



MICROBIOLOGIA A L'AMPOLLA DE SULFÚRIC,

EL CAS DEL RIU TINTO

Escrit per:

Ricardo Amils Pibernat

Centre de Biologia Molecular (CSIC-UAM)
Centre d'Astrobiologia (CSIC-INTA)

L'extremofília

El descobriment d'organismes extremòfils, és a dir, d'éssers vius capaços de desenvolupar-se en condicions considerades prohibitives per a la vida, com pot ser l'elevada temperatura d'un autoclau o en un guèiser, les baixes temperatures dels gels polars, la força iònica d'una solució saturada de sal, la radiació d'un circuit de refrigeració d'una central nuclear o bé l'acidesa produïda pel vinagre, entre moltes altres, ha suposat una autèntica revolució en el camp de la biologia, amb importants repercussions no només en els seus aspectes fonamentals, sinó també en aspectes aplicats, com per exemple la biomineria.

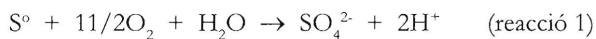
Les primeres observacions sobre l'extremofília es van realitzar fa més d'un segle i es van deure a la constatació que en les condicions de conservació de peix en saladura es desenvolupaven microorganismes als quals es va donar el nom d'halòfils, literalment amants de la sal. L'interès per aquests microorganismes va créixer una vegada es va resoldre el problema econòmic del deteriorament del peix conservat en salmorra, en substituir-se la sal d'origen marí per l'extreta de les mines. El boom de l'extremofília es va iniciar els anys setanta amb els estudis de T. Brock i dels seus col·laboradors, els quals van demostrar l'existència de microorganismes capaços de desenvolupar-se a les elevades temperatures de diferents estructures volcàniques del Parc Nacional de Yellowstone (EUA). L'interès pels extremòfils es va complementar convenientment amb la introducció de les noves idees filogenètiques de C. Woese, basades en la comparació de seqüències dels àcids nucleics ribosomals (rRNAs). Aquesta complementació va facilitar que Woese donés el nom d'arqueobacteris (avui denominades arquees) al grup de microorganismes hipertermòfils, halòfils i metanogènics, filogenèticament tan diferents dels bacteris o dels eucariotes, com ho són aquests dos grups entre si. Aquesta

denominació implicava un estatus d'antiguitat evolutiva, noció que posteriorment ha estat corregida en demostrar-se que les arques són evolutivament més properes als eucariotes, tot i les seves propietats fenotípiques fonamentalment procariòtiques (mida, forma, metabolisme, ecologia).

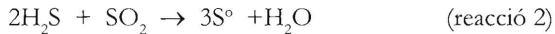
Acidofilia

Dintre de l'extremofilia els microorganismes quimiolitòtrofs acidòfils, en altres paraules, els organismes capaços de desenvolupar-se en condicions extremes d'acidesa ($\text{pH} < 2$) i d'obtenir energia a partir de compostos minerals reduïts, ocupen un lloc singular. Aquesta singularitat prové del seu peculiar sistema d'obtenció d'energia, independent de la radiació, cosa que els situa com a candidats interessants en els primers balbuceigs de vida sobre el planeta, i de la seva ecologia, ja que, com veurem, les condicions extremes d'acidesa en les quals es desenvolupen no es deuen a constriccions geofísiques, com en la majoria dels hàbitats extrems coneguts (volcans, gels polars, llacunes hipersalines, radiació, etc.), sinó que són precisament conseqüència del seu metabolisme.

Els ambients àcids, normalment associats a elevades concentracions de metalls, tenen dos orígens principals. Un associat al metabolisme del sofre elemental:

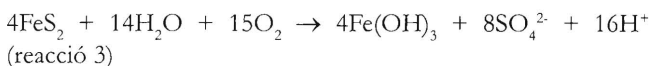


producte de la reacció de condensació de gasos volcànics:



En aquests ambients àcids rics en sofre, habitualment coneguts amb el nom de solfatares, es produeixen importants gradients de temperatura, cosa que facilita la seva colonització per una gran varietat de microorganismes amb diferents temperatures de creixement.

