

# Masa-espektrometria bidezko prozedura analitiko berrien garapena Geokimika Isotopikoan eta haien aplikazioa presio altuko arroka metamorfikoen azterketan

(Development of new analytical procedures of isotope geochemistry by mass spectrometry and its application to the study of high-pressure metamorphic rocks)

Aratz Beranoaguirre<sup>1,\*</sup>, Jose Ignacio Gil Ibarguchi<sup>2</sup>, Pablo Puellas Olarte<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME) eta Mineralogia eta Petrologia Saila, UPV/EHU

<sup>2</sup> Mineralogia eta Petrologia Saila, UPV/EHU

<sup>3</sup> Geodinamika Saila, UPV/EHU

\* aratz.beranoaguirre@ehu.eus

DOI: 10.1387/ekaia.17774

Jasoa: 2017-04-27

Onartua: 2017-07-18

**Laburpena:** Geokimika Isotopikoak/Geokronologiak azken hamarkadetan izan duen bilakaerak hainbat teknika analitikoren hobekuntza eragin du, gerriko metamorfikoen tektonikaren gaineko informazioan iraultza eraginez. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) berriazko tresneria analitikoaren jabe da, munduan gehien erabiltzen diren metodo geokronologikoen inplementazioa eta hobekuntza ahalbidetuz. Lan hone-tan, Rb-Sr eta Lu-Hf sistemak MC-ICP-MS bidez analizatzeko metodologia garatu da alde batetik, eta Hf-Hf eta U-Pb sistemak LA-ICP-MS bidez neurtzeko teknikak beste-tik. Teknika horiek Iberiar mendigunearen ipar-mendebaldeko Malpica-Tui eta Cabo Ortegal Konplexu Aloktonoetako presio altuko arroka metamorfikoen dataziorako eta trazaketarako erabili dira.

**Hitz gakoak:** Geokronologia, masa-espektrometroa, arroka metamorfikoa.

**Abstract:** The development of Isotope Geochemistry/Geochronology has triggered many technical improvements in the past decades and has revolutionised the potential information available on the tectonics of metamorphic belts. The University of the Basque Country (UPV/EHU) has acquired the specific analytical equipment, which has

allowed the implementation and improvement of several of the worldwide most used geochronological methods. In the present work, techniques for Rb-Sr and Lu-Hf analysis by MC-ICP-MS, and Hf-Hf and U-Pb analysis by LA-ICP-MS have been developed. These techniques have been employed to date and trace the origin of high-pressure rocks from the Malpica-Tui and Cabo Ortegal Allochthonous Complexes of the NW Iberian Massif.

**Keywords:** Geochronology, mass spectrometer, metamorphic rock.

## 1. SARRERA

«Zein da Lurraren adina?» Galdera horri erantzun bat eman nahiak giza-kiaren pentsaeran eragin ikaragarria izan du mendeetan zehar. Geologiaren sorrerarekin kontu hori objektiboagoa bilakatu zen; zientzialariek adin erlatiboetan oinarritutako denbora-eskala geologikoa garatzen hasi baitziren. Erradioaktibitatearen aurkikuntzak mugari garrantzitsua ezarri zuen arroken datazioari dagokionez, berau erloju moduan erabil zitekeela ohartu baitziren. 1907an lehen datazio erradiometrikoak argitaratu ziren [1], Geokronologia, Lurreko materialen adina neurtzen duen lur-zientzien adarra, jaiotzeko.

Azken hamarkadetan Geokimika Isotopikoan zein Geokronologian egin diren hobekuntza instrumentalek aukera sorta zabala sortu dute, arroka metamorfikoetan lor daitekeen informazioa ikaragarri zabalduz. Horrela, klasikoak ziren geokronometroei, U-Pb edo Rb-Sr kasu, Lu-Hf edo Re-Os bezalako sistemen analisiak gehitu zaizkie. Hobekuntza horiek masa espektrometro berrien merkaturatzearekin batera gertatu dira. XX. mendean ionizazio termikoan oinarritutako TIMS instrumentuekin egiten ziren analisisirik gehienak, 80. hamarkadan induktiboki akoplatutako plasma iturridun masa-espektrometroak (ICP-MS) agertu ziren arte. 90. hamarkadaren erdialdera, ICP tresnak masa-iragazki magnetiko edo/eta detektagailu anitzeko sistema batez hornitu ziren, eta detektagailu anitzeko induktiboki akoplatutako plasma iturridun masa-espektrometroak (MC-ICP-MS) eta induktiboki akoplatutako plasma iturridun masa-espektrometro kuadrupolarrak (Q-ICP-MS) agertu ziren [2].

Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) aipatutako ekipoen jabe da, eta horien erabileran aurrerapausoak eman nahian garatu diren teknika ezberdinak aurkezten dira artikulu honetan.

