



3

El perquè de l'urani a la mina Eureka

Montgarri Castillo i Oliver
Jordi Ibáñez Insa
Cristina Villanova de Benavent
Lisard Torró i Abat
Marc Campeny Crego

3.1. Introducció

Els minerals són els components d'origen natural que formen les roques. En l'actualitat, es coneixen al voltant de 5300 espècies diferents de minerals i aquest nombre augmenta any rere any arrel dels nous descobriments dels investigadors. Cada mineral està compost per una combinació d'elements químics que s'organitzen d'una forma concreta i que, externament, poden donar lloc a la formació de cristalls. Les diferències en la química i l'estructura dels minerals fan que cadascun d'ells tingui unes propietats i característiques diferents: color, llüissor, duresa, densitat, forma, etc.

A causa d'aquestes propietats, els minerals poden tenir aplicacions molt diverses. A més, són la font principal de molts elements químics que es fan servir en multitud d'aplicacions tecnològiques. Tant és així que una gran part de la indústria i les innovacions actuals depenen dels recursos minerals i, per això, ni la nostra societat ni la nostra forma de viure serien les mateixes sense ells.

De fet, les aplicacions dels minerals han anat de la mà de l'evolució de la societat humana des dels seus inicis. Ja durant el neolític es va iniciar l'extracció de minerals amb finalitats ornamentals que van permetre el naixement d'un comerç primitiu. Les edats de coure, bronze i ferro van anar lligades al control de la manipulació d'aquests metalls. Just llavors les explotacions mineres per a l'extracció de minerals van multiplicar-se.

També el domini de grans imperis com el de l'antic Egipte o l'Imperi romà va anar enllaçat al control de minerals i de les explotacions mineres. Fent un gran salt endavant, durant la revolució industrial es va iniciar un nou període clau pel que fa a les aplicacions dels minerals. El gran desenvolupament industrial i tecnològic reclamava la producció de nous recursos que fins aquells moments eren poc utilitzats, com són el carbó o el petroli. L'extracció i l'ús de metalls també va anar augmentat i, a mitjans del segle XX, van entrar en escena alguns metalls que fins llavors no eren massa aprofitats com el wolframi, el titani... o l'urani.

La febre de l'urani va estar promoguda per l'esclat de la Segona Guerra Mundial i el naixement de les primeres centrals nuclears per a fabricar energia elèctrica. El territori català no va ser aliè a aquesta febre i, com ja hem comentat en el primer capítol d'aquest llibre, el règim franquista va intentar fer-se propaganda demostrant que podria disposar d'aquest valuós metall malgrat el bloqueig internacional, per la qual cosa va finançar, entre d'altres, un intent efímer d'explotar urani a la Vall Fosca.

A la mina Eureka es poden trobar actualment nombroses espècies minerals diferents, moltes de les quals són rares o molt rares. Fins a l'actualitat, a la mina Eureka s'han pogut descriure més de 100 espècies minerals que contenen elements químics tan diversos com el mateix urani (U), o d'al-

tres com el vanadi (V), el plom (Pb), el coure (Cu), el níquel (Ni), la plata (Ag), el cobalt (Co), l'arsènic (As) o l'antimoni (Sb). Per la seva riquesa mineralògica, la mina Eureka es considera un indret d'interès científic excepcional, de gran importància a nivell mundial i, probablement, irrepetible. Les diferents mineralitzacions que hi ha a la mina Eureka van lligades directament a la geologia de la regió, que ja hem començat a conèixer en el capítol anterior, i són conseqüència de processos geològics complexos que continuen desenvolupant-se avui en dia molt lentament.

A continuació, es detallaran breument les característiques principals de les mineralitzacions metàl·liques que trobem a la mina Eureka, i s'aprofundirà en els processos que van donar lloc a la seva formació.

3.2. Origen de la mineralització metàl·lica

Com ja hem començat a veure en el capítol anterior, les roques que afloren a l'àrea del poble de Castell-estació (justament on es troba la mina Eureka) són lutites, gresos i microconglomerats vermells del Triàsic, que formen part de les fàcies conegudes com a Buntsandstein. Des del punt de vista dels jaciments minerals, aquests materials caracteritzats per l'alternança d'estrats de roques sedimentàries detrítiques i una típica coloració vermella deguda al seu origen continental reben també el nom de *redbed* (la traducció al català seria quelcom així com "làmines vermelles" o "estrats vermells"). El color vermell ve donat per la presència d'òxids de ferro microscòpics que es troben disseminats a les roques.