L'altre se sol trobar associat a activitats mineres. La mineria dels metalls i del carbó facilita l'exposició de sulfurs metàl·lics a l'aigua i a l'acció dels microorganismes quimiolitòtrofs capaços d'obtenir energia oxidant-los. L'oxidació de la pirita, el sulfur metàl·lic més comú en la superfície del planeta, és d'especial interès en aquest context. El procés ocorre en distintes etapes, podent-se formular la reacció global amb la següent equació:



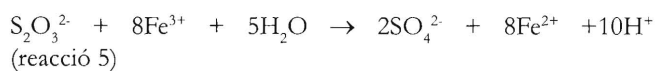
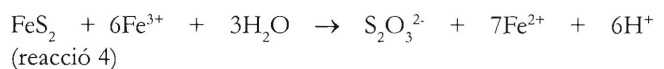
Aquests ambients varien molt en les seves propietats fisicoquímiques i per tant en la seva ecologia microbiana. Els ambients àcids associats a activitats mineres són relativament recents des d'un punt de vista geològic i evolutiu. Algunes activitats mineres, com les del Riu Tinto, tenen una llarga història ja que existeixen indicis de la seva explotació per miners calcolítics, fa cinc mil anys. La recent caracterització

microbiològica d'aquest hàbitat ha mostrat un complex ecosistema en funcionament molt abans de l'activitat minera de la zona.

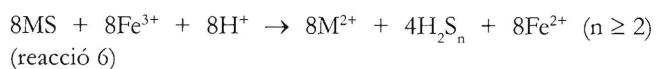
Quimiolitotròfia acidòfila

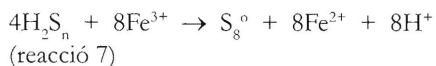
Els mecanismes pels quals els microorganismes poden obtenir energia oxidant sulfurs metàl·lics, un procés d'interès en biomineria, ha estat un tema molt controvertit durant molts anys. Dos mecanismes bàsics, coneguts amb el nom d'atac directe i indirecte, han sigut considerats i àmpliament debatuts amb la finalitat d'explicar la majoria de les observacions obtingudes en diferents processos de biolixiviació. Mitjançant l'atac directe, els microorganismes solubilitzen sulfurs minerals adherint-se a la seva superfície, facilitant d'aquesta manera la transferència electrònica des del substrat mineral a l'acceptor d'electrons corresponent (respiració). En l'atac indirecte, els microorganismes són responsables de l'oxidació del ferro reduït de la solució, mantenint d'aquesta manera una elevada concentració de l'agent oxidant, l'ió fèrric, en la mateixa. L'ió fèrric és responsable de l'oxidació de la majoria dels sulfurs metàl·lics i de qualsevol compost susceptible exposats a la solució.

La recent demostració que l'ió fèrric de la paret cel·lular i dels exopolisacàrids dels microorganismes lixiviadors és l'únic responsable de la transferència electrònica des dels substrats minerals a la cadena transportadora d'electrons, ha clarificat aquest dilema d'indubtable interès tecnològic i ambiental. Tenint en compte aquest fet s'ha proposat, ja que l'ió fèrric és el responsable únic de l'oxidació de sulfurs metàl·lics tant en el mecanisme directe com en l'indirecte, que no té sentit mantenir la diferència entre tots dos mecanismes. Les diferències observades en la biolixiviació de diferents sulfurs metàl·lics sembla dependre fonamentalment del mecanisme d'atac químic, el qual depèn al seu torn de l'estructura cristal·lina dels substrats minerals. Tres sulfurs (la pirita, la molibdenita i la tungstenita) només són oxidables a la natura per l'ió fèrric, mitjançant el mecanisme denominat del tiosulfat:



s'obté sulfat com a producte principal. Observi's que aquesta oxidació només requereix de l'activitat oxidant del ferro. En canvi, la majoria dels sulfurs (e.g. esfalerita, calcopirita, galena, etc.) són susceptibles d'un atac mitjançat tant per protons com per l'ió fèrric. En aquest cas el mecanisme d'oxidació es coneix amb el nom de polisulfur, un intermediari en la reacció:



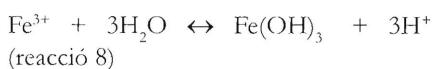


El sofre elemental pot ser oxidat per bacteris oxidadors de sofre tot produint àcid sulfúric d'acord amb la reacció 1. La majoria dels especialistes en biohidrometalúrgia estan d'acord avui en dia amb aquests mecanismes bàsics, que permeten explicar la majoria de les observacions acumulades durant més de trenta anys de biomineria i que concedeixen al ferro un paper crític i central en la biooxidació de sulfurs metàl·lics i en la quimiolitotròfia acidòfila.