## 2. TRESNERIA

Lana bi masa-espektrometro ezberdinen bidez egindako analisisietan oinarritzen da: alde batetik, MC-ICP-MSa, zeinetan laginak solido- zein likido-egoeran analizatu diren, eta bestetik, Q-ICP-MSa, zeinetan solido-egoe-

ran sartutako laginak neurtu diren, horretarako Nd:YAG solido-egoerako laser ablazio-sistema erabiliz. Ekipoak Geokronologia eta Geokimika Isotopikoaren Zerbitzuari (IBERCRON) dagozkio, UPV/EHUren Ikerkuntzarako Zerbitzu Orokorren (SGIker) barruan.

### 3. GARATUTAKO TEKNIKAK

#### 3.1. Rb-Sr sistema

Rb-Sr bikotea prozesu geokimikoetako isotopo trazatzaile bezala erabili daiteke, baita geokronometro bezala ere,  $^{87}\text{Rb}$ -tik  $^{87}\text{Sr}$ -rako desintegrazio erradioaktiboa dela eta [3]. Rubidioak potasioaren antzeko ezaugarriak ditu eta potasiodun mineraletan, miketan edo feldespatu potasikoan kasu,  $\text{K}^+$  ordezkatzeko ahalmena dauka. Estrontzioak, berriz, kaltzioa ordezkatzeko joera izaten du. Ezaugarrien ezberdintasuna dela eta, elementu biak frakzionatu egiten dira eta Rb-Sr arrazoi ezberdinak dituzten mineralak kristaltzen dira. Ondorioz, isokrona metodoaren bidez datazio erradiometrikoak kalkulatzeko aukera ematen dute.

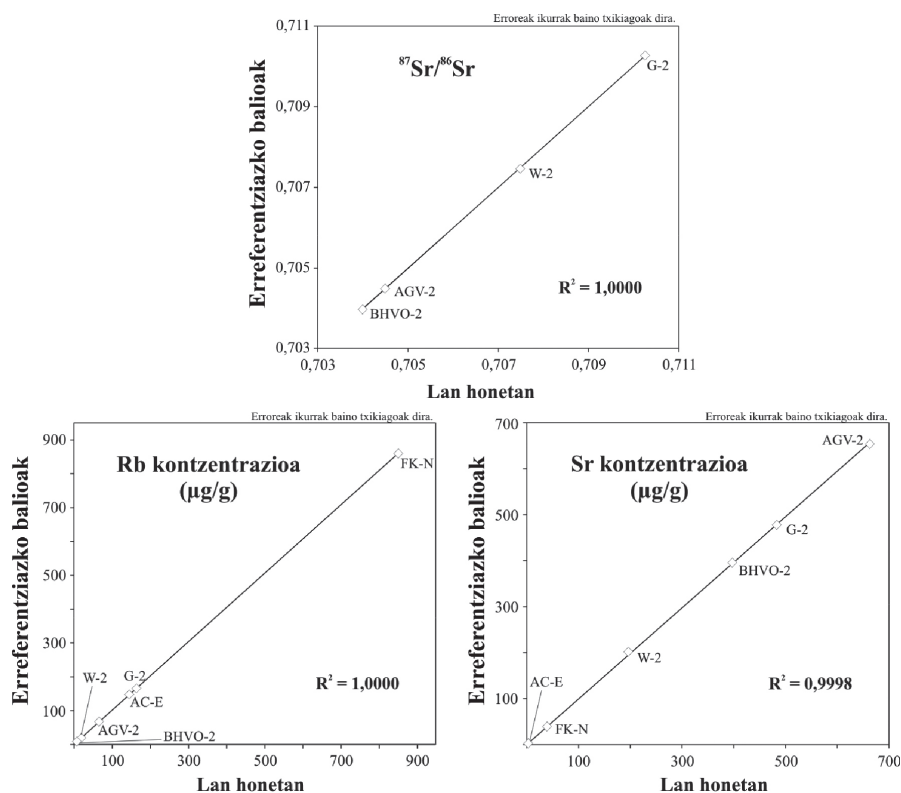
Isotopoen arrazoiak neurketa egin aurretik, lagina era egokian prestatu behar da, lagina azido ezberdinekin disolbatuz eta  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  arrazoiak ahalik eta zehatzen eta zuzenen neurtzeko ezinbestekoa den trazatzailea, isotopo jakin batean aberastuta dagoen disoluzioa, gehituz. Ondoren, intereseko elementuak gainerako elementuetatik isolatzea beharrezkoa da, masa/karga = 87an gerta daitekeen interferentzia isobarikoa ekiditeko. Laginak bi banaketa-prozesu jasaten ditu, erauzte eta katioi-truke kromatografian oinarritutako erretxina ezberdinekin [4]. Erretxina eta azido ezberdinen aurrean duten portaera ezberdinak Rb-aren eta Sr-aren isolamendua ahalbidetzen du. Elementuak isolaturik daudenean, MC-ICP-MSan neurtzen dira.