Els *redbeds* tenen una importància econòmica rellevant, ja que són roques poroses que sovint poden actuar com a reservoris de petroli o carbó. Si bé aquest és el major interès econòmic dels *redbeds*, també són roques molt apreciades en mineria, ja que poden contenir importants concentracions d'alguns metalls com el coure, el vanadi o... l'urani. Aquest és el cas en aquesta regió de la Vall Fosca.

Ara bé, per què aquestes roques contenen tots aquests metalls? Intentem aclarir-ho.

Les roques sedimentàries que formen els *redbeds* tenen el seu origen en medis fluvials i són materials litificats que en el seu dia van ser arrossegats i posteriorment dipositats per antics rius. Com passa en tots els cursos fluvials, depenent del clima o de l'estació de l'any, es poden intercalar períodes on el riu baixa molt tranquil amb d'altres on el riu baixa més ple i, fins i tot, amb grans avingudes en les quals, a més de sediments, el riu també transporta tiges, troncs i altres restes vegetals. Aquest conjunt de restes vegetals transportades pels rius es diposita juntament amb els sediments i provoca petites acumulacions de matèria orgànica que, amb el pas del temps, pot donar lloc a la formació de nivells de carbó vegetal. Actualment, nivells

d'aquest carbó són fàcilment distingibles a l'interior de la mina Eureka i en alguns afloraments propers al poble de Castell-estaó que comentarem pròximament.

Els nivells de carbó intercalats entre els *redbeds* són la clau de la presència d'urani a la mina Eureka, ja que des d'aleshores han actuat com una trampa molt eficaç per a capturar metalls en un procés que es coneix amb el nom de barrera redox (reducció-oxidació). El concepte en el qual es basa una barrera redox no és gaire complicat d'entendre. Els metalls es poden transportar dissolts en aigua si el medi és ric en oxigen. Aquest cas es dona a la major part dels materials que formen els *redbeds*, que ja hem comentat que tenen un característic color vermell perquè el ferro es troba en forma d'òxids. Ara bé, quan els metalls travessen un medi pobre en oxigen (reductor) passa el contrari: els metalls no poden dissoldre's i precipiten en forma de minerals. Un dels agents més eficaços per a produir un medi reductor és, sense dubte, el carbó vegetal.

Així doncs, ja ho tenim. Fa molt de temps, metalls que es transportaven dissolts en fluid aquós que circulava per la porositat dels materials fluvials del *redbed*, van entrar en contacte amb les capes on hi havia el carbó (un material molt reductor). Llavors, els metalls no van poder continuar dissolts i van precipitar, així es van acumular i van formar la mineralització que, posteriorment, es va explotar a la mina Eureka. Cal dir que això va passar quan els sediments encara estaven enterrats, i que els fluids eren hidrotermals, és a dir, tenien una elevada temperatura i alta salinitat.

Tots aquests processos han deixat algunes evidències en el paisatge que són molt fàcils de distingir passejant per la zona. Ja hem comentat que els materials que formen el *redbed* són, característicament, de color vermellós per la presència d'òxids de ferro. Ara bé, a les zones on afloren els nivells que contenen el famós carbó es pot distingir fàcilment que les roques són d'una tonalitat grisa. Això és així perquè el ferro que contenen aquestes roques no es troba oxidat i no genera, per tant, el color vermell característic.

El procés de reducció que propicia la precipitació dels metalls és especialment rellevant en el cas de l'urani. Aquest metall té fins a sis estats de valència química (U^+ , U^{+2} , U^{+3} , U^{+4} , U^+ i U^{+6}), tot i que en els compostos naturals els més comuns són els estats oxidats U^{+6} i U^{+5} , i els mitjanament reduïts U^{+3} i U^{+4} . En els estats oxidats aquest metall és soluble, tal i com ja hem comentat, i, per tant, es pot transportar fàcilment a través d'un fluid que circula per la porositat de les roques. En entrar en contacte amb el carbó, un medi reductor, l'urani es redueix i canvia de valència. En aquest estat reduït, l'urani és insoluble i ja no es pot transportar per un fluid aquós i, per tant, precipita i forma la mineralització de dos minerals principals: la uraninita i la coffinita.

