

Rift Sistema Afro-Arabiarra: kontinenteen apurketatik ozeanoen sorrerara

Arturo Apraiz

Geodinamika Saila (UPV/EHU)

Laburpena: Afrikako ekialdeko rift sistema delako egitura magmatikoak rifting prozesuren urrats guztiak biltzen ditu, riftaren hasieratik kontinenteen apurketara eta ozeanoen zabalkuntzaraino. Tokirik egokiena da, zalantzarik gabe, bai kontinenteetan estentsioz garatutako egiturak aztertzeko, bai litosferako plaken apurketa ulertzeko eta bai kontinentean zehar hedatutako deformazioa progresiboki ozeano gandarretan nola pilatzen den finkatzeko. Artikuluan Afrikan eta Arabian estentsioarekin harremanetan dauden 4 eremu nagusiren egitura orokorra eta bolkanismoaren eta tektonikaren arteko harremanak laburbiltzen dira: Itsaso Gorria, Adengo Golkoa, Afarko depresioa eta Afrikako rifta). Lurrean haurtutako guztietan badirudi estentsioa duela 30 Ma hasi zela une berean basalto-plataforma izugarri handi baten oso epe laburreko erupzioarekin batera. Horren arabera, pentsa daiteke luma gorakor batek eragin nabarmena izan duela Tertiarioan zehar lurraldean gertatutako deformazioan. Hala bada, zergaitik gertatu da jada kontinenteko litosferaren apurketa Itsaso Gorria edo Adengo Golkoa bezalako zenbait eremuetan, eta Afrikako ekialdeko rifta eta Afar depresioa bezalako beste zenbaitetan ez? Hau aztertuz, kontinenteen apurketa eta banaketa nola eta zergaitik gerta daitezkeen uler dezakegu eta, era berean, noizbait Afrika apurtuko ote den jakitera ere hel gaitzke.

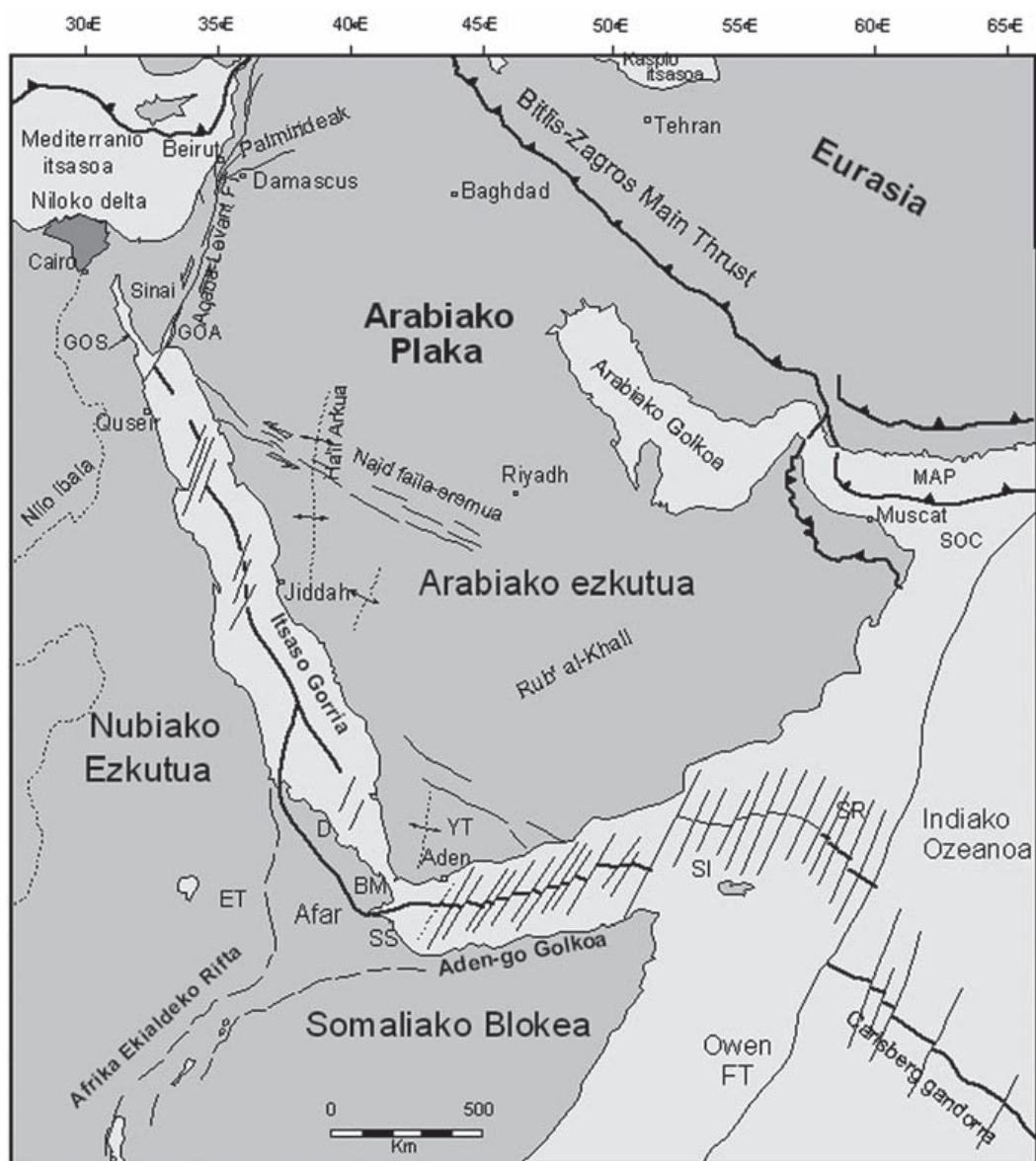
Abstract: The East African Rift System is a magmatic rift that records all the different stages of rift evolution from rift initiation to break-up and incipient oceanic spreading. It is an ideal place to analyse the evolution of continental extension, the rapture of lithospheric plates and the dynamics by which distributed continental deformation is progressively focused at oceanic spreading centres. This overview paper describes the structural organization and the relation between volcanism and tectonics of the four main structures (Red Sea, Gulf of Aden, Afar Depression and the East African Rift) related with extension in Africa and Arabia. It seems that tension started in these domains at the same time, with the eruption of voluminous flood basalts in a rather short time interval at around 30 Ma, suggesting a mantle plume influence on the Tertiary deformation in this region. So, why has the break-up of the continental lithosphere already started in certain domains (Red Sea, Gulf of Aden) and not in others (East African rift and Afar depression)? The study of this aspects may give some insight into the processes related to the continental break-up and drift, making it possible to foresee if, eventually, Africa is going to break-up into pieces or not.



1. irudia. Itsaso Gorria, Adengo Golkoko eta Afrika ekialdeko rift sistemen kokapen geografikoa. [5,6]tik eraldatuta

SARRERA

XIX mendean, Livingstone, Stanley, Fischer, Thompson, Teleki eta Von Höhnles esploratzaileek Afrikan zehar egindako bidaiei buruz idatzitakoa irakurri ondoren, geologo batzuek abian jarri zituzten estreinako geologia-ikerketak. Eki-Afrikako egitura geologikoen berezitasunez ohartuta be-



2. irudia. Itsaso Gorria-Aden Golkoa rift sistema eta inguruko egitura geologiko esanguratsuenak. Aqaba-Levant kontinente barneko faila transformatzailea, Mediterranioko Bitlis-Zagros konbergentzia eremua eta Afrika ekialdeko rifta nabarmendu dira. BM = Bab al Mandeb; D = Danakil horsta; ET = Etiopiako basalto-plataforma; GOA = Aqabako Golkoa; GOS = Suezko Golkoa; MAP = Makraneko akrezio-prisma; SI = Socrota uhartea; SOC = Semaileko lurrazal ozeanikoa; SR = Sheba ozeano-gandorra; SS = Shukra al Sheik etenunea; YT = Yemeneko basalto-plataforma. [7]tik eraldatuta

rehala kaleratu ziren «Eki-Afrikako rift haustura» [1] edo «Eki-Afrikako rift-haran handia» [2] bezalako terminoak. Gregoryk [3] Itsaso Gorria eta Itsaso Hila barne hartzen dituen graben-arroen sistema konplexua deskri-

batu zuen eta «*rift sistema Afro-Arabiarra*» izena eman zion. Egun, rift sistemaren hedapen geografikoa honako hau da: iparraldetik Sirian zehar abiatu eta Jordan Harana, Itsaso Hila, Itsaso Gorria eta Afarko Depresioa zeharkatu ondoren Afrika ekialdeko rift sisteman zehar luzatzen da Afrikan hegoaldean bukatzeko [4] (1. irudia). Egitura osoaren abiapuntua aldiz, Afarko Depresioan dago. Izan ere, bertan batzen dira Itsaso Gorriaren hegoaldea, Etiopiako rift nagusiaren iparraldea eta Adengo Golkoaren mendebaldea, alegia Nubia, Somalia eta Arabiako plaken arteko mugak hurrenez hurren; honela, rift-rift-rift motako puntu hirukoitza osatuta dago [7] (2. irudia).