Metodoa balioztatzeko, hau da, laginaren disoluzio-prozesua, banaketa kimikoa eta neurketak egokiak direla baieztatzeko, ezagunak diren nazioarteko erreferentziako estandarren analisiak egiten dira. 1. irudian, erreferentziako material desberdinetan lortutako  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  arrazoiaren, Sr eta Rb kontzentrazioen balioen konparaketa egiten da. X ardatzean lan honetan aurkeztutako metodoaren bitartez lortutako balioak azaltzen dira, eta Y ardatzean, berriz, bibliografiako balioak. Ikus daitekeen moduan, datuen arteko korrelazioa ezin hobea da.

#### 3.2. Lu-Hf sistema

Lu-Hf bikotea ere isotopo trazatzaile eta geokronometro bezala erabiltzen da,  $^{176}\text{Lu}$ -ak  $^{176}\text{Hf}$ -rako desintegrazioa erakusten baitu [5]. Prozesu geokimiko askok bi elementu horien banaketa handia eragiten dute, gor-

putz geologiko beraren barnean ezaugarri geokimiko ezberdinak dituzten erreserborio bereizgarriak ahalbidetuz. Zehazki, Lu-a erraz sartzen da granate, apatito edo lawsonitaren kristal-egituraren barruan, Hf-a mineral osagarri jakin batzuekin soilik (zirkoaia, rutiloa) bateragarria den bitartean.

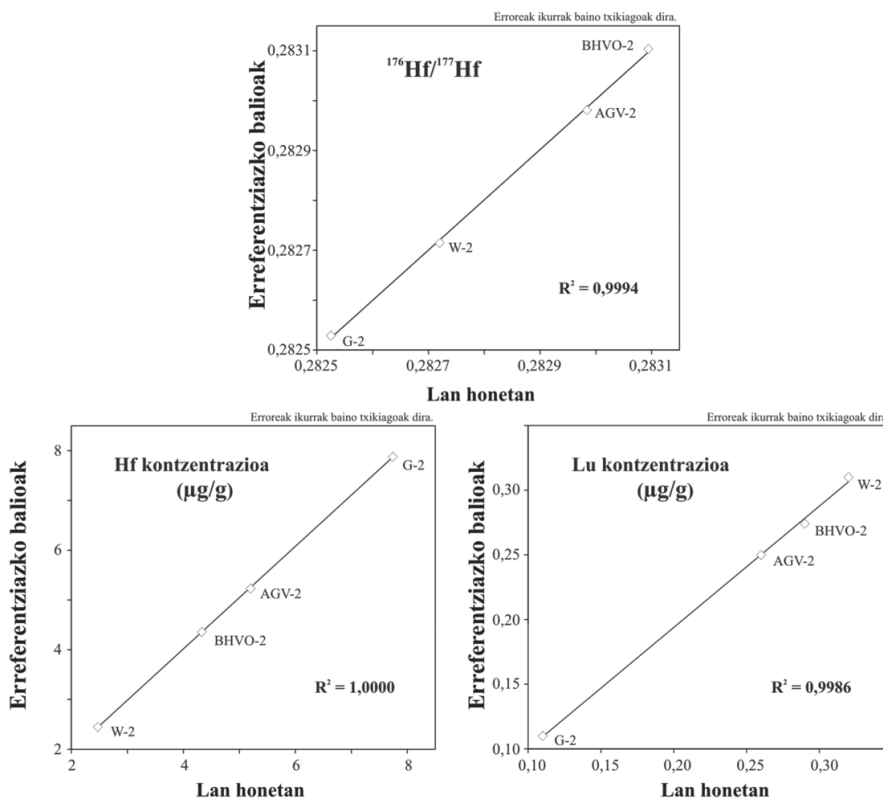


**1. irudia.** Erreferentziako material desberdinetan, gure laborategietan lortutako balioen eta bibliografiako balioen arteko konparaketa grafikoa, Rb-Sr sistemari dagokionez.

Aipatutako mineral osagarriak Hf-aren erreserborio nagusiak dira; beraz, horiek disolbatu ala ez, lortuko den emaitzaren esanahia ezberdina izan daiteke. Horregatik, laginaren disoluzio-prozesua helburuaren arabera da. Mineral horiek disolbatzeko fusio bidezko eraso egin da, laginean dagoen Hf guztia disoluziora pasa dela ziurtatuz. Helburua arroka baten Hf konposizioa aztertzea bada (banatutako mineralena), azidoen bidezko eraso egokiagoa da, erregogorrek diren mineralak disolbatu gabe uztea ahalbidetzen baitu. Kasu horretan ere, ezinbestekoa da trazaile baten gehitzea.

$^{176}\text{Yb}$ ,  $^{176}\text{Lu}$  eta  $^{176}\text{Hf}$  isotopoek elkarren gaineko interferentziak sortzen dituztenez, beharrezkoa da Yb-a, Lu-a eta Hf-a isolatzea MC-ICP-MSan analisiak egin aurretik. Banaketa aurrera eramateko, katioi-truke eta erauzte-kromatografian oinarritutako erretxinak erabiltzen dira.