En aquest context poden precipitar molts altres elements que tinguin diferents estats de valència química i que també poden ser víctimes d'aquest procés. Són els anomenats *Redox Sensitive Elements* (RSE, elements sensibles als processos d'oxidació-reducció) entre els quals s'inclouen, a més de l'urani, elements químics com el sofre (S), el ferro (Fe), el fòsfor (P), el molibdè (Mo), l'arsènic (As), el vanadi (V), l'antimoni (Sb), el seleni (Se), el níquel (Ni), el cobalt (Co), el coure (Cu) o el crom (Cr). Aquesta gran concurrència d'elements químics explica perfectament la gran diversitat d'espècies minerals presents a la mina Eureka, on, a més a més, també hi trobem concentracions elevades d'altres metalls com la plata (Ag), el plom (Pb), el bismut (Bi) o el zinc (Zn).

ESPÈCIE	FÓRMULA	ESTADI 1 REDBED / DIAGÈNESI PRIMERENCA	ESTADI 2 MINERA- LITZACIÓ ESTRATOLLI- GADA	ESTADI 3 MINERALIT- ZACIÓ EN VETES	ESTADI 4 MINERA- LITZACIÓ SUPERGE- NICA	ESTADI 5 NEOFORMA- CIÓ
Biotita	$K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	████████				
Feldspat potàssic	$K(AlSi_3O_8)$	████████				
Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	████████				
Plagiòclasi	$(Na,Ca)(Al_2Si_2O_8)$	████████				
Quars	SiO_2	████████				
Anatasa	TiO_2		████████			
Calcita	$CaCO_3$		████████			
Fluorapatita	$Ca_5(PO_4)_3F$		████████			
Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$		████████			
Quars	SiO_2		████████			
Rútil	TiO_2		████████			
Schorl	$Na(Fe^{2+}_3)Al_6(Si_5O_{18})(BO_3)_3(OH)_3(OH)$		████████			
Zircó	$Zr(SiO_4)$		████████			
Anilita	Cu_7S_4			████████		
Aguilarita	Ag_4SeS			████████		
Bismut	Bi			████████		
Bornita	Cu_5FeS_4			████████		
Calcopirita	$CuFeS_2$			████████		
Calcosina	Cu_2S			████████		
Clausthalita	$PbSe$			████████		
Cobaltita	$CoAsS$			████████		
Coffinita	$(U^{4+},Th)(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$			████████		
Covellina	CuS			████████		
Digenita	Cu_9S_5			████████		
Djurleïta	$Cu_{31}S_{16}$			████████		
Esfalerita	$(Zn,Fe)S$			████████		
Gersdorffita	$NiAsS$			████████		
Naumannita	Ag_2Se			████████		