Rift sisteman zehar, ondo antzematen dira kontinenteko litosferak es-tentsioaren eraginpean jasan ditzakeen prozesu guztiak: riftaren estreinako egiturak, rift egituren garapen-urrats ezberdinak, kontinenteko litosferaren apurketa eta rift-drift trantsizioa, hau da, ozeanoaren zabalkuntzaren lehendabiziko urratsen ezaugarriak. Afrika ekialdeko rifta, Afarreko Depresioa eta Itsaso Gorria-Adengo Golkoa kontinenteko litosferaren apurketa prozesuan eta ozeano berri baten sorrera prozesuan antzeman daitezkeen hiru fase bide dira, eta horrela, kontinenteko litosferaren apurketa prozesua nola gertatzen den irudikatu ahal izateko, lurralde bakoitzaren ezaugarri fisiografiko eta geologiko adierazgarrienak aipatuko dira ondoren. Bukatzeko, azalpen errazik ez duen galdera erantzuten saiatzen den eredia aurkeztuko da. Galdera ondorengoa da: ingurune guztian zehar es-tentsioa garai berean bazen, zergaitik izan du lurralde bakoitzak horren garapen ezberdina?

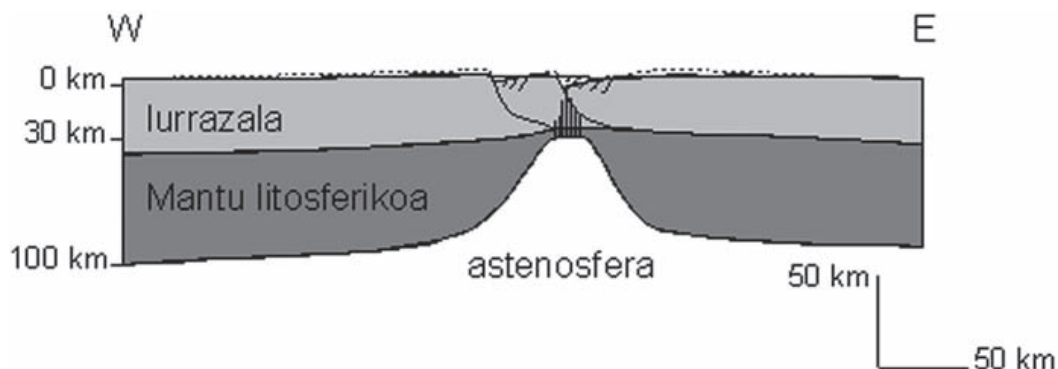
AFRIKA EKIALDEKO RIFT SISTEMA

Ezaugarri morfologikoak

Afrika ekialdeko rift sistemak, azalean, milaka kilometroko luzera eta ertz goratuak dituzten arto tektoniko (rift haranak) lerrokatuak erakusten ditu (3. irudia). Arto bakoitza failen bitartez mugatuta dago eta ehun kilometro inguruko luzera eta 10-30 kilometro bitarteko zabalera duen graben egitura batek eratua da. Grabenak progresiboki hondoratzen ari dira eta sedimentuz edota arroka bolkanikoz beteta edo hutsik aurki daitezke.

Rift-haranek bi lerro nagusi eratzen dituzte, Afrika ekialdeko rift sistemaren ekialdeko eta mendebaldeko adarrak (3. irudia). Ekialdeko adarra 2.200 kilometroan zehar luzatzen da, Afarko Depresiotik Tanzania iparraldeko arroetaraino, Etiopiako rift nagusia, Omo-Turkana lurralde baxuak eta Kenyako (Gregory) rifta zeharkatuz. Aldiz, mendebaldeko adarrak 2.100 kilometro ditu, iparralderago kokatutako Albert Lakutik (Mobutu) Malawi Lakuraino (Nyasa). Victoria Lakua izan ezik, Afrikaren ekialdeko laku handiak, rift-haranetan kokatuta daude. Victoria lakua ekialdeko eta

Ondoren, graben egitura hauek izaten duten geometria azalduko da. Horretarako, Malawi Lakuko (Nyasa) rifta erabiliko dugu adibide gisa, egitura honek rift baten garapeneko lehendabiziko urratsak baino islatzen ez baditu ere [8]. Grabenaren erdiko eremu hondoratuan pilatutako sedimentuen lodiera 3.000 m ingurukoa da. Grabenaren egitura zeharo asimetrikoa da eta honen adierazle diren ezaugarri geologikoak ondorengoak dira: (1) kulunkatutako bloke guztiek mendebalderanzko okerdura erakusten dute; (2) faila gehienek 65-70°-ko ekialderanzko okerdura erakusten dute (faila antitetikoak), baina badaude mendebaldeko ertza osatzen duten faila gutxi batzuk (faila sintetikoak); (3) faila gehienen jauzia ez da 600 m-ra heltzen, baina mendebaldeko ertza osatzen duten failatan 7.000 m-tik gorako jauziak aurkitu dira. Datu hauek erakusten dute grabena mendebaldean kokatuta dagoen eta ekialderantz okertua dagoen faila nagusi batek kontrolatzen duela, gaineko blokearen kulunkamendua eta faila antitetikoak sortuz (4. irudia). Faila hauen izaera listrikoa da, 65° inguruko okerdura dute azalean eta sakonerarekin horizontalduta daude, behe lurrazalean (15 eta 30 km arteko sakoneran) dagoen zizaila-eremu azpihorizontal batekin elkartu arte [8].



4. irudia. Afrika ekialdeko riftaren litosfera osoko zehar ebaki teoriko arruntentarikoa. [8]tik eraldatuta.

Kontinenteko lurrazal hauskorrean, estentsioak failak eta subsidentzia eragiten ditu, rift estu eta luzexkak eratuz. Aldiz, litosferako mantuak mehetze moldakorra du mantu astenosferikoaren gorakadak eraginda. Beraz, riften teoria mailako ezaugarrietako bat nabarmena da lurralde honetan; goi mantuan barneratutako astenosferako eremu goratuaren eta gaineko litosferan garatutako eremu mehetu, estu eta luzexkaren arteko harreman zuzena. Ikerketa geofisikoen bidez baieztatutako mantu astenosferikoaren gorakadak riftaren hormen altxamendu termikoa eragiten du azalean.

Afrika ekialdeko rift sisteman arruntak dira rift arroak batzen dituzten NW-SE orientazioko faila handiak, estentsio mugimendu nagusiekiko paraleloak direnak eta kontinente barneko faila-eremu transformakortzat hartu

dira [9] (3. irudia). Deformazio-eremu hauetako failen mugimenduaren osagai nagusia horizontala da, eta kokapenaren arabera eskuin alboranzko edo ezker alboranzko mugimendua erakus dezakete. Tanganyika-Rukwa-Malawi faila-eremuak adibidez, mendebaldeko adarraren bi segmentu nagusiak lotuak ditu eta eskuin alboranzko mugimendua duen kontinente barneko faila transformakor gisa interpretatzen da [8]. Aswako faila-eremua lausotuagoa da, baina ezker alboranzko mugimendua eta NW-SE orientazioa duten zenbait norabide-faila handi barneratzen ditu. Faila hauek dira Afrikan gertatzen diren lurrikara bortitzen erantzule. Faila-eremu honen SErango luzapena Tanzaniaren iparraldeko bolkanen eta failen gerrikoak osatua du. Faila-eremu honek rift sistemako mendebaldeko eta ekialdeko adarrak batzen ditu. 3. irudiko eremuan rift-segmentu nagusiak kontinente barneko eremu transformakorren bitartez lotuta daude, faila transformakorrez lotutako ozeano-gandorren zatien antzera, eta orotara Eki-Afrikarako apurketa-lerro bakarra osatuz. Beraz, Afrika ekialdeko rifta ozeano baten zabalkuntzaren estreinako urratsa dela onar daiteke, nahiz eta oraingoz Afrikako plaka eta Somaliako plaken arteko muga ondo garatu gabe dagoen eta kontinenteko litosferaren apurketarik oraindino ez den gertatu.

Bolkanismo prozesuak

Bolkanismo prozesuak orain dela 30 Mu (Oligozenoan) garatu ziren Etiopiako lurraldeetan, eta basalto-plataforma bat sortu zuten. Basalto-plataformak [10] oso eremu zabala (750.000 km²) bete zuen, eta badirudi 500 eta 1.500 m bitarteko lodiera zuela, eta eratzeko milioi bat urte bainik ez zuela behar izan [11]. Geroztik, bolkan-jarduerak hegoalderantz migratu duela esan daiteke, lurralde bakoitzean adin ezberdineko bolkan-pultsoak defini daitezkeelarik. Pultso hauek guztiak bolkanismo prozesu Neogenoak bezala bildu dira 3. irudian. Adibidez, Afarko hegoaldean 14-11, 11-10, 9-7, 5-4 eta 1,6 Mu-tik gaur egunera arteko bolkan-pultsoak definitu dira [12]. Kenyako riftaren erdiko aldean, aldiz, bolkan prozesuak orain dela 20 Mu inguru hasi ziren, kilometro bateko lodiera duten Samburuko basalto-plataformen erupzioarekin batera. Geroztik, 5 eta 2 Mu bitartean trakita eta fonoliten bolumen handiak sortu dira eta orain dela 1,2 Mu karbonatitak eta nefelina-fonolitak igorri zituzten bolkanak garatu ziren [13].