Riu Tinto, característiques generals

El Riu Tinto (Faixa Pirítica Ibèrica) és un inusual ecosistema atès el seu pH àcid (valor mitjà de 2.3), mida (100 km), elevada concentració de metalls pesants (Fe, Cu, Zn, Cr, As, etc.) i un inesperat nivell de diversitat microbiana, fonamentalment eucariòtica. El Riu Tinto neix enmig de la Faixa Pirítica Ibèrica, a Peña de Hierro, i desemboca a l'oceà Atlàntic a Huelva. El riu dona nom a un important districte miner, el qual ha estat operatiu des de fa cinc mil anys.

La Faixa Pirítica Ibèrica és una entitat geològica d'origen hidrotermal de 250 km de llarg i una amplada que oscil·la entre 25 i 70 km, coneguda per ser no un dels majors, sinó el major dipòsit de sulfurs metàl·lics del món. Una important característica del Riu Tinto és el seu pH, constant al llarg del seu llit. Aquesta propietat es deu al caràcter tampó de l'ió ferric en solució:



Quan el riu es dilueix a l'hivern a causa de la pluja (clima mediterrani) o dels seus tributaris, la hidròlisi de l'ió ferric genera els protons necessaris per mantenir l'acidesa del medi. L'elevada temperatura de l'estiu és responsable de l'evaporació de l'aigua, però el pH del riu no varia a causa del consum de protons en la redissolució dels precipitats d'hidròxids de ferro. El

pH del sistema es manté en un valor constant de 2.3 mentre hi hagi suficient ió ferric en solució i precipitats d'hidròxid de ferro. La situació és diferent a la zona d'influència intermareal. Als aiguamolls del Tinto, el pH canvia dràsticament dues vegades al dia depenent de la direcció de la marea. Algunes variables importants del sistema són el potencial redox que fluctua entre +280 mV i +610mV, i la concentració d'oxigen que varia des de valors de saturació atmosfèrica a condicions completament anòxiques. Aquestes variables són dependents de les condicions climàtiques i del metabolisme microbià associat al sistema.

Ecologia microbiana del Riu Tinto

La utilització de tècniques d'ecologia molecular, fonamentalment la resolució de l'amplificació dels gens corresponents al 16-18S rRNA per electroforesi en gradient desnaturitzant (DGGE) i la seva seqüenciació i/o la hibridació amb sondes específiques fluorescents amb especificitat diferent (FISH), complementades amb les tècniques convencionals d'aïllament i caracterització fenotípica de microorganismes, ha permès identificar els elements més representatius del sistema, els quals es poden agrupar d'acord amb el seu paper ecològic.

Els quimiolitotrofs procariòtics i els protists fotosintètics són els productors primaris de l'ecosistema. En relació als quimiolitotrofs oxidadors de ferro, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum* spp. i *Ferroplasma* spp., han estat aïllats i identificats en diferents estacions de mostreig al llarg del riu. La seva quantificació utilitzant sondes específiques ha permès demostrar que *At. ferrooxidans* i *Leptospirillum* spp. són els elements majoritaris del sistema. A diferència d'altres sistemes acidòfils recentment caracteritzats (e.g., Iron Mountain, a Califòrnia), el nombre d'arquees corresponents al gènere *Ferroplasma* detectades a Riu Tinto és baixa, i es troben confinades majoritàriament a la part alta del riu, a prop del seu origen.

Dels procariotes oxidadors de sofre només *At. ferrooxidans* (capaç d'oxidar ferro i compostos reduïts del sofre) es troba en importants quantitats al Riu Tinto. Experiments d'hibridació amb marcadors específics han mostrat la presència d'importants concentracions d'aquest bacteri en zones anòxiques del riu, probablement relacionades amb la seva capacitat de respirar anaeròbiamet compostos reduïts de sofre utilitzant l'ió ferric com a acceptor d'electrons. En el laboratori s'ha pogut substanciar la capacitat de *L. ferrooxidans* d'oxidar anaeròbiamet ió ferrós. Aquestes observacions suggereixen l'operació del cicle del ferro en condicions tant aeròbiques com anaeròbiques.

