

# Bioremediazioa: poluitzaileak ezabatzeko oinarri ekologikoak

*Itziar Alkorta\**  
*Javier Hernández\*\**  
*Carlos Garbisu\*\**

\* Biokimika eta Biologia Molekularra Saila  
EHU-Zientzi Fakultatea  
644 P.K. 48080 BILBO

\*\* Agrosistemak eta Abere Ekoizpen  
Derioko Zentroa  
Berreaga kalea, 1-48160 DERIO

**Laburpena:** Azken hamarkadetan ekosistema ugarran poluitzaileak nabarmen ugarritu dira, maila oso kezkarrietara iritisi arte. Poluitzaileen isurketa murrizteaz gain, ezinbestekoa dugu ikertzea nola azkar daitekeen hainbat substantzien degradazioa. Bioremediazioa ingurunearen poluzioa murrizteko ahalmen itzela erakutsi du, bakterioen populazioek duten ezberdintasun genetikoez eta metabolismo-gaitasunez baliatuz eta kutsagarriak beste produktu kaltegabeetan eraldatuz. Gaur egun, bioremediazioa ingurunea kutsatuta duen edozein leku garbitzeko balio duen teknika berritaz hartzen da baina ingurugiroaren baldintzen arabera eta kutsagarrien berezitasunen arabera ekin behar zaio biodegradazioari kasu bakoitzean.

Azken hamarkadetan giza populazioa etengabe emendatu da, eta hau mantentzeko beharrezkoa izan da industriaren-garapen handia. Honen ondorioz poluzioak ere gora egin du, ekosistema hartzaileen birziklapen- eta autodepurazio-gaitasuna erabat gaindituz. Hori dela eta, ekosistema ugarran poluitzaileak nabarmen ugarritu dira, maila oso kezkarrietara iritisi arte. Halaber, zenbait poluitzaile konposatu xenobiotikoak dira, hots, naturan lehen inoiz existitu ez diren konposatuak. Hauen egitura kimikoa biosferan ezezaguna denez, ez dago berauek degradatzeko bide naturalik. Horregatik, poluitzaileen isurketa murrizteaz gain, ezinbestekoa dugu ikertzea nola azkar daitekeen hainbat substantzien degradazioa, ekosistemetan zein giza osasunean dituzten eragin kaltegarriak murrizteko.

Ekosistema lehortan zein urtarretan bizidunen katalisi-gaitasuna baliatuz poluitzaileak desagerrarazteko prozesuari bioremediazioa deritzo. Honek ingurunearen poluzioa murrizteko ahalmen itzela erakutsi du, eta azken urte hauetan izugarritzko aurrerapenak izan ditu, hala nola, Pertsia-ko Golkoko gudan eta Exxon Valdez zein Mega Borg petrolio-untziek

sorturiko katastrofeetan ingurumenari eragindako kalteak murrizteko erabili ziren teknikak.

Nahiz eta kasu bakar batzuetan beste organismo mota batzuk ere erabili diren, bioremediazioa gehien bat, bakterioen populazioek duten ezberdintasun genetikoez eta metabolismo-gaitasunez baliatzen da kutsagarriak beste produktu kaltegabeetan edo behintzat gutxiago kutsatzen duten produktuetan eraldatzeko. Horrela, sortutako produktu hauek naturaren ziklo biogeokimikoetan sar daitezke. Mikroorganismoen aniztasun metaboliko eta fisiologiko handia dela eta, zenbait alditan eta lekutan «Mikrobioen hutsezintasunaren Printzipioa» argitaratu da. Printzipio honek dio bakterioak edozein osagai organiko hazi-substratu gisa erabiltzeko gai direla. Dena dela, nahiz eta mikroorganismoak guztiz hutsezinak ez izan, ez dugu ahaztu behar azken urteetan aurkitutako bakterio mota berriek osagai toxikoen kopuru handia metaboliza dezaketela, eta honek, aipatutako hutsezintasunaren printzipioa azaltzen du. Gainera, gogoratu behar dugu lurlean dauden mikroorganismo guztietatik oso zati txikia baino ez dugula ezagutzen, eta horregatik mikrobioen mundu osoa ezagutzera helduko bagina, metabolismo-bideen bilduma izugarria aurkituko genuke.