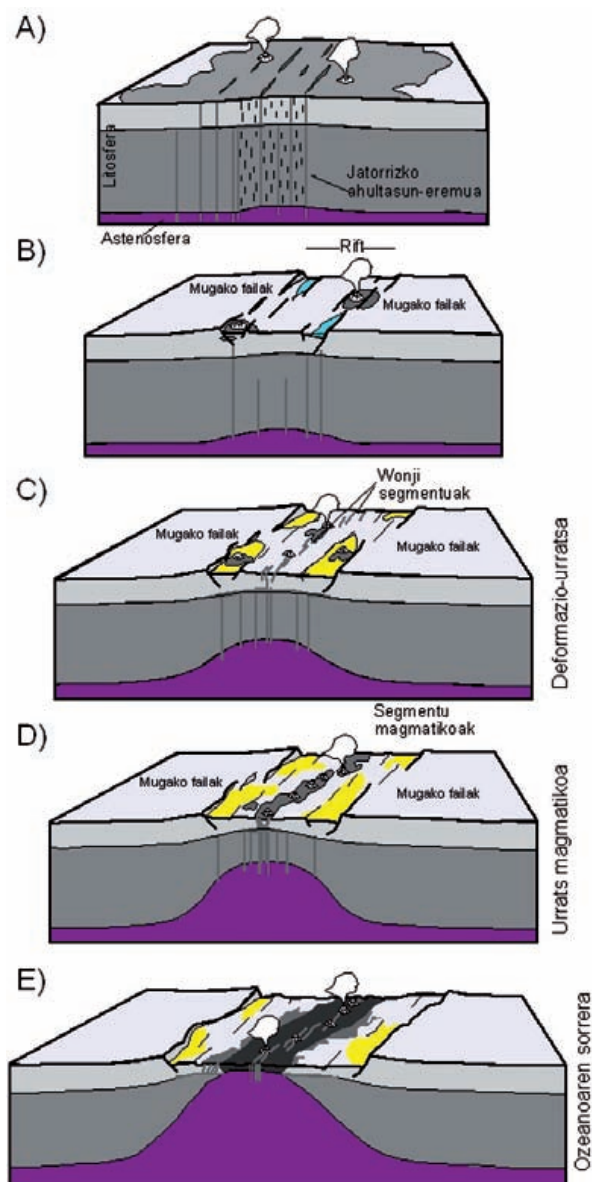
Zenozoikoan zehar gertatutako bolkan-prozesuak ugariak izan dira rift sistemaren iparraldean, batez ere ekialdeko adarrean, urriagoak dira ordea hegoalderago jotzen dugun neurrian. Afrika ekialdeko rift sistemaren iparraldean eta ekialdeko adarrean neurtutako N-S norabideko Bouguerren anomalia grabimetrikoko negatiboak [14] litosferaren eremu meheagoa dagoela adierazten digu; eremu horrek agerian uzten ditu hainbat desberdintasun mendebalde eta ekialdeko adarren eta iparralde eta hegoaldearen eremuetako bolkanismo prozesuen artean.

Bolkan gehienak riftaren Erdiko eremu hondoratuan pilatuta daude (3. irudia), eta lotura zuzena erakusten dute prozesu tektonikoekin. Baina gutxi dira egitura tektoniko arruntenekin (faila normalekin) lotutako bolkanak, mota honetako failek ez dutelako gaitasunik magma azaleratzeko behar diren arraildura irekirik sortzeko. Aldiz, bolkanak oso sustraituta daude tentsio-diaklasak, buztan-hausturak edo erlaxazio-bihurgune estentsionalak bezalako egitura tektonikoetan garatutako arraildura irekietan. Oso nabarmentzekoak dira era berean, Afrikako gailurrik ezagunenetariakoak riftarekin lotutako bolkanak izatea, baina Erdiko graben egituratik at garatutakoak (Kilimanjaro, Elgon Mendia edo Kenya Mendia). Ondorioz, bolkanaren garaierari grabenetako hormek duten altxamendua gehitzean sortu dira Afrikako tontorrik altuenak. Bolkan hauek lotuta daude ahultasun eremu aurrekanbriar berraktibatuetan garatutako estentsio-haustura handiekin (Kenya Mendia) edo norabide-failetan sortutako pull-apart motako zabalkuntzekin (Kilimanjaro, Elgon Mendia).

Etiopiako rift nagusia: kontinenteko litosfera apurtzen ari da

Gaur egun, onartzen da Etiopiako rift nagusia dela kontinenteko litosfera apurketatik gertuen dagoen lurraldea [15, 16]. 5. irudiak laburbiltzen ditu Etiopiako rift nagusiak jasan dituen eboluzio-urratsak, riftaren estreineko prozesuetatik kontinenteko litosferaren apurketa eta ozeano-zabalkuntzaren lehendabiziko aztarnetara arte. Aurreko atalean esan den bezala, orain dela 30 Mu garatutako basalto-plataforma litzateke Tertzarioko rifting prozesuarekin lotutako lehenengo gertakizun tektonomagmatikoa. Lurraldeak gorakada nabarmena jasan zuen, egun rift-harana inguratzen duten Somalia eta Etiopiako goi ordokiak sortu zirelarik. Bolkanismo prozesu izugarri hauek eta lurraldearen gorakada rifting prozesua abiatu ondoren garatutako diren estentsio-egituren aurretik sortu zirenez, prozesuaren jatorria luma gorakor batekin lotuta dagoela dirudi. Luma gorakorrak [17], azken 30 Mu-etan, ondorio erreologiko eta dinamiko eraginkorrak izan ditu, eta ondorioz apurka apurka kontinenteko litosfera mehetuz eta ahulduz joan da.

Rifting prozesuak ez dira prozesu jarraituak izaten, jarduera-urrats puntualak eta estentsiorik gabeko aldiak tartekatu ohi dira. Etiopiako riftean adibidez, 30-21 Mu bitarteko tartean nabarmenak izan ziren lurrazaleko prozesu tektonomagmatikoak. Aldiz 21 eta 11 Mu bitartean azalean ez da estentsioarekin lotutako bolkanismoen ez prozesu tektonikoen eraginik nabarmentzen. Ondoren, Etiopiako rifting prozesu diakronikoa hasi zen rift egituraren zabalkunde ezjarraitu baten bitartez. Rift haranaren kokapena seguruasko, litosfera-eskalako ahultasun-eremu zaharren berraktibazioaren bitartez gobernatuta egon liteke. Ahultasun-eremuen norabideak (oro har, NE-SW) eta azken Mu-etako (3,2 Mu-gaur egun) Nubiaren eta Somaliaren arteko aldentze mugimenduaren norabideak (oro har, ESE-WNW) argi era-



5. irudia. Ozeano baten sorrera irudikatzen duen eredu eskematikoa, Etiopiako rift nagusian oinarrituta. [16]tik eraldatuta. A) Estentsio-urrats nagusiaren aurretik Etioipian garatutako basalto-plataforma, seguru asko aurretik zegoen ahultasun-eremuren bat baliatuz azaleratu zena. B) Muga-faila handien garapena (11-2 Mu), faila-malkar nabarmenak eta arroaren subsidentzia eraginez. C) Muga-faila nagusien jarduera desagertu egin zen eta deformazioa rift-haranaren erdian pilatu zen, Wonji faila-gerriko zeiharra sortu zelarik (2 Mu). Jarduera magmatiko Wonji segmentuetan pilatzen da. D) Jarduera tektono-bolkanikoa Wonji segmentuetan pilatu bezain laster deformazioaren eta magmatismoaren arteko elkar-eragina hasi zen. Litosfera mehetua intrusio magmatikoez eraldatu egiten dute, eta magmen intrusioek eta dikeek estentsioa erraztu egiten dute. E) Mehetzea, berotasuna eta magmatismoa aragotuz kontinenteko litosferaren apurketa eta ozeanoko litosfera berriaren sorrera gerta daitezke

kusten dute rifting prozesua estentsio zehiar baten menpe egon dela. Aldiz, zalantzak ditugu oraindino, baldintza zinematiko hauek rifting prozesuaren hasieratik mantendu ote diren, edo azken milioi urteetako baldintzak baino izan ez diren baieztatzeko orduan.

Etiopiako rift nagusiaren garapenean bi urrats bereiz daitezke [16]. Lehenengoan, Miozeno eta Pliozenoan zehar, bereizgarriak dira muga-faila handietan zehar gertatzen diren mugimenduak, tokian tokiko arro asimetriko sakonak (5 km-tik gora) sortzen dituen rift-haranaren subsidentzia nabarmena eta jarduera magmatiko lausotua (5b irudia). Hasierako urrats honetan magmatismoak rift osoari eragiten dio, rift-haranean, rift-haraneko muga-failetan eta rift-haranetik kanpo ere tokian tokiko hedadura dauka (hau da, ardatzetik kanpoko bolkanismoa dugu).