ESPÈCIE	FÒRMULA	ESTADI 1 REDBED / DIAGENESI PRIMERENÇA	ESTADI 2 MINERA- LITZACIÓ ESTRATOLLI- GADA	ESTADI 3 MINERALIT- ZACIÓ EN VETES	ESTADI 4 MINERA- LITZACIÓ SUPERGE- NICA	ESTADI 5 NEOFORMA- CIÓ
Pirita	FeS ₂		██████████			
Plata	Ag		██████████			
Roscoelita	K(V ³⁺ ,Al) ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂		██████████			
Spionkopita	Cu ₃₉ S ₂₈		██████████			
Tennantita	Cu ₆ [Cu ₄ (Fe,Zn) ₂]As ₄ S ₁₃		██████████			
Tetraedrita	Cu ₆ [Cu ₄ (Fe,Zn) ₂]Sb ₄ S ₁₃		██████████			
Uraninita	UO ₂		██████████			
Wittichenita	Cu ₃ BiS ₃		██████████			
Yarrowita	Cu ₉ S ₈		██████████			
Ankerita	Ca(Fe ²⁺ ,Mg)(CO ₃) ₂			██████████		
Bornita	Cu ₅ FeS ₄			██████████		
Calcopirita	CuFeS ₂			██████████		
Digenita	Cu ₉ S ₅			██████████		
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂			██████████		
Galena	PbS			██████████		
Quars	SiO ₂			██████████		
Anglesita	PbSO ₄				██████████	
Annabergita	Ni ₃ (AsO ₄) ₂ · 8H ₂ O				██████████	
Arsenuranylita	Ca(UO ₂) ₄ (AsO ₄) ₂ (OH) ₄ · 6H ₂ O				██████████	
Atzurita	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂				██████████	
Billietita	Ba(UO ₂) ₆ O ₄ (OH) ₆ · 4-8H ₂ O				██████████	
Brochantita	Cu ₄ (SO ₄)(OH) ₆				██████████	
Carnotita	K ₂ (UO ₂) ₂ (VO ₄) ₂ · 3H ₂ O				██████████	
Chenevixita	Cu ₂ Fe ³⁺ ₂ (AsO ₄) ₂ (OH) ₄				██████████	
Cuprosklodowskita	Cu(UO ₂) ₂ (SiO ₃ OH) ₂ · 6H ₂ O				██████████	
Demesmaekerita	Pb ₂ Cu ₅ (UO ₂) ₂ (SeO ₃) ₆ (OH) ₆ · 2H ₂ O				██████████	
Devilleina	CaCu ₄ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ · 3H ₂ O				██████████	
Eritrina	Co ₃ (AsO ₄) ₂ · 8H ₂ O				██████████	
Francevillita	Ba(UO ₂) ₂ (VO ₄) ₂ · 5H ₂ O				██████████	
Guilleminita	Ba(UO ₂) ₃ (SeO ₃) ₂ (OH) ₄ · 3H ₂ O				██████████	
Guix	CaSO ₄ · 2H ₂ O				██████████	
Heinrichita	Ba(UO ₂) ₂ (AsO ₄) ₂ · 10H ₂ O				██████████	
Malaquita	Cu ₂ (CO ₃)(OH) ₂				██████████	
Mimetita	Pb ₅ (AsO ₄) ₃ Cl				██████████	
Montroseïta	(V ³⁺ ,Fe ³⁺)O(OH)				██████████	
Olivenita	Cu ₂ (AsO ₄)(OH)				██████████	
Posnjakita	Cu ₄ (SO ₄)(OH) ₆ · H ₂ O				██████████	
Sengierita	Cu ₂ (UO ₂) ₂ (VO ₄) ₂ · 6H ₂ O				██████████	
Tenorita	CuO				██████████	
Torbernita	Cu(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂ · 12H ₂ O				██████████	

ESPÈCIE	FÓRMULA	ESTADI 1 REDREB/ DIAGÈNESI/ PRIMERENÇA	ESTADI 2 MINERA- LITZACIÓ ESTRATÒLLI- GADA	ESTADI 3 MINERALIT- ZACIÓ EN VETES	ESTADI 4 MINERA- LITZACIÓ SUPERGÈ- NICA	ESTADI 5 NEOFORMA- CIÓ
Trögerita	$(\text{H}_3\text{O})(\text{UO}_2)(\text{AsO}_4) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$					
Tyuyamunita	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$					
Uranofana	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$					
Uranopilita	$(\text{UO}_2)_6(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$					
Vandendriesscheïta	$\text{PbU}_7\text{O}_{22} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$					
Vanuralita	$\text{Al}(\text{UO}_2)_2(\text{V}_2\text{O}_8)(\text{OH}) \cdot 11\text{H}_2\text{O}$					
Volborthita	$\text{Cu}_3(\text{V}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$					
Wulfenita	$\text{Pb}(\text{MoO}_4)$					
Zeunerita	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$					
Vanadinita	$\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$					
Abellaïta	$\text{NaPb}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})$					
Andersonita	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$					
Aragonita	CaCO_3					
Bayleyita	$\text{Mg}_2(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$					
Boltwoodita	$(\text{K},\text{Na})(\text{UO}_2)(\text{SiO}_3\text{OH}) \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$					
Čejkaïta	$\text{Na}_4(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3$					
Compreignacita	$\text{K}_2(\text{UO}_2)_6\text{O}_4(\text{OH})_6 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$					
Gordaïta	$\text{NaZn}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6\text{Cl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$					
Langita	$\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$					
Lavendulana	$\text{NaCaCu}_5(\text{AsO}_4)_4\text{Cl} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$					
Lecoqita-(y)	$\text{Na}_3\text{Y}(\text{CO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$					
Liebigita	$\text{Ca}_2(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$					
Metamunirita	NaVO_3					
Natrouranospinita	$(\text{Na}_2,\text{Ca})(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$					
Natrozippeïta	$\text{Na}_5(\text{UO}_2)_8(\text{SO}_4)_4\text{O}_5(\text{OH})_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$					
Picrofarmacolita	$\text{Ca}_4\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2(\text{HAsO}_4)_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$					
Sanrománita	$\text{Na}_2\text{CaPb}_3[\text{CO}_3]_5$					
Schröckingerita	$\text{NaCa}_3(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3(\text{SO}_4)\text{F} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$					
Thenardita	Na_2SO_4					
Valentinita	Sb_2SO_3					