**1. taula.** Bioremediazioaren oztopo ekologikoak eta hauek gainditzeko erabil daitezkeen konponbideak.

Oztopoa	Konponbidea
<b>Mikrobioetan oinarrituta</b> 1) Ez dago degradazio-populaziorik. 2) Degradazio-populazioaren dentsitate txikia.	1) Kanpoko organismo degradatzaileen inokulazioa. 2) <i>In situ</i> egindako aberaste hautatua. Kanpoko organismo degradatzaileen inokulazioa.
<b>Kimikan oinarrituta</b> 1) Poluitzailea ez dago bioeskurgarria. 2) Ez dago hazi-substraturik. 3) Behar diren entzimak ez daude aktibo.	1) Poluitzailearen egoera fisikoaren aldaketa. 2) Hazi-substratua ematea. 3) Analogo kimikoa emanez metabolismoa eragitea.
<b>Ingurunean oinarrituta</b> 1) Baldintza fisiko jasanezinak. 2) Ez dago elektroimailerik.	1) Ingurune-baldintzak aldatu. 2) Behar diren erreodox egile lotzaileak ematea.

Osagai xenobiotikoei buruz, antibiotikoen gehiegizko erabilpenak bakterio-andui iraunkorrak agertzea eta aberastea eragin du, eta begi-bistan utzi du bakterioen populazioek osagai antropogenikoei moldatzeko duten gaitasuna. Dirudenez, gero eta ugariagoak diren frogak azaltzen dute zenbait kutsagarrinekin ere antzeko moldatze prozesuak gertatzen ari direla. Moldatze-erantzun hauek, mutanteen hautespen naturala eragiten dute eta batzuetan metabolismo-jarduera berriak aurki daitezke mutante hauetan. Zoritxarrez, ekosistema ezberdinetan dauden kutsagarrien kopuru handia dela eta, katabolismo-bideak sortzen dituzten eboluzio-prozesu naturalek ezin aurre egin diezaiokete ingurunera kutsagarrien kantitate itzelak askatzeko dagoen erritmo frenetikoari. Beraz, hemendik ondorio nabarmen bat atera daiteke: konposatu kutsagarrien isurketak murriztu behar ditugu.

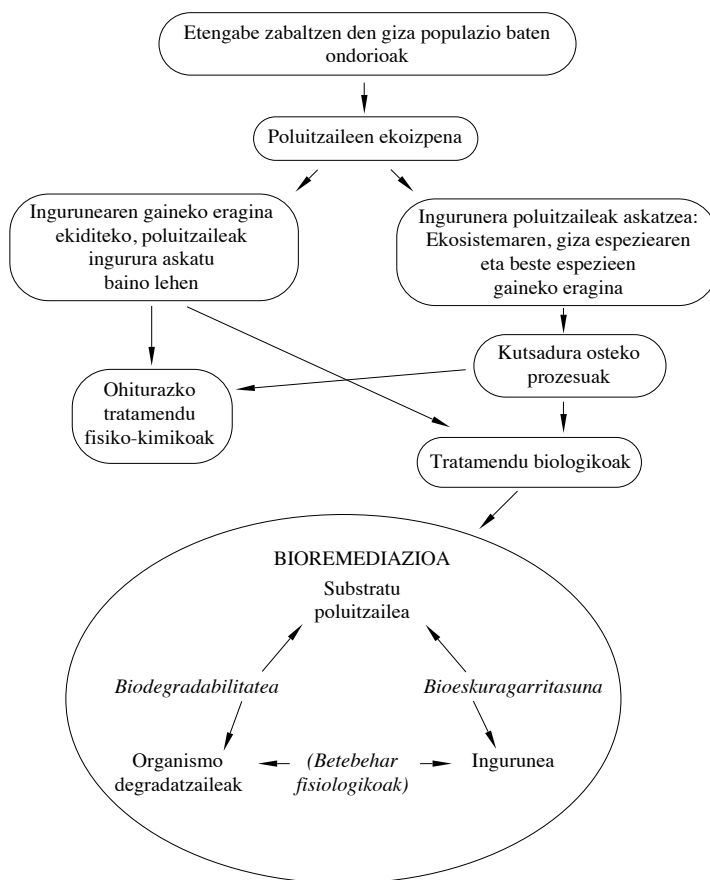
Ohituraz, bioremediazioaren arloa ingeniari-tza-lanen ikuspuntuaren menpean egon da beti. Hauen filosofia betidanik alderdi guztiz ezberdinez arduratu da, esate baterako, masa-orekaz, tanke agitatuzko erreaktoreen funtzionamenduari aplikatutako ekuazioez, etab., eta ez dituzte aztertu hautespen naturalaren prozesuak zuzentzen dituzten oinarri ekologikoak: nitxo ekologikorako egokitasuna eta moldakortasuna, espezifitatea, aniztasun biologikoa, etab. Azken finean, printzipio hauek dira bakterioak kutsagarriak degradatzeko gai izatea eragiten dutenak, bai hazi-substratu gisa erabiltzen direnean (mikroorganismoentzako energia-etekina dakartenak) edota detoxifikazio-mekanismo baten bidez poluitzailea beste substantzia arriskugabe batean (edo arrisku txikiagoko batean) eraldatzen dutenean.