Estentsio-esfortzuek aurrera egin ahala bigarren rifting-urratsa (Pleistozeno) garatzen da (5c-d irudia). Honetan, jarduera tektonomagmatikoa riftaren ardatzera baino ez da mugatzen. Rift-harana mugatzen duten failen jarduera gelditu egiten da, eta mehetutako rift depresioaren erdiko aldera mugatzen den faila-sare dentsoan (Wonji segmentuetan) pilatzen da estentsioak eragindako deformazioa. Ondorioz, kontinenteko litosferaren mehetze progresiboa rifting prozesu zehiar konstantearen eraginez gertatu da, Kuaternarioko segmentazio tektono-magmatikoa guztiz baldintzatzen duelarik. Rifting-baldintza zehiarren eraginez, faila-sareak zehiarki moztetu du rift-harana. Faila hauek kontinenteko litosfera zeharo mehetzen dute eta mantuko material beroak hauen azpitik egiten du gorantz, erupzioak faila zehiarrek sortutako hutsuneetan pilatzen direlarik. Jarduera tektono-bolkanikoa Wonji segmentuetan kontzentratu bezain laster deformazio eta magmatismoaren arteko harreman estua garatzen da. Alde batetik, failen eraginez mehetutako litosfera-zatien izaera, magmen intrusio ugarien ondorioz, zeharo desberdina da eta, bestetik, prozesu magmatikoek garatutako intrusio- eta dike-egiturek handitu egin dute estentsioaren eraginkortasuna. Urrats honetan dago Etiopiako rift nagusiaren iparraldeko eremua, eta esan daiteke kontinenteko litosferaz inguratutako abiadura moteleko ozeano-gandor baten antzeko egitura osatzen duela [15]. Mehetze prozesuak aurrera egin ahala, hurrengo milioi urteetan, magmen intrusioak ugari egingo dira eta ozeanoko litosfera berria garatuko da, Somaliako blokea Afrikatik bereiziz (5e irudia).

Beraz, Etiopiako rift nagusiaren bilakaerak erakusten du riftaren morfologia failek gidatuta dagoela hasierako urratsetan, eta azkeneko urratsetan, kontinentearen apurketa ematen denean, prozesu magmatikoek eragin nabarmenagoa izan dutela. Hala ere, estentsio prozesu guztian zehar lotura estua dago deformazio eta magmatismoaren artean, nahiz eta rifting prozesuaren bukaeran, ozeanoen zabalkuntza hasi aurretik, deformazio prozesuek eragina galdu ahala prozesu magmatikoena gero eta nabarmenagoa den [15, 16].

AFARKO DEPRESIOA

Afrika ekialdeko riftaren iparraldeko muturrak, Itsaso Gorriaren hegoaldeak eta Aden Golkoko mendebaldeak bat egiten dute Afarko depresioan. Bertan, Nubiako eta Somaliako blokeen (gaur egun Nubia eta Somaliako blokeak Afrikako plakaren barne kokatzen dira) eta Arabiako plakaren arteko rift-rift-rift motako puntu hirukoitza kokatzen da (2. irudia). Beraz, iraganean Afarko Depresioa Arabia-Nubia ezkutu neoproterozoikoak eta Mozanbikoko Gerrikoak osatzen zuten eta lurralde egonkorra izan zen, kontinenteko litosfera noizbait estentsioak eragindako zatiketa jasauen arte.

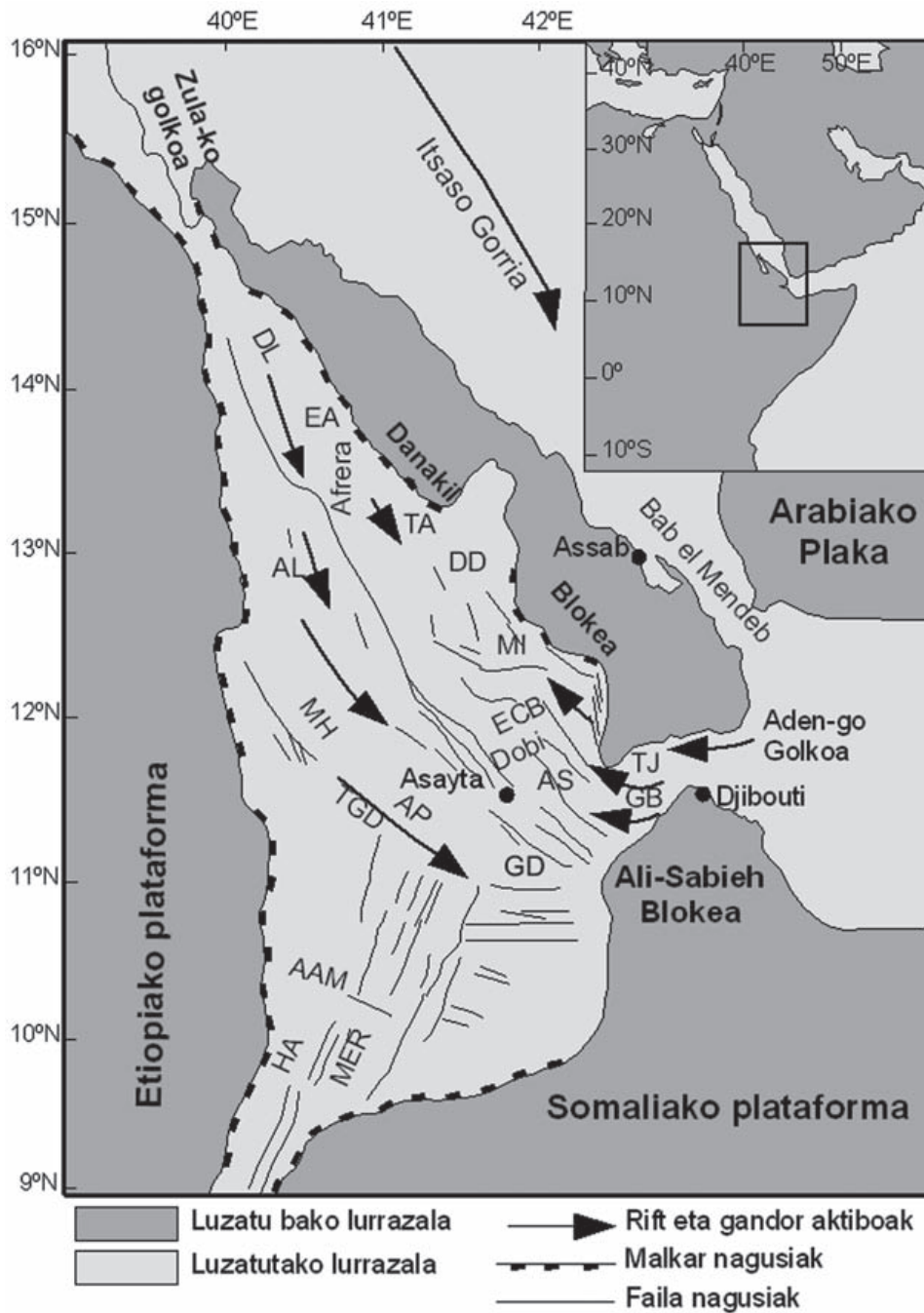
Ezaugarri morfologiko eta geologikoak

Afarko Depresioak geometria trianguluarra du eta gutxi gorabehera 200.000 km² estaltzen ditu. Erpinetan rift eremu estuak eratuz elkartzen diren ertzeko malkarrez inguratuta dago (6. irudia). Mendebaldean Somaliako eta hego-ekialdean Etiopiako plataformak daude. Ali-Sabieh eta Danakil blokeek mugatzen dute Afarko Depresioa ekialdetik eta ipar-ekialdetik. Hegoaldetik Etiopiako rift nagusiak banatzen ditu Somalia eta Etiopiako plataformak. Afarko Depresioa eta Etiopiako plataformaren arteko muga, drenai-sare estuak higatutako Etiopiako malkarra da, N-S norabideko faila normalek sortutako bat bateko altitude ezberdintasun nabarmena.

Etiopiako malkarrak direla bide, Etiopiako plataformaren 3.000-2.500 m-tik Afarko Depresioaren lautadek duten 800-100 m bitarteko kotetara igarotzen gara. Somaliako malkarrak ezaugarri berdintsuak ditu, baina kasu honetan bolkan-gune isolatuak ere aurki daitezke malkarrean zehar. Zulako Golkotik Tajurako Golkara luzatzen den Danakil Blokearen (2.130 m-ko gehienezko garaiera) eta Depresioaren arteko garaiera-ezberdintasuna faila normalek ere eragiten dute. Ali-Sabieh blokea, aldiz, Somaliako plataformaren iparralderanzko luzapena da, eta iraganean Danakil blokearekin lotuta bazegoen ere, gaur egun Tajurako Golkoak bereizten ditu.

Afarko Depresioaren eremua horst eta graben egiturez tximurtutako garaiera eskaseko lautadez eratuta dago. Noizbehinka bereiz daitezke erliebe nabarmenagoak, bolkan zentralek eratutakoak. Depresioaren batez besteko garaiera 200 m ingurukoa bada ere, zenbait eremutan (Dallol) garaiera -120 m-ra ere aurki daiteke itsas azpitik.

Afarko Depresioan ez da azaleratzen basamentu neoproterozoikoa ez eta arroka sedimentario mesozoikoak bezalako rift-aurreko materialik, agian benetan horrelakorik ez dagoelako edo, ziur asko, Pliozenoan eta Kuaternarioan pilatutako arroka bolkaniko eta sedimentarioen bitartez estalita dau-



6. irudia. Karratu txikian Afarko Depresioaren kokapena Afrikako NE-an. Irudi handian Afarko Depresioaren mapa tektonikoa. AAM: Ayelu Amoissa eremua; AL: Alayata bolkana; AP: Awsa plataforma; AS: Asal rifta; DD: Dadar grabena; DL: Dallol bolkana; ECB: Ekialde-erdiko blokea; EA: Erta Ale bolkana; GB: Ghoubbet rifta; HA: Herta Ale bolkana; GD: Gobaad rifta; TA: Tat Ale bolkana; MER: Etiopiako rift nagusia; MH: Manda Hararo rifta; MI: Manda Inakir rifta; SA: Sabure rifta; TGD: Tendaho-Gobaad etenunea; TJ: Tajurako Golkoa. [18]tik eraldatuta

delako. Hala ere, ikertzaile gehienek uste dute rift aurreko egiturek eragin nabarmena dutela Etiopiako Rift nagusiaren, Itsaso Gorriaren eta Adengo Golkoaren sorreran [18]. Badirudi Neoproterozoikoan garatutako failek, egitura sarkorrek eta terraneen arteko mugek baldintzatzen dutela egitura hauen guztien bilakaera tektoniko eta estratigrafikoa.