3.3. Estadis de formació de la mineralització

Com ja hem comentat, a la mina Eureka s'han descrit al voltant d'un centenar d'espècies diferents de minerals, i és probable que aquest número augmenti en el futur. Aquesta associació mineral tan complexa s'ha generat a partir de diferents processos geològics que es poden resumir en cinc estadis diferenciats per tal de facilitar la interpretació de tot el conjunt. A la Taula 3.1 trobareu una relació de totes les espècies minerals descrites fins a l'actualitat, relacionades amb cadascun dels estadis de formació que es detallen a continuació.

Taula 3.1. Llistat dels minerals descrits a la mina Eureka relacionats amb els diferents estadis de formació de la mineralització. Font: Elaboració pròpia.

3.3.1. Formació del *redbed* i diagènesi¹ primerenca

Els minerals més antics del jaciment són aquells que formaven els sediments que van ser arrossegats pels antics rius fa uns 240 Ma i que posteriorment van donar lloc a les roques que actualment formen el *redbed*. En aquest estadi van acumular-se minerals com el quars, la biotita, la moscovita o el feldspat potàssic.

De forma posterior a la deposició d'aquests minerals es van formar alguns altres com és el cas de l'anatasa, el rútil o el schorl (una espècie del grup de la turmalina), entre d'altres.

3.3.2. Mineralització estratolligada. L'acció de la barrera redox

Una cop formades les roques del *redbed*, els nivells que contenien nivells de carbó van actuar com a trampa per a alguns elements metàl·lics segons el procés que ja hem explicat. Aquest procés va donar lloc a la formació de bona part dels minerals metàl·lics i és en aquest estadi en el qual es formen els primers minerals d'urani (uraninita i coffinita), a més de moltes altres fases amb metalls com el coure (Cu), la plata (Ag), l'antimoni (Sb), el bismut (Bi) o l'arsènic (As). De fet, la uraninita és un dels últims minerals que precipita dins la fase de mineralització estratolligada, i així va reemplaçar la majoria dels minerals d'aquesta fase i va envoltar els grans de quars de l'estadi anterior.

3.3.3. Formació de minerals en vetes

Posteriorment es va produir una deformació de les roques, probablement associada a la formació dels Pirineus. Aquest procés va crear fractures a les roques, que es van reomplir més tard amb diferents minerals formant vetes o filons. Les vetes poden distingir-se perfectament en diferents afloraments de la zona i es caracteritzen per contenir minerals del grup dels carbonats com la dolomita i l'anckerita, a més d'alguns minerals metàl·lics, principalment de coure, com és el cas de la bornita, la calcopirita, la calcocita o la digenita.

3.3.4. Mineralització supergènica

Les fases minerals que s'han format en els estadis anteriors poden aflorar a la superfície i interaccionar amb l'oxigen atmosfèric i amb agents meteòrics com la pluja. Aquestes noves condicions, promogudes especialment per l'acció de l'oxigen i l'aigua, provoquen que aquests minerals deixin de ser estables i es transformin, donant lloc a noves fases minerals. Aquest és un

¹ Els geòlegs i mineralogistes utilitzen paraules tècniques com diagènesi i paragènesi per indicar coses que en realitat no són gaire extraordinàries. Diagènesi vol dir, més o menys, formació d'una roca sedimentària a partir dels sediments existents, mentre que paragènesi fa referència al conjunt de minerals que es formen a partir dels mateixos processos geològics.



procés que els geòlegs anomenem alteració supergènica. Aquestes noves fases que es formen a partir de la transformació dels minerals primaris es caracteritzen per tenir colors molt vistosos i són, sovint, minerals molt apreciats pels col·leccionistes. A la mina Eureka, per exemple, el procés d'alteració supergènica va provocar que alguns minerals d'urani com la uraninita i la coffinita, en combinació amb d'altres elements, es transformessin i donessin lloc a la formació de noves fases com la torbernita, la uranofana-alfa o la zeunerita, entre d'altres.

