185	64	281	637	476	
Tossa de Mar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	49	49	247	222	235	163	90	104	116	
Total	40	146	280	248	289	196	301	294	745	859	1.709	2.001	2.265	2.538	5.338	5.274	6.330	5.460	5.529	6.199		

Font: Consorci Costa Brava. <<http://www.ccbgi.org/reutilitzacio.php>>

El sanejament de les aigües residuals a les plantes depuradores dona com a resultat l'aigua depurada i els fangs. Aquests es generen pels processos fisico-químics i biològics constituents del tractament de depuració a partir de la separació de la fase sòlida (matèria orgànica i inorgànica) present en les aigües depurades. Per tant, els fangs o llots de depuració (sobretot els procedents de les aigües residuals urbanes) tenen un contingut en matèria orgànica, nitrogen i fòsfor que fa que siguin adients, després de processos d'higienització, per utilitzar-los com a adob agrícola, fabricació de compost, restauració de pedreres i recuperació de sòls, o fins i tot com a material per a la construcció. Cal indicar que aquests llots també poden derivar cap a una valorització energètica (combustió a cimenteres, com a exemple més destacable a Catalunya). La producció anual de llots de depuradora s'ha vist incrementada des de la implantació de les normatives europees de tractament d'aigües residuals urbanes (Directiva 91/271/CEE) i la normativa (Directiva 2000/60/CE) per la qual s'estableix un marc comunitari d'actuació en l'àmbit de la política d'aigües, adreçada a la protecció de les aigües i que pretén aconseguir abans de l'any 2015 un bon estat de les masses d'aigua superficials, mitjançant el desenvolupament de mesures de protecció, millora i regeneració d'aquestes masses. Aquest volum de llots se situa en els darrers anys lleugerament per sota de les 600.000 tones (quadre 3) i es preveu que s'arribarà, al final del termini de vigència del programa de fangs, a 624.700 tones/any (ACA, 2010).

Hi ha diferents processos biotecnològics implicats en alguns tipus de tractament i higienització d'aquests llots, que són els més habituals al nostre territori, el compostatge i les digestions microbianes en condicions aeròbies i anaeròbies. Deixant de banda l'eficiència, els avantatges i les limitacions de cadascun d'aquests processos es fonamenten en el fet que l'activitat metabòlica de consorcis microbians realitza una reducció de la massa i una higienització de llots (eliminació de patògens i els seus indicadors microbians), per tal de facilitar una seguretat sanitària en

els usos posteriors que se'n puguin fer o bé una disminució de la massa que s'haurà de gestionar com a residu. Les aplicacions dels fangs tractats que s'estan realitzant són principalment l'ús en les pràctiques agrícoles i de jardineria, el dipòsit (abocament) controlat, la valorització energètica (combustió a cimenteres) i la restauració de pedreres (quadre 3). Per tant, la biotecnologia ambiental també té un camp d'actuació molt important en el desenvolupament de processos de tractament dels llots, la seva validació, el control i el seguiment de la qualitat sanitària d'aquest subproducte o residu final. La biotecnologia que es desenvolupi i s'apliqui a casa nostra per a la gestió dels fangs té un mercat potencial actual i creixent dintre de la Unió Europea, on s'estima que com a mínim estarem generant un total de 12.884.000 tones de llots (pes sec)/any el 2020 (quadre 4) entre tots els països membres (Gendebien, 2009).

Cal no oblidar que, a més dels fangs procedents dels tractaments biotecnològics de depuradores d'aigües residuals urbanes, s'estima que a Catalunya es generen 6.939.243 tones/any de fems i 12.507.217 m³/any de purins. Actualment aquests residus orgànics tenen dues destinacions principals: l'adob dels conreus i el tractament a centres de recollida i processament dels excedents (Llebot *et al.*, 2005). Per tant, també aquí trobem l'aplicació de processos biotecnològics de manera similar als fangs de depuradora.