Gaur egun, lurralde honek duen estentsioaren neurketa zehatzak lortu dira. Nubia/Arabia, Arabia/Somalia eta Nubia /Somalia lurraldeen arteko Eulerren bektoreak erabilia beraien arteko bereizketa 6 eta 17 mm/urterokoa dela ikusi da. Behaketa geodetikoek aldiz, erakutsi dute hiru eremuetan kokatutako Kokapen Sistema Globaleko (GPS) sarea erabiliz, luzamendua 21 mm/urterokoa dela [19].

Bolkanismo prozesuak

Afrika ekialdeko rifterako esan bezala, hemen ere, bolkanismo prozesuak orain dela 30 Mu garatutako basalto-plataforma handiarekin hasi ziren [11]. Hauek higadura-gainazal baten gainean pilatu ziren eta, sarritan, itsas mailatik gertu edo gainetik sortutako arroka sedimentario ibaitarrak edo lakutarrak tartekatzen dituzte.

Hurrengo pultso bolkaniko garrantzitsua Miozenoan gertatu zen (25-15 Mu bitartean), eta aurreko basalto-plataformak bezala, batez ere Somalia eta Etiopiako plataformetan antzeman daiteke. Afarko Depresioaren barruan aurki daitezkeen garai honetako basalto-isuriek meterorizazio izugarria jasan dute eta failez josita daude.

Pliozeno-Pleistozenoko arroka bolkanikoak (5Mu-gaur egun) dira Afarko Depresioaren gehiengoa estaltzen dutenak, 2/3 inguru. Garai honetako arroka bolkanikoen artean ugarienak (2/5) basaltoak dira, sarritan ehundura porfiritiko edo besikularrekoak. Arroka bolkaniko hauetan 1.500 m-ko lodierak neurtu dira, 1 eta 6 m bitarteko fluxu bolkaniko indibidualez osatuta.

Afarko Depresioaren arroka bolkaniko Kuarternarioen artean fluxu basaltikoak eta eskoria-konoak dira nagusi [20]. Kasu gehietan, behatu ahal izan da arrakala-erupzio baten ostean erupzio zentralak gertatu direla. Mendizerra axialak arrakalatan zehar azaleratutako arrokekin eratuta daude, eta alde batera eta bestera anomalia magnetiko simetrikoak erakusten dituzte, ozeanoko lurrazal mehe baten antzera. Anomalia magnetikoak berriagoak dira eremu marginaletatik eremu axialera. Ezaugarri hauek guztiok riftaren ardatza ozeano-gandor jaio berri batekin erkatzera garamatza eta ondoriozta daiteke kontinenteko litosferaren zatiketa gertu egon daitekeela [18]. NW-SE norabideko eremu axialak zeharkatzen dituzten E-NE norabideko lerrokadura bolkanikoak ere antzematen dira. Lerrokadura hauek haustura-eremuekin lotuta daude, ozeanoetako faila transformakorren antzeko haus-

tura-eremuak izango dira ziur aski. Kuaternarioko arroka bolkaniko hauek, sarritan, metakin lakutarrekin tartekatuta ageri dira.

ITSASO GORRIA ETA ADENGO GOLKOA

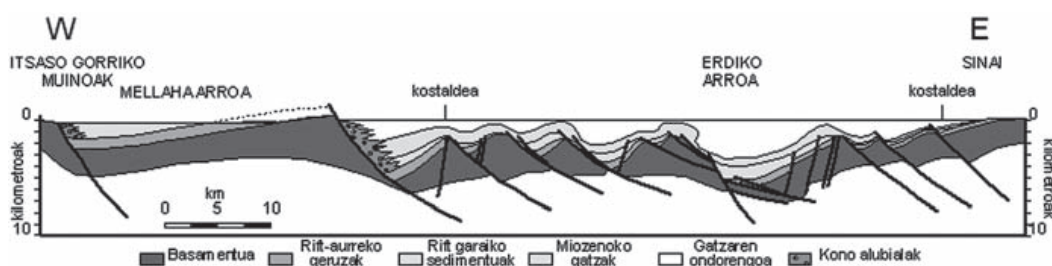
Sarritan Itsaso Gorriko eta Adengo Golkoaren bilakaera tektonoestratigrafikoa batera deskribatzen dira, bi lurralde hauetako garapen geologikoak eragin duelako Arabia eta Afrikaren arteko bereizketa. Baina lurralde hauetako riften dinamika oso ezberdina izan da. Alde batetik, Adengo Golkoak rifting prozesu zehiarra pairatu du eta garatu duen ozeano-gandorra Indiar Ozeanotik datorren Sheba ozeano-gandorraren luzapena da (2. irudia). Bestetik, Itsaso Gorriaren garapeneko hasierako urratsetan rifta estentsio-indarrekiko perpendikularki orientatuta zegoen, baina beranduago, rifting zehiarra pairatu zuen esfortzuen norabide-aldaketa baten eraginez. Gainera ozeano-gandorraren bilakaera osoa kontinenteko litosferaren barne gertatu da, oraingoz mundu mailako ozeano-gandorren sistemarekin inolako loturarik izan gabe.

Ezaugarri morfologiko eta geologikoak

Adengo Golkoa Afrika ekialdeko Somalia herrialdearen eta Arabia hegoaldeko Yemen herrialdearen artean kokatuta dago, eta 1.000 km-ko luzera eta 150 eta 440 km bitarteko zabalera ditu. Hemen, kontinentearen rifting prozesua Itsaso Gorrian baino zerbait zaharragoa da eta, era berean, ikusi da ozeano-gandorraren sorrera eta lurrazal ozeanikoaren garapena Itsaso Gorrian baino zaharrago direla (10 Mu inguru). Adengo Golkoan ozeanoaren zabalkuntza eragin zuen gandorrek mundu mailako plaken arteko ozeano-mugarekin bat egiten du Sheba gandorraren bitartez eta ondo definitutako faila transformakorrek nabarmenki disektatzen dute (2. irudia). Ziurtzat hartzen da ozeano-gandorra garatu ahala Afarrerantz hedatu zela, baina arazoak daude Adengo Golkoaren ENE-WSW norabide orokorraren eta Arabiako plakak Afrikako plakarekiko duen NNE-SSW norabideko mugimendu erlatiboaren arteko zehiartasuna azaltzeko orduan [21]. Baliteke jatorrizko kontinentearen haustura ahultasun-eremu nabarmen baten bidez baldintzatuta egotea, baina hau oraindino frogatu gabeko baieztapena baino ez da.

Itsaso Gorria Arabia eta Afrika banatzen duen arro estua da. 3.000 km inguruko luzera eta 100 eta 300 km bitarteko zabalera ditu (2. irudia). Itsaso Gorria Suezko Golkotik, Afarko lurraldeetaraino hedatzen da. Itsaso Gorriko ertzak faila-planoak dira eta 3.000 m-taraino altxatzen diren eta okerdura handia duten amildegia eratzen dituzte. Oro har, ekialdeko ertzaren garaiera mendebaldekoa baino handiagoa da. Normalean itsasoaren sakonera txikia da, eta sakonera abisalak itsasoaren erdialdeko

