

Arkatz-mina arrunt bat uraren kalitatea neurtzeko? Sistema elektrokimiko merke baten azterketa

A common pencil-lead for water quality monitoring? Analysis of a low-cost electrochemical system

*Teresa Carranza, Pedro Guerrero, Koro de la Caba, Maialen Uribarrena**

BIOMAT ikerketa taldea – Ingeniaritza Kimikoa eta Ingurumenaren Ingeniaritza Saila - Gipuzkoako
Ingeniaritza Eskola, Donostia – UPV/EHU


LABURPENA: Lan honetan grafitozko arkatz-mina arrunt bat lan-elektrodo gisa erabiliz kostu baxuko sistema elektrokimiko baten bideragarritasuna aztertu da Pb(II), Cu(II) eta Co(II) ioiak uretan detektatzeko. Voltametria ziklikoaren bidez elektrodoaren jardura elektrokimiko egokia baieztatu zen, karbono beiratzatuko elektrodo estandar batekin lortutako emaitzekin alderagarriak ziren gailurrak erakutsiz. Metal astunen detekziorako pultsuzko voltameria diferentziala (DPV) erabili zen, eta arkatz-minarekin 0,44 mg/L Pb(II), 0,60 mg/L Cu(II) eta 0,74 mg/L Co(II) kontzentrazioak neurtzera iritsi zen. Arkatz-minazko elektrodoak metalak banaka detektatzeko gaitasuna erakutsi zuen, eta Pb(II)-a nahasteetan ere bereizteko gai izan zen, nahiz eta Cu(II) eta Co(II)-ren seinaleak gainjarri egin ziren batera zeudenean. Emaitzek erakutsi dute, arkatz-mina elektrodoak karbono beiratzatuko elektrodoak baino sentikortasun eta linealtasun apalagoa izan arren, arkatz-mina bezalako material merke eta eskuragarriak aukera interesgarria eskaintzen duela ingurumenaren in situ monitorizazio azkar eta ekonomikorako, etorkizuneko optimizazio lanekin hobetu daitekeen sistema gisa.

GAKO-HITZAK: Detekzio elektrokimikoa, arkatz-minazko lan elektrodoak, metal astunak, karbono beiratzatuko elektrodoak.

ABSTRACT: *In this work the usefulness of a common graphite pencil-lead was analyzed as a low-cost electrochemical system for the detection of Pb(II), Cu(II) and Co(II) ions in water. The cyclic voltammetry confirmed the suitable electrochemical behavior of the prepared electrode, showing peaks comparable to those obtained with a commercial glassy carbon electrode. For the detection of heavy metals, differential pulse voltammetry (DPV) was employed, and the pencil-lead electrode was able to detect concentrations as low as 0.44 mg/L for Pb(II), 0.60 mg/L for Cu(II) and 0.74 mg/L for Co(II). The pencil-lead electrode demonstrated the capacity for the individual detection of these metals, as well as the identification of Pb(II) in mixtures. Nonetheless, the signals of Cu(II) and Co(II) overlapped when detected simultaneously. The results indicated that although the pencil-lead electrode showed lower sensitivity and linearity than the glassy carbon electrode, these types of low-cost and accessible materials present an interesting opportunity for the in situ, fast, and economic monitoring of the water quality, following future optimization.*

KEY WORDS: electrochemical detection, pencil-lead working electrode, heavy metals, glassy carbon electrode.

1

***Harremanetan jartzeko/ Corresponding author:** Maialen Uribarrena, UPV/EHU, Gipuzkoako Ingenieritza Eskola, Donostia.  <https://orcid.org/0009-0001-7588-0597>, maialen.uribarrena@ehu.eus

Nola aipatu / How to cite: Carranza, Teresa; Guerrero, Pedro; dela Caba, Koldo; Uribarrena, Maialen (2026). << Arkatz-mina arrunt bat uraren kalitatea neurtzeko? Sistema elektrokimiko merke baten azterketa >>, Ekaia, 50, xx-xx. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.28183>)