5.4

Actuacions de bioremediació de sòls contaminats

S'ha estimat que la contaminació de sòls per hidrocarburs del petroli i els seus derivats a indrets potencialment contaminats a Catalunya l'any 2007 era d'un 48,7% respecte al total de contaminació (Solanas *et al.*, 2009). La biotecnologia ambiental també ens ofereix processos per realitzar diferents tipus de tractaments d'aquests sòls.

Un d'aquests tractaments de sòls contaminats és la bioremediació. Aquesta tecnologia es fonamenta

Quadre 3

Evolució de les dades de la producció (t MF: tones de fang) i de la gestió dels fangs de les aigües residuals depurades				
	2005	2006	2007	2008
Producció de fang deshidratat a la sortida de les estacions depuradores d'aigua residual (t MF)				
Tractats	490.629	520.561	563.659	563.154
No tractats	48.724	26.727	29.931	21.435
Total fang generat	539.353	547.288	593.590	584.589
Distribució dels tractaments del fang (t MF)				
Compostatge	179.272	203.165	298.126	287.475
Assecatges tèrmics	202.732	182.380	109.624	123.404
Digestions aeròbics/anaeròbics	108.625	135.016	141.609	137.610
Altres			14.300	14.665
Total fang tractat	490.629	520.561	563.659	563.154
Destinació final del fang tractat (t MF)				
Agricultura i jardineria	272.124	332.489	427.417	421.496
Dipòsits controlats	70.509	45.703	42.834	24.170
Valorització energètica (cimentera)	23.765	9.703	7.767	15.738
Restauració pedreres		527	677	
Total eliminat	366.398	388.422	478.695	461.404

Font: Agència Catalana de l'Aigua. Generalitat de Catalunya.

Quadre 4

Producció (tones de pes sec) de llots de depuradora dels països membres de la UE estimada al llarg dels anys					
	1995	2000	2005	2010	2020
Alemanya	2.248.647	2.297.460	2.059.351	2.000.000	2.000.000
Regne Unit	1.120.000	1.066.176	1.544.919	1.640.000	1.640.000
França	750.000	855.000	910.255	1.600.000	1.600.000
Itàlia	609.256	850.504	1.070.080	1.500.000	1.500.000
Espanya	685.669	853.482	1.064.972	1.280.000	1.280.000
Polònia	340.040	397.216	523.674	520.000	950.000
Holanda	550.000	550.000	550.000	560.000	560.000
Romania	–	–	137.145	165.000	520.000
Resta*	1.528.989	1.718.478	2.167.190	2.711.000	3.354.000
Total 27 estats	7.832.601	8.588.316	9.890.441	11.811.000	12.884.000

* 15 estats membres els anys 1995 i 2000.

Font: *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Draft Summary Report 2. Baseline scenario, Analysis of risk and opportunities.* Milieu Ltd. & RPA for the EU Commission, 2009.

en l'ús de l'activitat dels microorganismes per desintoxicar o eliminar contaminants del medi. Aquesta biotecnologia ens permet la transformació dels contaminants en productes innocus, habitualment mitjançant l'activitat enzimàtica microbiana. Per tant,

el procés comporta una solució definitiva del problema, ja que no genera un residu final, com pot passar en altres tipus de tractaments. També es busca que tingui un cost baix en la seva aplicació i esdevingui, per tant, un avantatge addicional. La biodegradació

microbiana dels contaminants està condicionada per factors relacionats amb el tipus de contaminant i amb les condicions ambientals de l'emplaçament (Solanas *et al.*, 2009). Conseqüentment, si podem identificar aquests factors, podrem aplicar una estratègia d'MRM, realitzar una gestió de les poblacions microbianes presents i augmentar l'eficiència de la biodegradació. Aquests processos microbians es poden realitzar *in situ*, on s'ha produït la contaminació del sòl (sense excavació ni trasllat del sòl), o *ex situ* (amb excavació i trasllat del sòl). No obstant això, cal caracteritzar l'emplaçament, fer assaig de tractament de mostres del sòl contaminat al laboratori i finalment fer assaigs pilot, abans d'aplicar el tractament a gran escala en el medi natural contaminat. També caldrà realitzar un seguiment quantificat per diferents paràmetres del desenvolupament efectiu del procés de descontaminació, per tal d'assegurar-nos que s'està produint adequadament segons el que teníem establert.