Zorionez edo zoritxarrez, Natura ez da tanke agitatuzko erreaktore bat, eta erreallitate hau ahazteak zoritxarrezko porrotak ekarri ditu uretako eta lehorreko zoru kutsatuetan «in situ» bioremediatzeko horrelako erreaktoretan oinarritutako ereduak aplikatzera jo dutenean. Seguruenik, ingeniari-tza arlotik datorren ikuspuntu tradizionalago hau beste planteamendu ekologikoago batekin konbinatuko bagenu, bioremediazioaren arloa erabateko aldaketa jasango zuen, eta seguruenez oso lotura onuragarria izango litzateke, mikrobioen prozesu degradatiboak ezagutzeko egundoko aurrerakada ekarriko bailuke.

Ekologian, espezifitatea oinarritzko printzipioa da. Espezifitateak egokitasunarekin erlazionaturik dauden moldaera-abantailak ematen dizkie nitxo ekologiko jakin bateko organismoek. Kutsagarrien biodegradazioari dagokionez, printzipio honek esaten diguna da mikroorganismoek erabil ditzaketen substratuekiko (kutsagarriekiko) eta baita ingurune-baldintzekiko ere espezifitatearen bat azaltzen dutela. Espezifitate honen jatorria zenbait ezau-garritan oinarriturik dago, mintz plasmatikoen hautakortasunean, permeasetan, eta entzimen sintesia eta entzimen gune aktiboaren egitura erregulatzen dituzten proteinetan, esate baterako. Nahiz eta biodegradazioari buruzko es-

pezifizitatea osoa ez izan, esan beharra dago ingurune-baldintza jakin batzuetan, bakterioen populazio baten substratuak murriztuta daudela erabat.

Gaur egun, bioremediazioa ingurunea kutsatuta duen edozein leku garbitzeko balio duen teknika berritzaletzat hartzen da baina ingurugiroaren baldintzen arabera eta kutsagarrien berezitasunen arabera ekin behar zaio biodegradazioari kasu bakoitzean.



**1. irudia.** Bioremediaziorako prozesu batean arrakasta eragiten duten partaide ezberdinen arteko erlazioak.

Bestalde, Naturan eta hain zuzen ere bakterioetan ikusitako bioaniztasunaren gradu altuak (lur gramo bakoitzean 10.000 bakterio-espezietan baino gehiago bide daude) ondorio garrantzitsuak dakartza bioremedia-

zioaren arlora. Bioaniztasunak prozesu indartsuago eta sendoago osatze-  
ra eramaten duela dirudi. Hori dela eta, badirudi espezie kopuru handia  
dagoenean andui bereziak aurkitzeko aukerak handitzen direla. Honekin  
batera abantaila batzuk datoz, adibidez, kutsagarri baten kontzentrazio  
altuak edo baxuak bereganatzea, pH jakin bat edo inguruan dauden metal  
eta disolbatzaileen presentzia jasatea, haziera-tasa desberdinak egotea,  
fago-zoldurekiko edo protozoo harrapatzaileekiko erresistentzia azaltzea,  
etab. Printzipioz, poluitzaile baterako organismo degradatzaileen bioaniz-  
tasun altuak populazio degradatzaile egokiena jaiotzera eramane behar du,  
poluitzaile horretarako eta baldintza zehatz horietan.