Un important nombre de bacteris heterotròfics han estat aïllats a partir de diferents cultius d'enriquiment. Alguns d'aquests aïllats han estat identificats com a membres del gènere *Acidiphilium*. Aquests bacteris es troben freqüentment associats a microorganismes quimiolitotrofs. Totes les espècies conegudes d'*Acidiphilium* són respiradores anaeròbiques facultatives, capaces d'oxidar compostos reduïts de carboni utilitzant ió ferric com a acceptor d'electrons. Algunes espècies d'*Acidiphilium* són capaces de reduir ferro en presència d'importants concentracions d'oxigen. La utilització de sondes específiques per aquest gènere ha mostrat la presència d'importants poblacions d'aquest bacteri en l'ecosistema del Tinto, subratllant la importància del cicle del ferro en el mateix. També s'ha detectat per tècniques moleculars la presència de bacteris Gram positius reductors del ferro relacionats amb els gèneres *Ferrimicrobium* i *Acidimicrobium*. Aquests bacteris estrictament anaeròbics es troben en baixes concentracions en la columna d'aigua.

Experiments d'hibridació suggereixen l'existència de procariotes reductors de sulfat en el Tinto. Aquests importants elements del cicle del sofre encara no han pogut ser aïllats de la part més àcida de l'ecosistema, encara que sí que s'han pogut aïllar i identificar en les zones d'inundació oceànica dels aiguamolls,

generant importants precipitats negrosos produïts per a la formació de sulfurs de ferro i d'altres metalls presents en el sistema.

Els protists fotosintètics (algues) són responsables d'una part important (65%) de la biomassa de l'ecosistema del Tinto. Membres dels grups Bacillariophyceae (Diatomeas), Euglenozoa (*Euglena*), Chlorophyta (*Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Klebsormidium* y *Zignema*), i Rhodophyta (*Galdieria*) han estat identificats i algunes d'elles aïllades i caracteritzades. L'ús de tècniques d'ecologia molecular, fonamentalment anàlisis de seqüències amplificades de 18S rRNA, han permès identificar algues estretament relacionades amb les caracteritzades fenotípicament, cosa que permet subratllar l'elevat nivell de diversitat eucariòtica en les condicions extremes del Riu Tinto.

Associats a les biopel·lícules que es desenvolupen a la superfície de les roques existeix una important diversitat de fongs acidòfils, incloent-hi llevats i

fongs filamentosos. Un alt percentatge d'aïllats d'hyphomycetes han estat obtinguts a partir del seu creixement en les condicions extremes del Riu Tinto, pel que es consideren elements del sistema i no formes externes de resistència. Alguns aïllats de llevats es poden trobar en altres ambients aquàtics menys extrems, però els fongs negres (Demateacis) semblen ser específics d'ambients àcids extrems, ja que generalment no s'aïllen en aigües fresques a pH neutre. L'anàlisi de seqüències obtingudes per clonatge evidencia la presència de possibles gèneres nous.

D'entre els eucariotes, els protists heteròtrofs constitueixen el grup més important de consumidors de l'ecosistema. Diversos flagel·lats, ciliats (phylum Ciliophora), amebes de la classe Lobosea (phylum Rhizopoda) i representants de la classe Heliozoa (phylum Actinopoda) han estat observats, generalment associats a biopel·lícules. L'anàlisi molecular de seqüències ha permès detectar la presència d'altres

protists heteròtrofs no identificats per mètodes fenotípics.

Bioformacions de ferro

La major part de la biomassa del sistema es troba tapissant el fons del riu o la superfície de les roques formant denses biopel·lícules, constituïdes fonamentalment per fongs i algues filamentoses. La superfície d'aquestes biopel·lícules està recoberta per precipitats minerals, fonamentalment de ferro, tot generant estromatòlits, els quals creixen estacionalment seguint el règim climàtic del sistema. Aquestes bioformacions de ferro han resultat fonamentals per demostrar que el Riu Tinto no és el producte de la contaminació minera.

L'existència de distintes formacions de ferro ocupant distintes elevacions per sobre del llit del riu actual (Alto de la Mesa, Nerva, Zarandas), amb una antiguitat de com a mínim dos ordres de magnitud major que l'activitat minera més antiga coneguda a la zona, i amb



una estructura similar a les que s'estan formant en l'actualitat en el riu, és un argument important a favor de l'origen natural del sistema del Tinto.