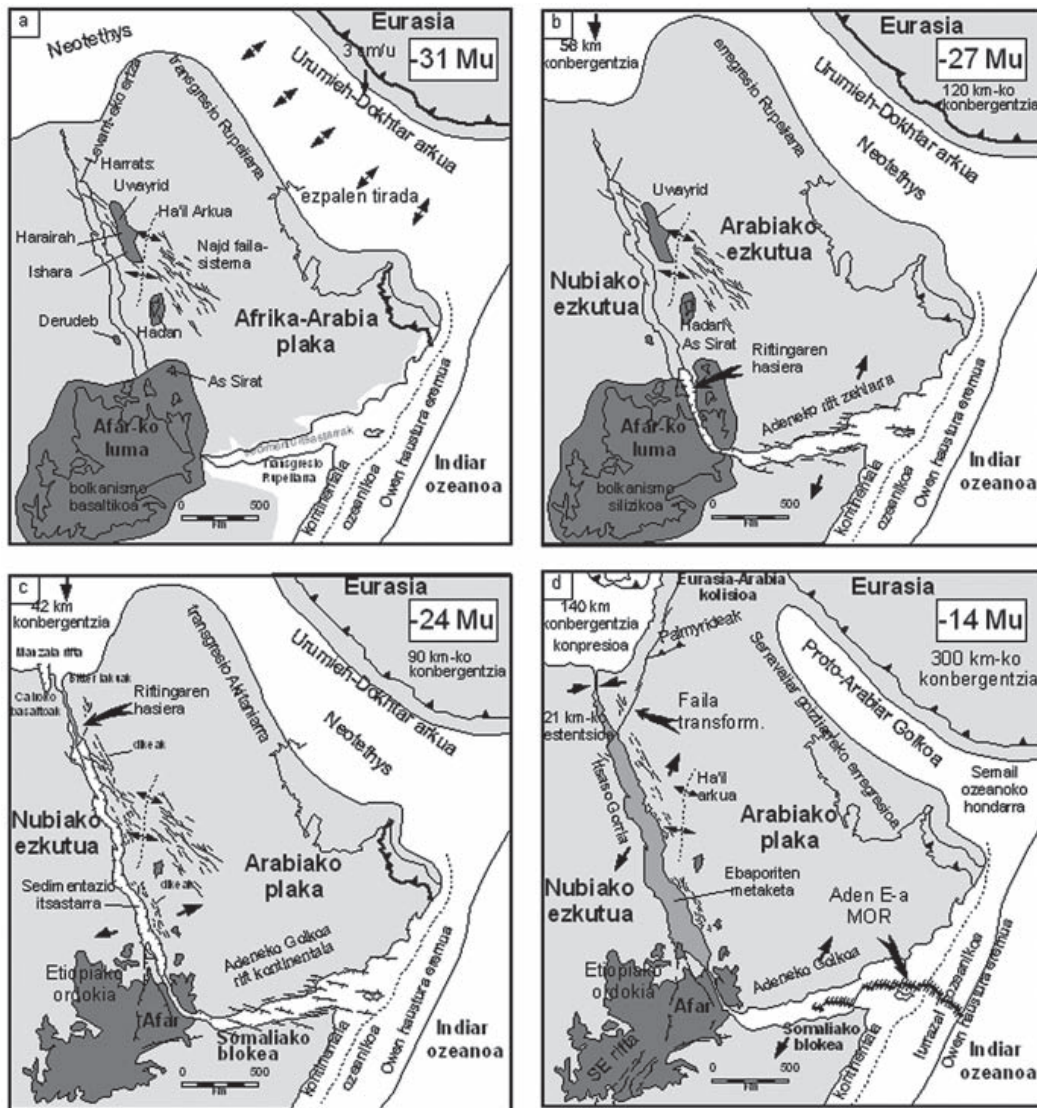
zenbait eremutan baino ez dira neurtu. Itsaso Gorriaren sakonera txikiko eremuen azpitik inguruko kontinenteetan baino lodiera txikiagoko kontinenteke lurrazala aurki daiteke. Mehetzea faila normal listrikoen ondorioa dela dirudi (7. irudia), eta failen kokapena basamentu zaharraren fabrikak eta terraneen arteko mugek baldintzatuta dago guztiz. Itsasoaren eremu sakonenetan, azkeneko 5 Mu garatu diren xingola magnetikoak definitu dira, eta horrela kontinenteke lurrazalaren apurketaren ondorengo ozeanoko lurrazalaren eraketa baieztatu da.



7. irudia. Suezko Golkoaren hegoaldean burututako zehar ebakia. Kulunkatutako blokeen geometria nabaria da; dirudienez Itsaso Gorriko rifting prozesuaren estreinako urratsetan garatutakoa da. [7]tik eraldatuta

Garapen geodinamikoa

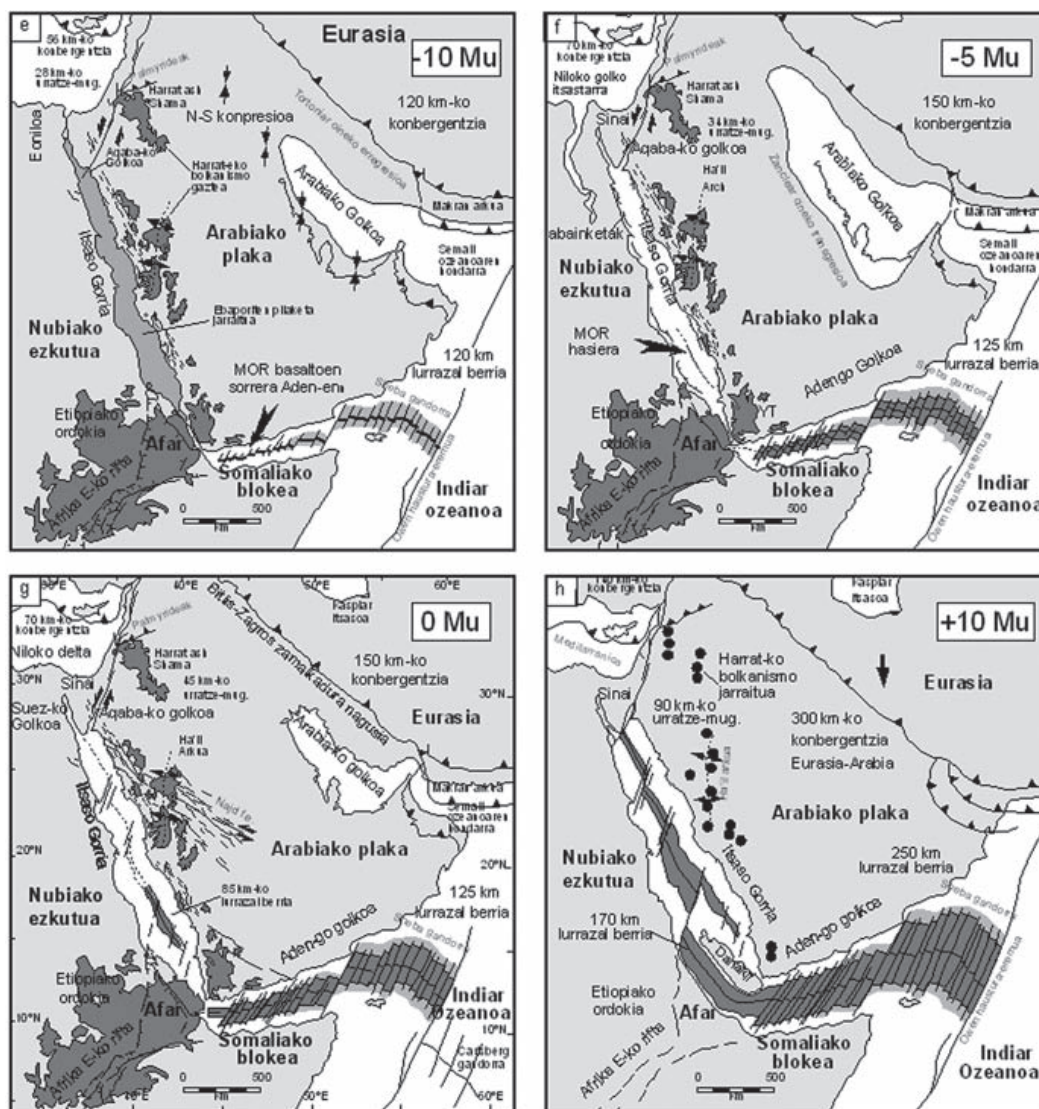
Iraganerako kalkulaturako plaken arteko mugimenduak eta gaur egun GPSak erabiliz neurtu diren plaken arteko mugimenduak kontutan hartuz, 8. irudian laburbiltzen da Itsaso Gorria-Adengo Golkoa rift sistemaren zabaluntza prozesua Oligozenotik gaur egunera; gainera, etorkizuneko bilakaeraren aurreikuspena ere iradokitzen da bertan. Rift sistemaren sorrera Oligozenoan hasi zen (31-30 Mu), Afarko lurraldearen azpian kokatutako luma gorakor batek isuritako basalto-plataforma erraldoiarekin (8a irudia). Berehala garatu ziren rifting prozesuarekin lotutako estreinako egiturak, lehendabizi Adengo Golkoan (29.9-28.7 Mu) eta zerbait beranduago Itsaso Gorriaren hegoaldean (27.5-23.8 Mu) (8b irudia). Hurrengo milioi urteetan rifting prozesuak garapen azkarra jasan zuen Itsaso Gorrian zehar (24 Mu; 8c irudia). Garai honetakoa da era berean, Itsaso Gorrian behatzen den bigarren bolkanismo fasea, batez ere basalto-dikeak sortu zituen lurralde guztian zehar. Neotethys itsasoak Eurasiaren azpitik jasaten duen eta Urumieh-Doktar arku bolkanikoa osatzen duen subdukzioa da garapen azkarraren eragile nagusia. Subdukzio-eremuak Arabiako plaka osoan eragindako ezpalen tirada-esfortzu gogorrekiko Itsaso Gorria perpendikularki orientatuta dagoenez bertan baldintza egokiak daude rifting prozesua areagotzeko. Aldiz, Adengo Golkoa esfortzuen norabidearekiko zehiarki kokatuta dagoenez garapen motelagoa du. Miozeno Ertainaren hasieran (14 Mu), inguruko baldintza geologikoez guztiz aldatuko zituzten esfortzu orokorren berrantolaketa bat gertatu zen. Arabia eta Eurasiaren arteko subduk-