Tenim dos exemples ben documentats al nostre territori. Un d'ells és la descontaminació de sòls contaminats per olis minerals a Lliçà de Vall, on es va aplicar un procés de remediació dirigida per bioestimulació (condicionar els factors ambientals per potenciar l'activitat dels microorganismes autòctons del mateix sòl) amb les poblacions microbianes presents. La contaminació dels hidrocarburs presents es reduí fins al 51% al cap de 3 mesos, fins al 60% al cap de 6 mesos i fins al 79% al cap de 12 mesos (Solanas *et al.*, 2009).

L'altre exemple és una prova pilot de bioremediació sobre un sòl contaminat per creosota a Callús. La creosota està formada per una barreja d'hidrocarburs aromàtics policíclics (HAP) dels quals es coneix la toxicitat. En aquest cas la tecnologia utilitzada fou una bioremediació per biopila dinàmica (Viñas, 2005). Aquest procediment permet la gestió de diferents factors. En els assaigs pilot, que van durar 6 mesos, es van poder mantenir l'airejament, la humitat òptima mitjançant el volteig de la terra i el reg amb aigua. Es van aconseguir unes degradacions entre el 96% i el 100% per als HAP de tres

anells i del 46% i el 76% per als HAP de quatre i cinc anells.

La contaminació per nitrats de les aigües subterrànies deguda a les aportacions excessives d'aquests als sòls, principalment per l'aplicació incontrolada de purins, és un altre àmbit d'actuació per als processos biotecnològics. S'han fet assaigs utilitzant processos fonamentats en la desnitrificació bacteriana per tal d'eliminar nitrats de les aigües subterrànies contaminades (Solanas, 2007).

6

Consideracions finals

En les darreres dècades, la biotecnologia ambiental ens està proporcionant noves eines metodològiques per a una gestió sostenible dels recursos naturals i del medi ambient, i conseqüentment ens facilita al mateix temps una millora global de la qualitat de vida. Tot això ha estat possible a partir d'una anàlisi més interdisciplinària de l'entorn natural, que ha estat facilitada pels nous coneixements provinents de diferents camps científics però molt especialment de l'ecologia microbiana i de les noves tècniques moleculars de genòmica, proteòmica i metabolòmica. L'ús combinat d'aquestes disciplines ens està aportant nous coneixements sobre la composició i les funcions dels consorcis microbians presents en els ecosistemes naturals i, per tant, ens permet desenvolupar noves aplicacions biotecnològiques en el control dels contaminants, la regulació del cicle dels elements, la gestió dels recursos hídrics i energètics i la millora de la situació sanitària.

7

Bibliografia

ACA (2009). *Programa de reutilització d'aigua a Catalunya*. Agència Catalana de l'Aigua, juny. Generalitat de Catalunya, pàg. 75.