Lehenago egin den bezala, metodoa balioztatzeko ezagunak diren erreferentziako estandarren analisiak egin dira (2. irudia), datuen arteko korrelazioa ona izanik berriz ere.



**2. irudia.** Erreferentziako material desberdinetan, UPV/EHUn lortutako balioen eta bibliografiako balioen arteko konparaketa grafikoa, Lu-Hf sistemari dagokionez. Erroreak ikurrak baino txikiagoak dira.

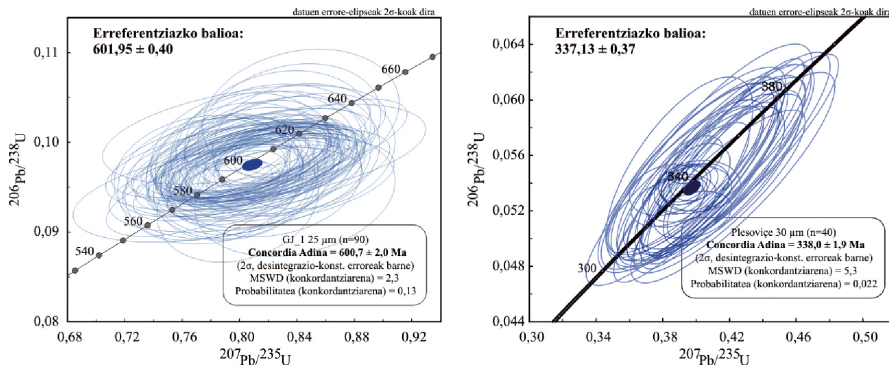
### 3.3. U-Th-Pb sistema

Geologian, gehien erabiltzen den geokronometroa U-Th-Pb sistema da, batez ere zirkoiaren datazioarako. Sistema horretan 3 desintegrazio-sistema bereizten dira, uraniotik berunerako desintegrazio bi eta toriotik berunerako

beste desintegrazio bat [6]. U-a eta Th-a elementu ez-bateragarriak dira eta zirkoia edo monazita bezalako mineral osagarrietan kontzentratzeko joera dute, berunak ez bezala. Horrek hiru elementuen banaketa dakar mineral ezberdinetan, U/Pb eta Th/Pb arrazoi ezberdinak emanez eta adin erradiometrikoen kalkuluak ahalbidetuz.

U-Th-Pb sistemaren analisi isotopikoak Q-ICP-MSari akoplatutako laser ablazio-sistemaren bidez gauzatzen dira, geologian erabiltzen diren xfla petrografikoan zuzenean.

Aurreko teknikan ez bezala, laser-ablazio bidezko analisisetan ez dago elementu ezberdinen banaketarik eta horrek hainbat arazo eragin ditzake. Analisi bakoitzeko datuak gordinean aztertzen dira, analisiak asalda ditzakeen zerbait dagoen ikusteko, besteak beste, inklusioak, hausturak edo adin desberdinetako domeinuen nahasketa. Horrelako teknikekin egindako analisisiek zatikapen eta jito instrumental nabariak dituzte, eta horiek zuzentzeko nazioarteko estandarrak laginekin tartekatzen dira. Balioztapenerako erabiltzen diren zirkoietan lortutako emaitzak bat datoz argitaratutako datuekin (3. irudia).



**3. irudia.** GJ-1 eta Plešovice zirkoien estandarretan egindako U-Pb analisisien Concordia motako diagramak.

### 3.4. Hf-Hf sistema

Lu-Hf sistemaren ezaugarriak direla eta, Hf-aren konposizio isotopikoa mineral jakin batzuen trazatzaile gisa erabiltzeko aukera ere badago. Zirkoioaren jokoera geokimiko antzekoa daukanez, Hf-ak zirkoia bezalako mineraletarako bateragarritasun handia dauka eta horien kristal-egituran harapatuta geratzen da, Lu-a ez bezala. Ondorioz,  $^{176}\text{Hf}$  erradiogenikoagatik Hf-aren konposizio isotopikoan gerta daitezkeen aldaketak baztergarriak

dira, hau da, zirkoiak kristalizatu ziren jatorriko  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  arrazioak mantentzen ditu. Hori benetan interesgarria da Hf konposizio isotopiko ezberdinetan (baldintza geologiko ezberdinetan) hazitako kristal baten domeinu ezberdinen azterketa ahalbidetzen duelako.

Analisi horiek ere laser-ablazio bidez egiten dira, baina kasu hone-tan MC-ICP-MSaren laguntzarekin eta prozeduraren balioztapenerako gehien erabiltzen diren lau zirkoi estandarrek analizatu dira (1. taula). Zirkoi horiek  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  arrazio eta Yb kontzentrazio sorta zabala har-tzen dituzte baitan, azkena zuzenketak era egokian egiten direla baieztat-zeko.