Analogikoki, habitat batean bioaniztasun altua aurkitzen badugu eta  
gainera, organismo gehienek beharrezko degradazio-bideak badituzte, ia  
ezinezkoa da garbitu behar den poluitzailea degrada dezakeen populazio  
kanpotarren inokulua arrakastaz sartzea. Seguraski, bertako organismoen  
populazioek nitxorako moldaera kanpoko populazioaren inokuluak eduki  
dezakeena baino askoz handiagoa izango da. Honek, andui oso biodegra-  
datzaileak erabili direnean ia gehienetan izandako porroten zergaitia  
azaltzen du, bai organismo naturalak eta bai genetikoki eraldatutako mi-  
kroorganismoak erabili direnean. Hauek normalean bioremediatuko den  
lekuan sartutakoan hiltzen dira, bertako anduien kontra ezin baitira lehia-  
tu. Mikrobioen populazioen beste ezaugarri garrantzitsu bat biziraupen-  
-estrategia bikainak lortzea da, milioika urtetan zehar egokitu eta ebolu-  
zionatzen baitute. Estrategia hauek haien nitxo egokian egoera larriak  
gertatzen direnean urte asko bizi ahal izateko aukera ematen die, nahiz eta  
baldintzak guztiz ezberdinak izan.

Duela ehun urte baino gehiago Beijerinck-ek (mikrobiologo holanda-  
tar famatua) mikrobio-munduari buruz esandako esaldia, gaur egun dog-  
matzat hartzen da: «Dena leku guztietan dago eta inguruneak hautatzen  
du». Dogma hau biodegradazioaren arloan aplikatzen badiogu, lur edo ur  
jakin batean degradazio-bideren bat aurkitzen badugu, beste edozein lur  
edo ur kutsatutan aurkitu beharko dugula pentsa dezakegu. Oinarri hau  
esperimentalki, beharrezko sakontasunaz egiaztatu ez den arren, badirudi,  
neurri batean behintzat, betetzen dela. Beste era batean esanda, substratu  
(kutsagarri) berberak edo egitura-analogoak izanez gero, biodegradazioa  
beteko da, nahiz eta prozesuan inplikaturako bakterio-anduinak guztiz  
berdinak ez izan.

Halaber, konposatu bat biodegradagarria izateak esan nahi du konpo-  
satu hori degradatzeko beharrezkoak diren entzimak ekoizten dituzten  
organismoak daudela. Dakigunez, hautespen naturalak eboluzioan zehar  
entzima horiek mantendu ditu (kodifikatzen dituzten geneak) organismo  
eramailei abantaila batzuk eman dizkietelako. Beraz, ondoriozta deza-  
kegu entzima batek kutsagarri jakin bat garbitzeko gaitasuna edukitzea-

ren arrazoia substratu analogo batean aurkituko dugula, zeren eta substratu horrek eragin baitu entzima-jarduera honek irautea. Askotan oso zaila izaten da degradazio-gaitasuna duen entzima baten substratu naturala aurkitzea, behintzat egiturazko analogoak oso nabarmenak agertzen ez badira. Egoera honen esanahia begibistakoa da: konposatu xenobiotikoak sortzen baditugu eta hauek dituzten lotura motak eta egitura kimikoak naturan aurretik inoiz agertu ez badira, seguruenik ez dugu aurkituko horiek metabolizatzeke gai izango den organismo naturalik. Dena den, konposatu xenobiotiko berri hauek energi iturri izan litezke eta, hori dela eta, hautespen-presioak izango dira konposatu horiek erabiltzeko gai izango diren organismoak agertzeko. Edonola hau egia izanik, era berean kontuan hartu behar dugu hautespen naturalaren bidez metabolismo-bide berriak sortzea oso prozesu geldoa dela. Horregatik, konposatu horiek garbitu nahi izanez gero, seguruenik ingeniarietza genetikora jo beharko dugu, prozesua epe logiko batean bete ahal izateko.

Kutsagarrien bioremediazioaren arloan, substratu bat energi iturri gisa erabiltzea posible den ala ez funtsezko arazoa da. Poluitzailea hazi-substratu gisa erabili ahal bada, eta sistema ekologikoak baliabide ezberdinen kideen arteko lehiaketetan oinarritzen direla kontuan hartuz, hautespen-presioa oso handia izango da, organismo degradatzaileen populazioek hazkunde maila oso altua lor dezaten eta poluitzailearen degradazio-tasa igo dadin. Bestalde, poluitzailea hazi-substratu bezala erabiltzea posible ez denean, batzuetan prozesu kometabolikoen bidez partzialki metabolizatua izan daiteke. Kutsagarri batek bakterioen populazio jakin baten substratu gisa ekin dezakeenean, orduan bai hartu beharko dugu biorremediazioa benetako arrakasta izango duen aukeratzat. Gainera, ia kasu guztietan, hazi-substratuak dioxido karboniko, metano, ur eta biomasaraino guztiz mineralizatuak izaten dira, eta horrela ez da bitarteko hondakin toxikorik geratzen.