- ACA (2010). *Programa d'actuacions per a la gestió dels fangs residuals generats en els processos de depuració d'aigües residuals urbanes de Catalunya*. Agència Catalana de l'Aigua, juny. Generalitat de Catalunya, pàg. 120.
- ARMENGOL, J.; DOLZ, J. (2009). "L'abastament d'aigua a Catalunya i la seva garantia. Generalitat de Catalunya". *Monogràfic. Aigua i activitat econòmica*. Nota d'economia 93-94, pàg. 127-139.
- BLANCH, A.R. (2007). "Biotecnologia i medi ambient". A: Puigdomènech, P.; Gòdia, R. (ed.). *Les biotecnologies*. Treballs de la Societat Catalana de Biologia 58, pàg. 175-186.
- BLANCH, A.R.; BELANCHE-MUNOZ, L.; BONJOCH, X.; EBDON, J.; GANTZER, C.; LUCENA, F.; OTTOSON, J.; KOURTIS, C.; IVERSEN, A.; KUHN, I.; MOCE, L.; MUNIE-SA, M.; SCHWARTZBROD, J.; SKRABER, S.; PAPAGEORGIOU, G.T.; TAYLOR, H.; WALLIS, J.; JOFRE, J. (2006). "Integrated analysis of established and novel microbial and chemical methods for microbial source tracking". *Appl. Environ. Microbiol.* 72, pàg. 5915-5926.
- BOECKS, P.; VAN CLEEMPUT, O.; VILLARALVO, I. (1997). "Methane oxidation in soils with different textures and land use". *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49, pàg. 91-95.
- BRAGG, J.R.; PRINCE, R.C.; HARNER, E.J.; ATLAS, R.M. (1994). "Effectiveness of bioremediation for the Exxon Valdez oil spill". *Nature* 368, pàg. 413-418.
- DÍAZ, E.; FERNÁNDEZ, A.; PRIETO, M.A.; GARCÍA, J.L. (2001). "Biodegradation of aromatic compounds by *Escherichia coli*". *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 65, pàg. 523-569.
- DU, Z.; LI, H.; GU, T. (2007). "A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy". *Biotechnol. Advances* 25, pàg. 464-482.
- GENDEBIEN, A. (2009). *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Draft Summary Report 2. Baseline scenario, Analysis of risk and opportunities*. Milieu Ltd. & RPA for the EU Commission.
- JOFRE, J. (2007). "Oportunitats relacionades amb el cicle integral de l'aigua per a les empreses de l'Àrea Metropolitana de Barcelona". *Pla estratègic Metropolità de Barcelona*. Barcelona. Col·lecció estratègica, núm. 5.
- LLEBOT, J.E.; JORGE-SÁNCHEZ, J.; QUERALT, A.; RODÓ, J. (2005). *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Generalitat de Catalunya. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible, Servei de Meteorologia i Institut d'Estudis Catalans, pàg. 815.
- MAURE, A.; BARAS, E. (2010). "La política energètica a Catalunya i la participació de les energies renovables". *Monogràfic. Energies renovables: present i futur*. Generalitat de Catalunya. Nota d'economia 95-96, pàg. 67-88.
- MOHANTY, S.R.; BODELIER, P.L.E.; FLORIS, V.; CONRAD, R. (2006). "Differential effects of nitrogenous fertilizers on methane-consuming microbes in rice field and forest soils". *Appl. Environ. Microbiol.* 72, pàg. 1346-1354.
- Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015*. Revisió 2009. Generalitat de Catalunya.
- RITTMANN, B.E. (2006). "Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology". *Trends Biotechnol.* 24, pàg. 261-266.
- ROSENBERG, N.J.; IZAURRALDE, R.C. (2001). *Storing Carbon in Agricultural Soils: A Multi-Purpose Environmental Strategy*. Holanda. Kluwer Academic Publishers.
- SOLANAS, A.M. (2007). "La bioremediació". A: Puig-Domènech, P.; Gòdia, R. (ed.). *Les biotecnologies*.

Treballs de la Societat Catalana de Biologia 58, pàg. 187-202.

SOLANAS, A.M.; RIERA REVERTÉ, M.; VIDAL GAVILÁN, G. (2009). *Guia de bioremediació de sòls contaminats per hidrocarburs del petroli*. Agència Catalana de Residus. Generalitat de Catalunya.

SWANNELL, R.P.J.; LEE, K.; MCDONAGH, M. (1996). "Field evaluation of marine oil spill bioremediation". *Trends Biotecnol.* 11, pàg. 344-352.

VERSTRAETE, W. (2007). *Microbial ecology and environmental biotechnology*. ISME J. 1, pàg. 4-8.

VIÑAS, M. (2005). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica*. Universitat de Barcelona. [Tesi doctoral]

WATERS, C.M.; BASSLER, B.L. (2005). "Quorum Sensing: cell-to-cell communication in bacteria". *Annu. Rev. Cell. Dev. Biol.* 21, pàg. 319-346.