El model del Tinto

Encara que la presència de bacteris oxidadors de sofre (*At. ferrooxidans*) i sulfat-reductors suggereixen l'operació d'un efectiu cicle del sofre en el Riu Tinto, la identificació de procariotes oxidadors (*Leptospirillum* spp., *At. ferrooxidans*, *Ferroplasma* spp.) i reductors de ferro (*Acidiphilium* spp., *At. ferrooxidans*, *Ferrimicrobium* sp. i *Acidimicrobium* sp.), capaços d'operar no només en condicions aeròbies sinó també en condicions anaeròbies, subratlla l'existència d'un cicle del ferro operatiu en les diferents condicions de l'ecosistema.

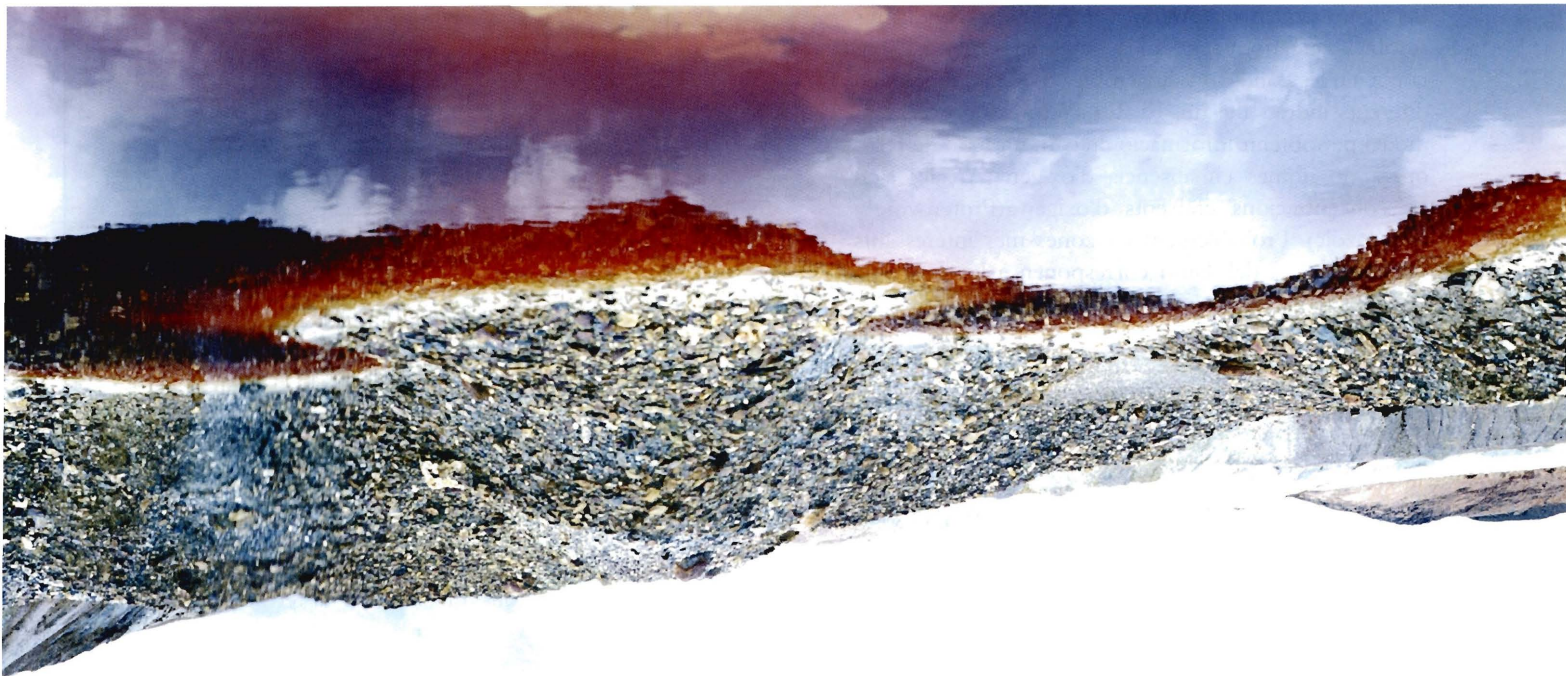
Considerant les característiques geomicrobiològiques de l'ecosistema del Tinto vam postular que està fonamentalment sota el control del ferro. El ferro és el producte principal de la biolixiviació de la pirita i de la calcopirita, ambdues presents en importants concentracions a la Faixa Pirítica Ibèrica. L'activitat dels procariotes oxidadors de ferro és responsable de les importants concentracions d'ió fèrric, sulfat i protons presents en la columna d'aigua del riu (reaccions 4, 5, 6 i 7). Al seu torn, l'ió fèrric és un oxidant enèrgic, especialment en medi àcid, capaç d'oxidar diferents sulfurs metàl·lics, tot facilitant la solubilització de diferents cations metàl·lics.