Dena den, kontuan hartu behar dira zenbait faktore, esate baterako inguruan bizitzea posible den (leku batzuetan poluitzaileen kontzentrazioa oso altua da eta oso gutxi dira mikrobio-populazioen bizitzeko aukerak), bakterioen populazioa kutsagarriak degradatzeko baldintza onuragarrietan egoteko behar dituen elikagaiak (batez ere nitrogenoa eta fosforoa), elektroi-hartzaileak, pH-a, etab. Horregatik, poluitzaile baten bioremediazioari ekiten diogunean, helburua da degradazio prozesua azkartzeko behar diren baldintzen suplementazioa (elikagaiak, elektroi-hartzaileak, etab.). Baina kasu askotan oraindik egiaztatzeaz dago tratamendu hauen gaitasuna, merkeak direnez, haien beharrari buruzko ikasketa sakonik egin gabe ekiten zaielako.

Beste estrategia arrunt bat poluitzailea garbitzeko beharrezkoa den metabolismo-bideak dituen mikrobioen populazioa aukeratzea eta sar-

tzea da. Inokulu horien arrakasta ez datza bakarrik faktore abiotikoetan (hauen artean pH-a, tenperatura, oxidazio-erredukzio potentziala, uraren eta elikagaien erabilgarritasuna) baizik eta faktore biotikoetan ere; hauen artean, mikrobioen arteko lehiaketa, amensalismoa, parasitismoa eta harri-pakaritza aurki ditzakegu. Hauek mikrobio-populazioaren hazkuntza eta garapena murriz ditzaketan faktoreak dira.

Laburbilduz, leku kutsatu jakin batean hautespen naturala gertatzeko behar diren baldintzak suertatzen badira, orduan baieztatu daiteke mikrobioen degradazio-metabolismoaren eraginez kutsagarrien garbiketak oso emaitza onak ematea espero ahal izango dugula. Are gehiago, ingurugiroan behar diren baldintzak eta metabolismo-bideak aurkitzen badira, ez da izango poluitzaileen garbiketa gelditzerik.

Ekologiaren oinarrien arabera, beharbada masa orekaren ekuazioetatik eta kutsagarrien legezko kontzentrazio-muga ahaztu beharko genituzke eta gehiago ziurtatu beharko genuke ingurune-baldintzak hautespen naturalaren mesedegarri direla, eta berriro ere Naturak, bere ohiko jakituriaz, giza izakiaren ezjakituriagatik eta harrokeriagatik eragindako katastrofeak konpon ditzan.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] DAUBARAS, D. eta CHAKRABARTY, A.M. 1992. «The environment, microbes and bioremediation: Microbial activities modulated by the environment». *Biodegradation*, **3**, 125-135.
- [2] BOUWER, E.J. eta ZEHNDER, A.J.B. 1993. «Bioremediation of organic compounds—Putting microbial metabolism to work» *TIBTECH*, **11**, 360-367.
- [3] LIU, S. eta SUFLITA, J.M. 1993. «Ecology and evolution of microbial populations for bioremediation». *TIBTECH*, **11**, 344-352.
- [4] SHANNON, M.J.R eta UNTERMAN, R. 1993. «Evaluating bioremediation: Distinguishing fact from fiction». *Annu. Rev. Microbiol.*, **47**, 715-738.
- [5] TIMMINS, K.N., STEFFAN, R.J. eta UNTERMAN, R. 1994. «Designing microorganisms for the treatment of toxic wastes». *Annu. Rev. Microbiol.*, **48**, 525-557.
- [6] HOOKER, B.S. eta SKEEN, R.S. 1996. «Intrinsic bioremediation: an environmental restoration technology». *Curr. Opin. Biotechnol.*, **7**, 317-320.
- [7] GARBISU, C. eta ALKORTA, I. 1997. «Bioremediation: Principles and Future». *J. Clean Technol., Environ. Toxicol., and Occup. Med.*, **6**, 351-366.
- [8] GARBISU, C. eta ALKORTA, I. 1999. «Utilization of genetically engineered microorganisms (GEMs) for bioremediation». *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **74**, 599-606.