**1. taula.** Zirkoi estandarren  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  erreferentziazko balioak, disoluzio eta laser-ablazio bidezko analisietarako, eta lan honetan lortutako emaitzak. Erroreak  $2\sigma$ -koak dira; «n» analisi kopurua da.

	Onartutako Balioak		Lan honetan	
	Disoluzioa	Laser Ablazioa	Emaitza	n
GJ-1	$0,282000 \pm 5$	$0,282015 \pm 29$	$0,282003 \pm 17$	44
91500	$0,282306 \pm 8$	$0,282299 \pm 26$	$0,282288 \pm 15$	10
Mudtank	$0,282507 \pm 6$	$0,282522 \pm 19$	$0,282508 \pm 13$	20
Plešovice	$0,282484 \pm 8$	$0,282486 \pm 28$	$0,282472 \pm 12$	20

## 4. APLIKAZIOA

### 4.1. Eskualde geologikoa

Aztertutako laginak Iberiar mendigunearen ipar-mendebaldeko sek-zioan bildu dira, eta Europako Gerriko Variskarraren azaleramendu men-debaldekoenei dagozkie. Gerriko Variskarra Laurasia eta Gondwana konti-nenteen arteko talkaren emaitza da Paleozoiko berantiarrean, Pangea azken superkontinentea eratu aurretik. Iberiar penintsularen NWean, arroka ma-fiko eta ultramafiko ugari dituzten 5 konplexu metamorfiko aurki daitezke: Malpica-Tui, Cabo Ortegal, Ordenes, Bragança eta Morais. Azertu diren arrokak lehen biei dagozkie. Konplexu horiek subdukzio maila ezberdinak jasandako litosfera ozeaniko edo/eta kontinental zatiak dira, Orogenia Va-riskarrean Gondwanaren ertzaren gaineko obdukzioa pairatu zutenak [7]. Konplexuen barnean 3 unitate estruktural nagusi bereiz daitezke: tenpera-tura baxu-ertaina/presio altua duen Behe Aloktonoa azpialdean, Konplexu Ofiolitikoa erdian eta tenperatura altua/presio altua duten arrokak dituen Goi Aloktonoa.

Cabo Ortegal Konplexua batez ere Konplexu Ofiolitikoari eta Goi Aloktonoari dagozkion teilakatutako mantu unitatez osatzen da. Bertan, jatorri ozeanikodun presio altuko arroak azaleratzen dira, besteak beste, presio altuko granulitak, eklogitak, metaperidotitak, orto- eta para-gneisak, metagabroak eta metaserpentinitak [8]. Malpica-Tui Konplexua Behe Aloktonoko unitatez osatzen da batez ere, eta arrokek dituzten ezaugarriek jatorri kontinental eta kontinental/ozeaniko trantsizionala iradokitzen dute. Konplexu horretan, heterogeneoki deformatutako arroka sedimentario eta igneo multzoa azaleratzen da, hala nola, eskisto berdeak, anfibolitak, eklogitak, ortogneisak eta arroka metasedimentarioak [9].

#### **4.2. Laginen deskribapena eta emaitzak**

Malpica-Tui Konplexuan bi eklogita aztertu dira: eklogita arrunta eta muskobitadun eklogita. Arroka biak erlazionatuta agertzen dira azalera-menduetan eta kimikoki ere antzeko konposizioa daukate, eboluzio magmatiko berberaren produktuak direla iradokiz. Kalkulatutako presio- eta tenperatura-baldintzak 2,6 GPa eta 610°C-ko balio maximoetaraino helitzen dira [9]. Eklogita arruntek pikor tamaina fin-ertaina dute, eta orekan dagoen mineral-elkartea klinopiroxeno eta granatez eratzen da batez ere, kuartzo, rutilo, zoisita eta zianita kantitate txikiekin. Anfibolak mineral sekundario moduan agertzen dira. Muskobitadun eklogitek pikor tamaina finagoa erakusten dute, eta erretrogresio arinagoa jasan dute. Orekan dagoen mineral-elkartea heterogeneoagoa da eta ondoko mineralez eratzen da: klinopiroxenoa, granatea, kuartzoa, anfibola, muskobita eta zoisita; rutilo, apatito eta zirkoi gutxi batzuekin.