3.3.5. Els minerals de neoformació

El procés d'alteració supergènica, que hem comentat anteriorment, continua desenvolupant-se en l'actualitat. A més, la presència de les galeries de l'antiga mina Eureka ha permès la creació d'un ambient geològic únic per a la formació de gran quantitat d'espècies de minerals. Això és així perquè l'aigua de la pluja percola a través de les galeries i reacciona amb els minerals preexistents donant lloc a la formació de noves fases a les parets de la mina (Fig 3.1). Es tracta de minerals que s'han format en un interval de temps extremadament curt en termes geològics, uns 40 anys, a partir de la lixiviació dels elements químics presents a les roques. La majoria d'aquestes

Figura 3.1. Eflorescències i crostes de minerals supergènics d'urani, de colors groguencs, de formació molt recent, desenvolupats a les parets de la galeria superior de la mina Eureka. Fotografia de Montgarri Castillo.



Figura 3.2. Aflorament del turó de l'Uixer als peus del poble de Castell-estaó. Es pot diferenciar el contrast dels materials grisos entre la resta de nivells de les facies Buntsandstein, de color vermellós característic. És en aquestes capes grises on apareixen els nivells de carbó vegetal i, per tant, on es troba associada la mineralització d'urani i d'altres metalls. Aquest fet es pot comprovar degut a les atractives coloracions (verd, groc, blau, etc.) que tenen els minerals secundaris i que indiquen la presència de la mineralització metàl·lica. Fotografia de Marc Campeny.

fases minerals són excepcionalment rares, com és el cas de l'andersonita, la čejkaïta o l'abellaïta –la joia de la corona–, de les quals parlarem en els capítols 4 i 5.

La majoria de les espècies que es formen durant aquest estadi necessiten unes condicions de temperatura i humitat relativa molt concretes per a generar-se i mantenir-se estables. Alguns exemples són minerals com la compreignacita, que es forma a uns 11 °C i a una humitat relativa del 76%, o la metamunirita, que és molt termosensible i que es manté estable en un rang de temperatura d'uns 13 °C i una humitat relativa del 78%, fora del qual es transforma en altres fases. Aquest també és el cas de la čejkaïta, la qual per mantenir-se estable necessita un rang d'humitat relativa d'entre un 65 i un 80% (per sobre d'aquest rang d'humitat s'iniciaria la dissolució parcial dels cristalls) i un rang de pH restringit d'entre 6.5 i 11.5 (el pH de l'aigua de percolació a les galeries de la mina Eureka és proper a 7).² De fet, s'ha ob-

² En aquest llibre fem servir la notació anglosaxona per als nombres decimals, ja que és la que s'empra habitualment en textos científics.

servat que la *čejkaïta* està present només en el tram de galeria on no hi ha circulació intensa d'aire i se suposa que aquest fet permet mantenir estables les condicions de temperatura i humitat necessàries per a la seva formació. Un darrer cas que cal remarcar és el de l'*andersonita*, que es manté estable en un rang de temperatura d'entre 13 °C i 16 °C i una humitat relativa d'entre el 58 i el 80% i que troba a l'interior de la mina Eureka l'ambient idoni per a poder-se formar.

3.4. L'aflorament de Castell-estaó: un exemple extraordinari per a entendre la presència d'urani a la Vall Fosca

Als peus del poble de Castell-estaó, a la zona del turó de l'Uixer, aflora una sèrie de roques del Triàsic corresponent a les fàcies Buntsandstein de les quals ja hem parlat àmpliament en els capítols i apartats anteriors. En aquesta petita àrea s'observen perfectament les característiques de la mineralització que conté els elements metàl·lics, entre ells l'urani, i que va ser motiu d'exploració de la mina Eureka (Fig. 3.2). Aquest aflorament és un exemple extraordinari a nivell mundial de mineralitzacions metàl·liques associades a *redbeds* i un lloc obligat de peregrinació per a estudiants i científics del camp dels jaciments minerals d'arreu del món. Per aquest motiu us preguem que si visiteu l'aflorament per observar algunes de les característiques que us comentem a continuació, ho feu amb cura i no el malmeteu.