El ferro té propietats d'un indubtable interès ecològic i astrobiològic. No és només una font d'energia per als microorganismes, sinó que pot ser utilitzat com acceptor d'electrons en la respiració anaeròbia, és capaç de controlar el pH de l'ecosistema i protegir els microorganismes de la nociva radiació ultraviolada. Aquesta darrera propietat és interessant per a un planeta com Mart que manca d'una capa protectora d'ozó, o l'Arcaic terrestre en el qual l'absència d'oxigen impediria l'existència d'aquest element protector de la radiació ultraviolada.

Aquest escenari sembla raonable per als procariotes quimiolitòtrofs que es troben al Tinto. Tanmateix, tenint en compte la important diversitat eucariòtica del sistema, molt major que la procariòtica, i que una part important de la producció primària del Riu Tinto prové de l'activitat metabòlica de protists fotosintètics, ¿quin avantatge dona als eucariotes el fet de desenvolupar-se en un ambient de pH extrem i elevada concentració de metalls pesants tòxics? Una possible resposta està relacionada amb les propietats del ferro en un món amb un pH neutre.

Encara que el ferro és extremadament important per a la vida, és un factor limitant pel creixement en un pH neutre. La majoria dels organismes han desenvolupat sistemes molt elaborats per atrapar ferro en qualsevol indret on el trobin. A què es deu aquest comportament, si el ferro és un dels





elements més abundants en el nostre planeta? En una atmosfera oxidant i a un pH neutre el ferro soluble s'oxida ràpidament, tot produint compostos insolubles que s'incorporen en els sediments anaerobis on els sulfat-reductors poden transformar-los en pirita, un mineral poc reactiu. El reciclatge geològic d'aquests sediments i la microbiologia associada al cicle del ferro són els únics mecanismes per reintroduir aquest element crític en la biosfera. Un possible avantatge pels eucariotes que es desenvolupen en les condicions extremes del Tinto és una limitada font de ferro subministrada pels quimiolitòtrofs oxidadors dels sulfurs metàl·lics de la Faixa Pirítica Ibèrica.

Ha estat aquest escenari de limitació del ferro una constant al llarg de la història de la vida sobre la Terra? Diversos autors sostenen que els oceans de l'Arcaic disposaven d'importants concentracions de ferro, diversos ordres de magnitud superiors a les que es troben en els oceans actuals. En aquestes condicions és raonable postular la possible

existència de microorganismes capaços d'oxidar ferro en condicions anaeròbies. Aquesta activitat degué promoure el desenvolupament de microorganismes reductors de ferro, responsables de mantenir operatiu un cicle del ferro en l'Arcaic. Alguns autors consideren que la respiració anaeròbia utilitzant ferro fèrric com a acceptor d'electrons correspon a un sistema primitiu de transducció d'energia. En aquest context és important considerar l'avantatge que va poder suposar el fet de disposar d'un complet cicle biològic del ferro en comptes de dependre d'imprevisibles reaccions abiòtiques d'oxidació o reducció. Un possible avantatge d'un sistema quimiolitòtrof basat en el cicle del ferro és la seva independència de la radiació de l'estrella (el Sol), una dependència no desitjable en l'època d'aparició de la vida en el nostre planeta (època d'importants impactes meteorítics generadors de llargs hiverns solars). La generació d'importants formacions de ferro bandejat (BIFs) en l'Arcaic suggereixen l'existència de concentracions de ferro en els oceans capaces de mantenir un pH àcid (oceà àcid), que faciliten el metabolisme dels

quimiolitòtrofs oxidadors de ferro. Més encara, un món Arcaic del ferro basat en l'operativitat d'un cicle del ferro no requereix d'importants concentracions de ferro soluble, ja que els microorganismes quimiolitòtrofs són capaços de metabolitzar minerals insolubles de ferro, igual que els microorganismes reductors de ferro.