8. irudia. Itsaso Gorria/Adengo Golkoko rift sistemaren berreraiketa palinspastikoa. a) Orain 31-30 Mu, Afarko lumaren bolkanismoaren sorrera. b) Orain 27 Mu, Adengo Golkoare eta Itsaso Gorriko Eritrea eremuko kontinenteko riftaren hasiera. c) Orain 24 Mu, Itsaso Gorrian zeharreko estentsioaren hedapen azkarra. d) Orain 14 Mu, Aqaba-Levant muga transformakorraren sorrera, ozeanoaren zabalkuntza Sheba gandorraren ekialdean hasi zen

zioa bukatu eta bi plaka hauen arteko kolisioa hasi zen iparmendebaldetik, gero apurka-apurka hegoekialderantz hedatzeko. Ondorioz, Arabiako plakak jasaten dituen esfortzu tektoniko orokorren berrantolaketa bat gertatu zen (8d irudia). Itsaso Gorria eta sortu berria zen Zagros kolisio-mendikatea lotzen duen faila transformakorra sortu zen, Sinai eta Levant kontinente-ertzarekiko paralelo. Subdukzioak eragiten zuen ezpaleen tirada-indarra

Rift Sistema Afro-Arabiarra: kontinenteen apurketatik ozeanoen sorrerara



8. irudia (jarraitu). e) Orain 10 Mu rift-drift transizioa Adengo Golkoaren erdialdean. f) Orain 5 Mu, rift-drift transizioa Itsaso Gorriaren erdialdean. g) Gaur eguneko egoera. h) 10 Mu barru Arabiako plakaren inguruko ezaugarri geologikoak. [7]tik eraldatuta

zeharo murriztu zen, nahiz eta guztiz ez desagertu, Itsaso Gorriak pairatzen zuen estentsio-indarra perpendikularra izan gabe (N60°E), zeharo zehiarra (N15°E) izatea eraginez. Harrez geroztik sortu berria zen faila transformakorrarekiko paraleloa da. Aldi berean, Itsaso Gorriaren iparralderanzko zabalkuntza, Suezeko Golkoan zehar, bukatu egiten da, faila transformakor berriaren iparraldeko lurralde hau konpresioaren eragin-

pean gelditzen delako. Ondorioz, Suez iparraldeko eremuak gora egiten du eta aurretik Mediterraniotik Itsaso Gorrira zetorren uraren pasabidea ia guztiz itxita gelditzen da. Horrela izanik, Itsaso Gorriaren sedimentazio-baldintzak guztiz aldatu ziren, sedimentazio itsastar irekia izatetik ebaporitak sortzen direneko baldintza mugatuetara igaroz. Horrela sortu zen Itsaso Gorriko kontinente-ertz osoan zehar identifikatzen den eta 400-800 m-ko lodiera duen ebaporita-gorputza. Esfortzu orokorren baldintza berrietan Adengo Golkoan orain arte estentsioarekiko zehiarrak izan diren egiturak gutxi gorabehera perpendikularki orientatuko ziren, eta kontinentearen apurketak aurrerapen handia egin zuen. Garai honetan, hasi zen Indiar ozeanotik datorren ozeano-gandorra barneratzen Adengo Golkoan, nahiz eta oraindik ozeanoko lurrazalik ez sortu. Aldiz, Miozeno berantiarrean (10 Mu), ozeano-gandorra guztiz barneratzen da Adengo Golkoan eta ozeano-lurrazal berriaren garapena hasi zen (8e irudia). Beranduago, Miozeno-Pliozeno bitartean (5 Mu) hasi zen ozeano-lurrazalaren sorrera Itsaso Gorriaren zenbait eremutan (8f irudia). 8g irudiak gaur eguneko antolaketa aurkezten du. Aldiz, azkeneko irudiak etorkizuneko balizko antolaketa erakusten du: Arabiako Golkoa guztiz desagertuta dago eta ozeano-gandor jarraitua Adengo Golkotik abiatu eta, Danakilko depresiotik zehar, Itsaso Gorriraino luzatzen da (8h irudia).

AFRIKA EKIALDEKO RIFT SISTEMAREN GARAPEN EZBERDINTASUNETARAKO ARRAZOIAK

Luma gorakorrak, basalto-plataformak eta rift egituren arteko loturak aspalditik aipatu izan dira [22, 23]. Geroztik, interes handia sortu zuten luma gorakor batek kontinenteko litosferara heltzean sor daitezkeen prozesu eta egitura geologikoei, eta eztabaida sutua piztu zen riften garapena eta ozeano berri baten sorrerarako luma gorakorrak beharrezko direla eta beharrezko ez direla esaten dutenen artean. Eztabaida baretze aldera, rift egiturak zuzenean bi multzotan bereiztu ziren, luma gorakorraren eragina (rift aktiboak) eta eraginik izan ez dutenak (rift pasiboak) zedarriztatuz. Azkeneko ereduek aldiz, erakutsi dute prozesua eraginkorra izan dadin nahitaezkoak direla riften garapenerako esfortzu aktiboak (luma gorakorrak) zein pasiboak (plaketan sortutako indar orokorrak) [24]. Luma gorakorrek apurketa-tokia baldintzatuko dute, baina beharrezkoak dira plaken arteko mugetan garatutako esfortsu orokorrak (ezpalek tirada, gandorren bultzada [17]) kontinenteen apurketa eragiteko. Era berean, kontinenteen apurketaren geometria guztiz baldintzatuta egon daiteke kontinenteko litosferan, aldeztu aurretik, zeuden eskala orotako heterogeneitateengatik. Hau guztia Afrika ekialdeko rift-sistemaren bilakaera geodinamikoa aztertuz ondorioztatu ahal izan da.

Esan daiteke plaka Afro-arabiarraren apurketa orain dela 50-40 Mu inguru hasi zela, luma gorakor indartsu bat Afarko kontinenteko litosfera-

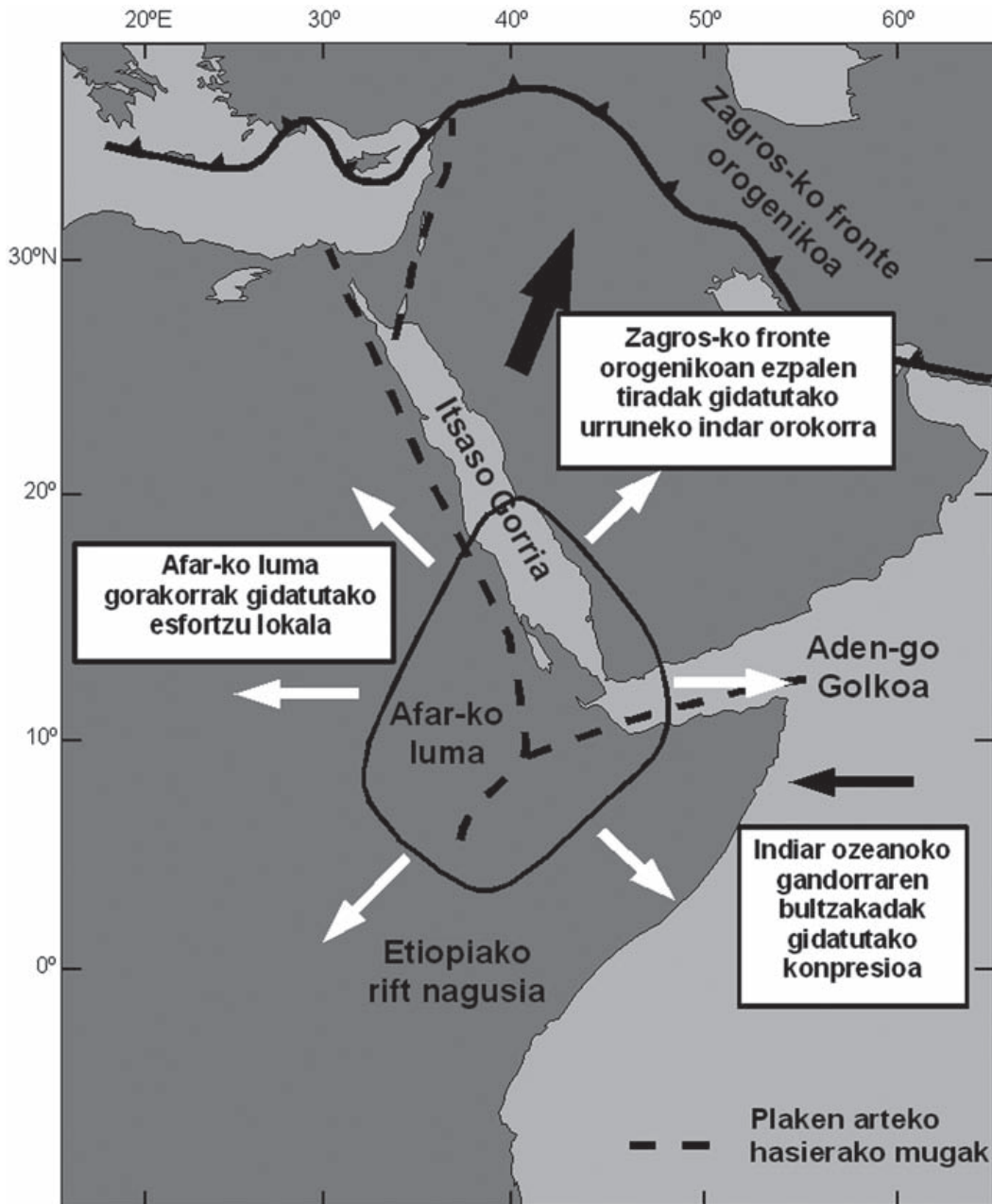
ren azpira heldu zenean. Luma gorakorrek Afarko domoaren sorrera eragin zuen, milioi urte bakoitzeko lurraldea 110 m inguru altxatuz 3.5 km-ko gehienezko altuera bat lortu arte [25]. Baliteke prozesu honen aurretik lurraldea estentsioaren eraginpean egon izana, eta zenbait estentsio-egitura zaharragoak izatea, baina argi dago luma gorakorra agertu izan ez balitz kontinentearen apurketa ezinezkoa izango zela. Luma gorakorrek litosferaren baldintza erreologikoak aldatzen ditu apurka apurka, eta litosferaren azpiko astenosferaren gorakadak, mantuko arroketan deskompresio adiabatikoa eragin eta, fusio partzialeko prozesuak areagotu zituen. Litosfera behar beste ahulduta eta haren azpitik behar beste magma pilatuta, orain dela 31-30 Mu, Etiopiako basalto-plataforma erraldoiaren sorrera gertatu zen [11].