En general, els materials triàsics de les fàcies Buntsandstein formen una sèrie molt potent en el sector dels Pirineus que correspon a la Vall Fosca i, als peus del poble de Castell-estaó, hi ha uns trams d'aquests materials formats per gresos, lutites i conglomerats de més de 100 metres de potència i que cabussen uns 60° en direcció sud. Entre aquest conjunt de materials, destaca un tram d'uns 6 metres de potencia constituït per bancs de microconglomerats i sorres grolleres, intercalats entre sorres de gra molt fi i lutites, tot ell de color típicament gris i que conté passades de carbó vegetal (Fig. 3.3). La base del tram mineralitzat reposa mitjançant un contacte erosiu sobre la part superior d'un tram de lutites vermelles laminades de la mateixa formació.

Aquest tram conté la mineralització metàl·lica finament disseminada, la qual està directament associada als nivells més rics en matèria orgànica segons que hem explicat en els apartats anteriors. De fet, als nivells grisos és fàcil observar crostes de minerals secundaris de coure de color verd-blau; mentre que també hi ha diàclasis que estan reblertes de mineralitzacions secundàries d'urani que presenten vius colors groguencs. Ambdues coloracions són grans indicadores de la presència de minerals metàl·lics que

s'estan oxidant en contacte amb l'atmosfera i que corresponen a la fase que anteriorment hem anomenat *supergènica*.

Tots aquests materials formen part de seqüències d'encavalcaments associats a l'orogènia Alpina, de manera que es troben fortament deformats, amb basculament de la sèrie i desenvolupament de falles inverses i diàclasis. De fet, en alguns dels nivells detrítics més grollers de l'aflorament és palesa la presència de diàclasis (fractures sense desplaçament de la roca) verticals reblertes amb carbonats i que contenen també sulfurs disseminats. Les vetes tenen una amplada, com a molt, de 5 centímetres i s'hi reconeix a ull nu una mineralització de coure en forma de grans mil·limètrics de calcocita, calcopirita, covel·lina i bornita disperses entre una ganga de quars, dolomita i ankerita. Aquesta mineralització és la que hem descrit anteriorment com la *mineralització en vetes* i es forma durant la fase principal de compressió alpina. A l'aflorament de Castell-estaó s'hi poden distingir vetes deformatades testimoni d'aquest procés de plegament, com per exemple, una mena d'estructures en forma de botifarró que es coneixen amb el nom de *boudins* i que es formen degut a la diferent competència i resistència dels materials a ser deformats (Fig. 3.4).

Com hem comentat anteriorment, la mineralització de tipus supergènic també es troba molt desenvolupada en aquest aflorament, i consta d'una associació mineral molt complexa, amb minerals oxidats de coure, urani, vanadi, níquel, cobalt o arsènic, que es disposen en forma de fines crostes pulverulentes de menys de 100 micròmetres de gruix. Aquestes crostes es poden trobar directament a sobre dels paquets mineralitzats, però en molts



Figura 3.3. Nivell de carbó vegetal de potència centimètrica intercalat entre els nivells grisos dels materials del Triàsic. És a aquests nivells de carbó als quals s'associa directament la mineralització metàl·lica estratoligada. Fotografia de Marc Campeny.



casos arriben a impregnar zones de l'aflorament allunyades de la mineralització primària. Aquests minerals secundaris es formen sobretot per alteració dels nivells més rics de la mineralització estratolligada, però també de les vetes. És una mineralització volumètricament molt poc important, però molt fàcilment visible i útil en l'estudi de la zona i per a detectar la presència dels minerals metàl·lics primaris.

A l'aflorament no trobarem els minerals de neoformació com l'abellaïta, ja que, tal i com hem comentat, aquests només es formen en condicions molt concretes de temperatura i humitat relativa i són inestables a la intempèrie.

Figura 3.4. Veta de dolomita i ankerita amb presència de minerals metàl·lics de coure de gra fi (principalment calcocita i bornita). Es pot apreciar que la morfologia de la veta està clarament deformada i presenta una estructura tipus boudin. Fotografia de Marc Campeny.