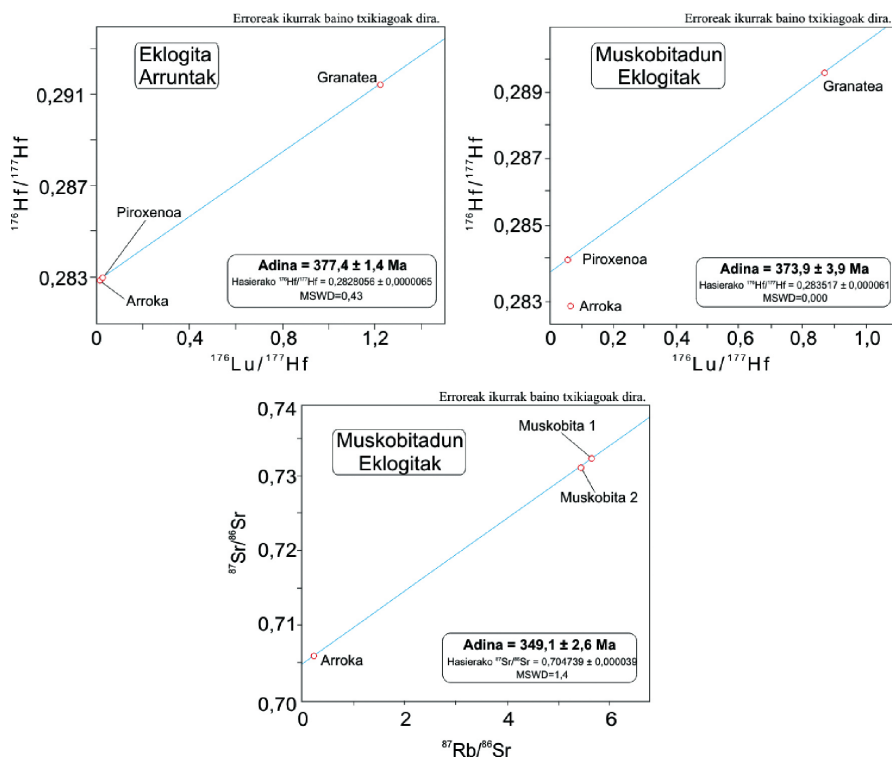
Rb-Sr eta Lu-Hf geokronologia aztertzeke, banatutako mineralen eta arroka osoaren analisia egin dira, Rb-Sr sistemarako muskobitak eta Lu-Hf sistemarako granate eta piroxenoak banatu direlarik. Emaitzak 4. irudian ikus daitezke. Lu/Hf adinak, 375 Ma inguru, presio altuko metamorfismoarekin, subdukzioarekin, lotu ohi dira eta Rb/Sr adinak, 350 Ma, exhumazio edo obdukzioarekin. Muskobitadun eklogitako analisisiek ez dute isokrona on bat irudikatzen, eta kasu horretan, arroka osoaren analisia gaitzetsi egin da; petrografikoki, piroxeno eta granatearen artean oreka dagoela ziurtatu baitaiteke.

Cabo Ortegal Konplexuan datatu den migmatita Goi Aloktonoari dago. Landan erraz identifikatzen diren arroak dira fusio partziala jasan dutelako. Orekan dagoen mineral-elkartea ondoko mineralek osatzen dute: granatea, muskobita, kuartzoa, feldespatu potasikoa, plagioklasa eta zoisita, eta lagin jakin batzuetan baita biotita eta zianita ere. Kalkulatutako presio- eta tenperatura-baldintzak 1,8 GPa eta 800°C-koak dira [10].

Dena dela, arrokaren ezaugarriak interesgarriena zirkoiaren ugaritasuna da. Mikroskopio elektronikoaren bidez egindako argazkietan bi motatako



*Masa-espektrometria bidezko prozedura analitiko berrien garapena  
Geokimika Isotopikoan eta haien aplikazioa presio altuko arroka  
metamorfikoen azterketan*