Utilitzant sondes d'hibridació podem assignar més del 80% de la diversitat procariòtica del Riu Tinto a sistemes convenientment caracteritzats fenotípicament i genotípicament, la majoria relacionats amb el cicle del ferro. Aquestes activitats originen bioformacions de ferro que amb el temps fossilitzen i originen estromatòlits de ferro. Aquestes bioformacions mostren una composició mineral i un patró de bandes que reflecteixen la geomicrobiologia del sistema i el record climàtic, de manera similar als BIFs de l'Arcaic.

En relació a l'oxigen, la concentració del qual degué de ser molt baixa en el període Arcaic, sabem que els microorganismes aïllats de l'ecosistema

del Tinto poden operar no només en les condicions aeròbiques que dominen en la superfície del riu, sinó també en les condicions anaeròbiques que predominen en diferents indrets del riu. El Riu Tinto és un excel·lent model per obtenir informació de com un món de ferro opera no només en absència d'oxigen (Arcaic) sinó en concentracions creixents d'oxigen (Proterozoic i Fanerozoic). Probablement les zones més interessants de l'ecosistema del Tinto corresponen a les zones de fluctuació en la interfase entre les condicions òxiques i anòxiques.

En relació al pH àcid, una de les característiques més singulars del sistema del Tinto, és una conseqüència directa de les propietats fisicoquímiques del ferro fèrric, el principal producte metabòlic de l'oxidació de la pirita. Si el ferro ferrós en forma soluble i/o insoluble (mineral) i els bacteris oxidadors de ferro estan presents en el mateix sistema, es produirà ferro fèrric independentment de la concentració d'oxigen. El ferro fèrric precipita oxihidròxids de ferro alliberant protons d'acord a l'equació 8, mantenint constant el pH en la columna d'aigua mentre hi hagi suficient ió fèrric en solució. La geomicrobiologia del Tinto és capaç de proveir suficient ferro en solució per mantenir constant el pH al llarg del seu llit tot i les dilucions produïdes pels diferents tributaris i les inundacions conseqüència del règim climàtic mediterrani.

Tot i que la història del ferro en la biosfera és encara una pregunta oberta, ens agradaria proposar que l'ecosistema del Tinto, així com altres ambients àcids rics en ferro, són relíquies d'un món de ferro Arcaic. Òbviament, les condicions d'operació actual del Tinto són diferents de les existents en l'Arcaic, però les propietats dels microorganismes identificats i caracteritzats fins aquest moment permeten extrapol·lar la seva capacitat operativa en les condicions de l'Arcaic. És important subratllar que estem parlant d'un sistema actual, operatiu. Preguntes convenientment formulades hauran de facilitar una convenient caracterització del sistema, cosa que permetrà esclarir el seu origen i el paper dels diferents components de l'hàbitat en distints escenaris evolutius. Amb la finalitat de completar l'estudi global de l'ecosistema del Tinto s'ha iniciat l'estudi sistemàtic dels seus sediments anaerobis, i s'està desenvolupant un projecte de perforació (MARTE) en col·laboració amb la NASA amb l'objectiu de conèixer les possibles activitats microbiològiques operatives en el subsòl de la Faixa Pirítica Ibèrica i provar que la tecnologia per perforar a Mart està disponible per a una futura missió al planeta vermell.



Ricardo Amils és llicenciat en Química per la UB i doctor en Ciències per la UAB. Va cursar els seus estudis de postdoctorat a la Dartmouth Medical School, Universitat de Columbia. Actualment és catedràtic de Microbiologia al

departament de *Biología Molecular de la Universidad Autónoma de Madrid* (UAM), membre del Centre de Biologia Molecular (CSIC) des de 1977 i investigador al Centre d'Astrobiologia (CSIC-INTA), centre associat al NASA Astrobiology Institute (NAI).

Els seus principals interessos científics són l'evolució del ribosoma, la reconstitució de ribosomes, l'ecologia dels ambients àcids, la biomineria i l'astrobiologia. És conegut per les investigacions que va dur a terme al riu Tinto iniciades l'any 1990 on estudia les condicions en què viuen fongs, algues, protozous i bacteris en presència de metalls pesants.

Fitxa tècnica de les imatges d'aquest article: (riu tinto)

Títol Sèrie : Projectando un sueño
Any: 2002
Tècnica: Fotografia muntada en alumini, marc de fusta i metacrilat
Mides: 130 cm x 250 cm

Copyright de les imatges: **Mayte Vieta**

www.maytevieta.com