Garai honetan, luma gorakorrek estentsio-indar erradial indartsua garatu zuen Afar inguruan. Era berean, lurraldea esfortzu orokorren (far-field stress direlako) eraginpean dago. Alde batetik, Afrika inguruko ozeano-gandorrek gandorren-bultzada eragiten dute eta, bestetik, plaka Afro-arabiarrak Eurasiaren azpitik jasaten duen subdukzioak (alegia Tethys itsasoaren itxierak) ezpale-tirada eragiten du (9. irudia). Indar hauek guztiek eta kontinenteko litosferan dauden ahultasun-eremuak (lurralde proterozoikoen arteko jostura-eremuak adibidez) dira, kontinenteko litosferaren apurketa prozesuan eragin zuzena dutenak.

Itsaso Gorrian eta Adengo Golkoan rifting prozesua gehiago garatu zen, norabide hauetan Tethys itsasoaren subdukzioak (30-14 Mu bitartean) eragin zuen ezpale-tirada luma gorakorrek eragindako estentsio erradialari gehitu zitzaiolako (9. irudia). Aldiz, Afrika ekialdeko riftaren garapena motelagoa da norabide horretan lumaren estentsio-indarrak eta ozeano-gandorren bultzada-indarrak kontrako noranzkoan ari direlako. Afarko Depresioa, orain 24 Mu inguru sortu zen luma gorakorrek garatutako Afarko domoaren kolapsoaren ondorioz.

Orain dela 14 Mu aldiz, indar orokorren berrantolaketa bat gertatu zen, Arabia iparraldeko subdukzioa bukatu eta Arabiaren eta Eurasiaren arteko kolisioa hasi zenean. Orduan, ezpale tirada-indarra zeharo moteldu zen eta estentsio-esfortzuen norabidea ere aldatu zen, gelditzen ziren subdukzio-eremuekiko berregokituz (8. irudia). Ondorioz, Suezeko Golkotik Itsaso Gorriak zuen iparralderanzko hedatze prozesua desagertu egin zen Sinai-Levant faila transformakorraren sorrerarekin. Estentsio-indar berrien norabidea zeharagoa da Itsaso Gorriarekiko eta aldiz, Adengo Golkoan zabalkuntza azkarra gertatu zen estentsio-indarrak perpendikularragoak izan zirelako irekitze norabidearekiko (8. irudia).

Rifting prozesua behar beste garatu zenean kontinenteko litosferaren apurketa gertatu zen, orain dela 10 Mu Adengo Golkoan eta orain dela 5 Mu inguru Itsaso Gorrian. Aldiz, Afrika ekialdeko riftaren norabidea estentsio-indar orokorrekiko egokia izan ez denez, oraindino ez dira konti-



9. irudia. Arabian eta Afrika ipar-ekialdean rifting prozesuaren hasieran eragina duten indarrak. Zagrosko fronte orogenikoan ezpalek tiradak eragindako indar orokorra eta Afarko luma gorakorrek sortutako tokian tokiko indarrak gehitzean litosferaren apurketa eragin dute Itsaso Gorrian zehar. Aldiz, Indiar Ozeanoko gandorrak gidatutako gandorraren bultzakadak moteldu egin du Etiopiako riftaren garapena. [18]tik eraldatuta

nenteko litosfera apurtzeko behar diren baldintzak bete. Hala ere, Afarko Depresioaren eta Afrika ekialdeko riftaren arteko trantsizio-eremuan, ozea-

no-gandor berri baten aurrekariak izan daitezkeen prozesu magmatikoak gertatzen ari direla dirudi [15, 16]. Horrela balitz, kontinenteko litosferaren apurketa prozesuaren eta ozeano-gandor berri baten sorrera prozesuaren aurrean geundeke, denborarekin Somalia eta Nubiaren arteko banaketa aurrikus litekeelarik.

ERREFERENTZIAK

- [1] SUESS, E. (1891): «Die brüche des östlichen Africa». Non: Beitrage zur Geologischen Kenntnis des östlichen Africa, *Denkschriften Kaiserlichen Akademie der Wissenschaftliche Klasse*, Wien **50**: 555-556.
- [2] GREGORY, J.W. (1896): *The Great Rift Valley*. John Murray, London, 422 or.
- [3] GREGORY, J.W. (1921): *The Rift Valleys and Geology of East Africa*. Seely Service, London, 479 or.
- [4] PRODEHL, C., FUCHS, K., MECHIE, J. (1997): «Seismic-refraction studies of the Afro-Arabian rift system- a brief review». *Tectonophysics* **278**, 1-13.
- [5] DAVIDSON, J.P., REED, W.E. eta DAVIS, P.M. (1997): *Exploring Earth: an introduction to physical geology*. Prentice Hall, New Jersey, 477 or.
- [6] APRAIZ, A. (2005): *Plaka-tektonika: Lurraren funtzionamendua ulertzeko teoria*. Udako Euskal Unibertsitatea, Bilbo, 425 or.
- [7] BOSWORTH, W., HUCHON, P. eta MCCLAY, K. (2005): «The Red Sea and Gulf of Aden basins». *Journal of African Earth Sciences* **43**, 334-378.
- [8] CHOROWICZ, J (2005): «The East African Rift System». *Journal of African Earth Sciences* **43**, 379-410.
- [9] WHEELER, W.H. eta KARSON, J.A. (1994): «Extension and subsidence adjacent to a “weak” continental transform: an example of the Rukwa Rift, East Africa». *Geology* **22**, 625-628.
- [10] ELOSEGI, M. eta APRAIZ, A. (2004): «Basalto-plataformak: ezaugarriak, jatorria eta kontinenteen apurketa, eta suntsipen biologiko orokorrekin izan ditzaketen loturak». *Ekaia* **18**, 31-48.
- [11] HOFFMAN, C., COURTILOT, V., FERAUD, G., ROCHETTE, P., YIRGU, G., KETEFU, E. eta PIK, R. (1997): «Timing of the Ethiopian basalt event and implications for plume birth and global change». *Nature* **389**, 838-841.
- [12] BERHE, S.M. (1986): «Geologic and geochronologic constraints on the evolution of the Red Sea-Gulf of Aden and Afar Depression». *Journal of African Earth Sciences* **5**, 101-117.
- [13] SMITH, M. (1994): «Stratigraphic and structural constraints on mechanism of active rifting in the Gregory Rift, Kenya». *Tectonophysics* **236**, 3-22.
- [14] SIMIYU, S.M. eta KELLER, G.R. (1997): «An integrated analysis of lithospheric structure across the East African plateau based on gravimetry anomalies and recent seismic studies». *Tectonophysics* **278**, 291-313.
- [15] EBINGER, C. (2005): «Continental breakup: the East African perspective». *Astronomy and Geophysics* **46**, 216-221.

- [16] CORTI, G. (2009): «Continental rift evolution: From rift initiation to incipient break-up in the Main Ethiopian Rift, East Africa». *Earth Science Reviews* **96**, 1-53.
- [17] APRAIZ, A. (1995): «Plaken tektonikaren oinarri zinematikoak: Gaur eguneko eztabaidagaiak». *Ekaia* **3**, 65-80.
- [18] BEYENE, A. eta ABDELSALAM, M.G. (2005): «Tectonics of the Afar Depression: a review and synthesis». *Journal of African Earth Sciences* **41**, 41-59.
- [19] PAN, M., SJOEBERG, L.E., SAFAW, L.M., ASENJO, E., ALEMU, A. eta HUNEGNAW, A. (2002): «An analysis of the Ethiopian rift valley GPS campaigns in 1994 and 1999». *Journal of Geodynamics* **33**, 333-343.
- [20] TEFERA, M., CHERNET, T. eta HARO, W. (1996): *Explanation of the geological map of Ethiopia*. Ethiopian Institute of Geological Surveys, Addis Ababa, 3, 79 or.
- [21] HUCHON, P. eta KHANBARI, K. (2003): «Rotation of the syn-rift stress field of the northern Gulf of Aden margin, Yemen». *Tectonophysics* **164**, 147-166.
- [22] MORGAN, W.J. (1970): «Convection plumes in the lower mantle». *Nature* **230**, 42-43.
- [23] BURKE, K. eta DEWEY, J.F. (1973): «Plume generated triple junctions: key indicators in applying plate tectonics to old rocks». *Journal of Geology* **81**, 406-433.
- [24] COURTILLOT, V., JAUPART, C., MANIGHETTI, I., TAPPONNIER, P. eta BESSE, J. (1999): «On casual links between flood basalts and continental breakup». *Earth and Planetary Science Letters* **166**, 177-195.
- [25] SENGOR, A.M.C. (2001): «Elevation as indicator of mantle-plume activity». *Geological Society of America* **352**, 183-225.