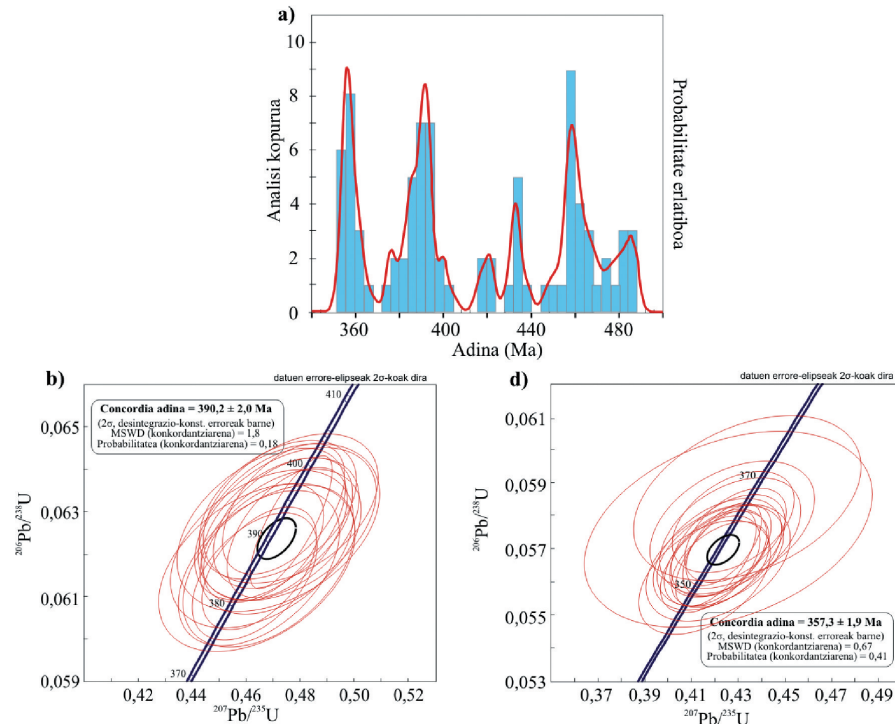


**4. irudia.** Malpica-Tui Konplexuko laginetan lortutako Lu-Hf eta Rb-Sr adinak.

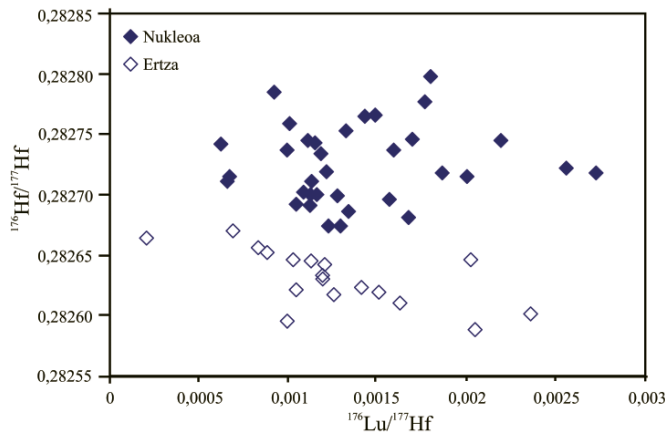
zirkoia ezberdindu daitezke: zonazioa erakusten duten zirko handiak (400  $\mu\text{m}$ -rainokoak) eta zirko txiki homogeneoak (25-30  $\mu\text{m}$ ). Zirko horiek U-Pb eta Hf-Hf analisiak egiteko erabili dira.

U-Pb sistemarekin lortu diren adinak 5a. irudian ikus daitezke. Adinik zaharrenak, 460 Ma eta 480 Ma, zirkoien nukleoetan lortu dira. 390 Ma inguruko adinak zirkoien ertzei dagozkie (5b. irudia); adinik gazteenak, 357 Ma (5d. irudia), zirko txiki homogeneoetan lortu direlarik. 420-440 Ma-ko eremua adin diferenteetako domeinuen nahasketak da.

Hf-Hf analisei dagokienez, zirko handien analisiak baino ez dira egin, zirko txikiak ez direlako teknikak behar duen gutxiengo tamainara iristen. 6. irudian ikus daitezkeen moduan, bi multzo bereiz daitezke.



**5. irudia.** Cabo Ortegalen migmatitaren datazioak. **a)** U-Pb analisien histograma; **b)** zirkoi handien ertzetako analisien U-Pb Concordia diagrama; **d)** zirkoi txiki homogeneoen analisien U-Pb Concordia diagrama.



**6. irudia.** Cabo Ortegalen zirkoiengan analizatutako  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  -  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  grafikoa.

### 4.3. Interpretazioa

Aurkeztutako datuek, behaketa petrografikoen laguntzarekin betiere, Konplexu Aloktonoetako arroka metamorfikoak Devoniarrean gertatutako subdukzio-exhumazio ziklo bakar bati lotuta daudela iradokitzen dute, kontinenteen arteko talkarekin zigiturik geratzen dena.

Protolitoen adin Kanbro-Ordoviziarra ondo finkatuta zegoen lehendik ere, eta migmatitetan lortutako adinak arku bolkaniko baten lurrazal sako-neko galdatuen sorrera moduan interpretatzen dira. Arroka ezberdinetan eta teknika ezberdinen bidez lortutako adin erradiometrikoek sendo iradokitzen dute orain dela 390 Ma presio altuko metamorfismoa eragin zuen subdukzio-prozesu bat gertatu zela Iberiar penintsulako NWko Konplexuetako Goi Aloktonoan, Cabo Ortegalen. Lurperatze sakonenean arroka batzuk urtzera heldu ziren, eta Hf isotopoen azterketatik, sistema ireki egin zela ondoriozta daiteke; hau da, inguruko unitateekin elementu-trukaketa egon zela, sistema itxi batean zirkoiaren ertzetako Hf arrazoiak nukleoentakoak baino handiagoak beharko bailukete. Behe Aloktonoetako subdukzioa orain dela 375 Ma gertatu zen, Reiko Ozeanoaren zabalera txikia zela iradokiz.

Muskobitaren Rb-Sr geokronometroaren ezaugarriak kontuan hartuta, Lu-Hf adinetik gertuago legokeen Rb/Sr adina espero zitekeen, are gehiago landan ikus daitezkeen ezaugarri estrukturalekin. Lortutako adinak beste-lako interpretazio bat egitera garamatza, Rb-Sr datuak zirkoi txikietan lortutako emaitzekin gutxi gorabehera bat datozela kontuan hartuta gainera. Lortutako datu horiek subdukzio-prozesuan askatutako fluidoaren aktibitate garrantzitsu batekin lot daitezke, horrelako testuinguru batean ohikoa dena bestalde. Fluido horien aktibitatea da, hain zuzen ere, Rb-Sr sistemaren irekiera eta zirkoi txikiaren kristaltzea ekarriko lukeena.

Fazie, litologia eta unitate multzo guztiak Reiko Ozeanoaren itxieragatik zigitatuta geratuko lirake; azkenik, Karbonifero garaian, kontinenteen arteko talka, Gondwanaren gaineko zamalkadura eta granitoen intrusioa gertatu zen [11].

## 5. ONDORIOAK

Azken urteetan Geokronologian eman diren aurrerapenak orain dela gutxi arte sinestezinak diren maila analitikora heldu dira. Lan honetan, UPV/EHUko laborategietan modu egokian garatu diren lau metodologia berri aurrera eraman dira, teknika analitiko eta sistema isotopiko bakoitzak dituen arazo eta berezitasunak arrakastarekin ebatziz. Horrela, Rb-Sr, Lu-Hf, U-Pb eta Hf-Hf analisiak egiteko aukera zientzia-komunitatearen esku geratzen da.

Teknika horien azken helburua prozesu geologikoak interpretatu ahal izateko behar diren datu geokimiko eta geokronologikoak eskuratzea da. Kasu honetan Iberiar penintsulako Konplexu Aloktonoetako laginak aztertu dira, ondokoa ebatziz: Konplexuak Devoniarrean gertatutako subdukzio-exhumazio ziklo baten produktu dira. Goi Aloktonoen lurperatze maximoan sistema ireki egin zen, baita partzialki urtu ere. Behe Aloktonoaren subdukzioa goi-unitateena baino 15-20 Ma beranduago gertatu zen. Rb-Sr datuek eta zirkoi berrien kristaltzeak fluidoaren aktibitate garrantzitsua iradokitzen dute exhumazio-prozesuan zehar.

## ESKER ONAK

Artikulu hau UPV/EHUK finantzaturako GIU09/61 proiektuari eta Espainiako Gobernuak finantzaturako CGL2008-01130/BTE proiektuari esker burutu da. Aratz Beranoaguirre egileak Espainiako Gobernuaren FPU AP2008-00746 bekaren diru-laguntza ere jaso du.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] BOLTWOOD, B., 1907. «The Ultimate Disintegration Products of the Radio-active Elements. Part II. The disintegration products of uranium». *American Journal of Science*, **23**, 77-88.
- [2] SCHALTEGGER, U., SCHMITT, A.K. eta HORSTWOOD, M.S.A. 2015. «U-Th-Pb zircon geochronology by ID-TIMS, SIMS, and laser ablation ICP-MS: Recipes, interpretations, and opportunities». *Chemical Geology*, **402**, 89-110.
- [3] HAHN, O., STRAMANN, H., MATTAUCH, J. eta EWALD, H. 1943. «Geologische Altersbestimmungen nach der Strontiummethode». *Chemiker Zeitung*, **67**, 55-56.
- [4] PIN, C. eta SANTOS ZALDUEGUI, J.F. 1997. «Sequential separation of light rare-earth elements, thorium and uranium by miniaturized extraction chromatography: Application to isotopic analyses of silicate rocks». *Analytica Chimica Acta*, **339**, 79-89.
- [5] PATCHETT, P.J. eta TATSUMOTO, M. 1980. «A routine high-precision method for Lu-Hf isotope geochemistry and chronology». *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **75**, 263-267.
- [6] STEIGER, R.H. eta JÄGER, E. 1977. «Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry». *Earth and Planetary Science Letters*, **36**, 359-362.
- [7] RIES, A. eta SHACKLETON, R.M. 1971. «Catazonal complexes of north-western Spain and north Portugal; remnants of a hercynian thrust plate». *Nature*, **234**, 65-69.

- [8] GIL IBARGUCHI, J.I., ÁBALOS, B., AZCÁRRAGA, J., MENDIA, M.S. eta PUELLES, P., 2000. A petrological and structural excursion through the high-grade/high-pressure allochthonous units of the Cabo Ortegal Complex (NW Spain). Basement Tectonics 15, Mid-Conference Field Trip Guide, Int. Basement Tectonics Assoc., A Coruña.
- [9] RODRÍGUEZ, J. 2005. Recristalización y deformación de litologías supracorticales sometidas a metamorfismo de alta presión (Complejo de Malpica-Tui, NO del Macizo Ibérico). Nova Terra 29, Universidade da Coruña.
- [10] BERANOAGUIRRE, A. 2010. *Petrology of subduction-related, high-pressure migmatites within granulites of the Cabo Ortegal complex (NW Iberian Massif)*. MsC thesis, Universidad de Granada.
- [11] STAMPFLI, G.M., HOCHARD, C., VÉRARD, C., WILHEM, C., eta VON RAUMER, J., 2013. «The geodynamics of Pangea formation». *Tectonophysics*, **593**, 1-19.