Jasoa: urtarrilak 15, 2026; Onartua: maiatzak 20, 2026

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © 2026 UPV/EHU



Obra Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentziapean dago

1. SARRERA

1.1. Uretako etsai ikusezinak: metal astunak

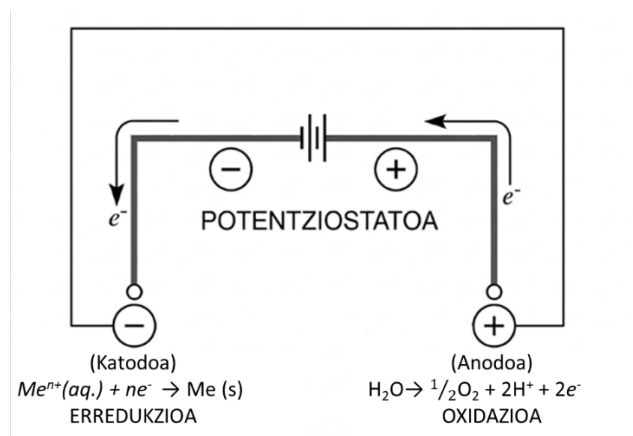
Metal astunen presentzia uretan, askotan ikusten ez diren arren, arazo larria bihurtzen ari da ingurumenari eta osasun publikoari dagokienean. Beruna, kobaltoa, kobrea eta arsenikoa bezalako metalak ingurune akuatikoetan maiz aurki daitezke hondakin industrial, meatzaritza jarduera, nekazaritza isuri edota beste edozein hondakinen kudeaketa okerren ondorioz [1]. Metal hauek organismo bizidunetan metatzen diren kutsatzaile iraunkorrak dira, uretako izakietan arrisku toxikoak eraginez. Hau honela, gizakion osasunean ere eragin toxikoa dute elikadura katearen bidez sartzen baitira gorputzean [2]. Metal astun hauekiko esposizio iraunkorrak arazo neurologikoak, organoetan kalteak eta beste hainbat osasun arazo larri ekar ditzake. Horregatik, metal hauen presentzia kontrolatzea beharrezkoa da uraren monitorizazio eraginkorraren bidez.

Metal astunen detekziorako absortzio atomikozko espektroskopia (AAS), induktiboki akoplatutako plasma-masa espektrometria (ICP-MS) eta X izpi fluoreszentzia (XRF) bezalako teknika analitiko instrumentalak erabili ohi dira beren sentikortasun eta zehaztasun handiagatik. Hala ere, metodologia hauek instrumentu garestien erabilera eskatzen dute, laginen prestaketa luzea izaten da eta pertsona adituen beharra dago [3,4]. Ondorioz, *in situ* eta denbora errealean kutsatzaileen monitorizazioa egiteko teknika hauen erabilera mugatua da. Horregatik, kostu baxuko, erantzun azkarreko eta aditua izan gabe erabili ahal izateko metodoak bilatzeko interes handia dago [5]. Egoera honetan, sistema elektrokimikoek arrakasta lortu dute azken urteotan metalen detekziorako, besteak beste, sentikortasun altua dutelako, erantzun azkarrak dituztelako, aldi bereko determinazioak egiteko gaitasuna dutelako eta eramangarriak direlako [6].

1.2 Nola funtzionatzen du elektroanalisiak metalen determinazioan?

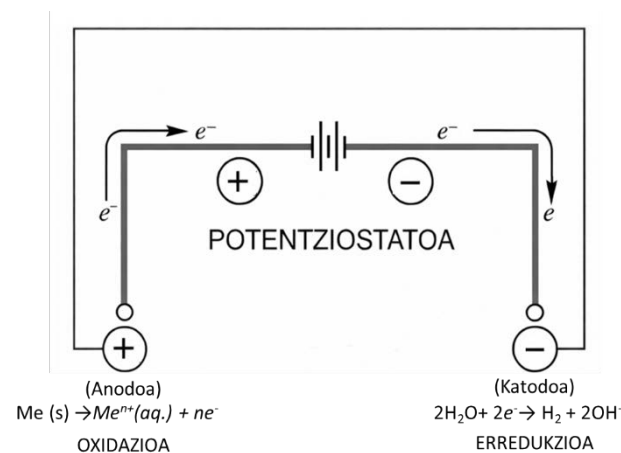
Sistema elektrokimiko bat hainbat elementu ezberdinez osaturik dago. Zeldak elektrokimiko moduan ezagutzen dena, hiru elektrodok eta elektrolito batek osatzen dute. Hiru elektrodoen artean, bakoitzak funtzio zehatz bat betetzen du detekzio-prozesuan:

- **Lan-elektrodoa:** Aztertu nahi den erreazio kimikoa (analitoaren oxidazioa edo erredukzioa) gertatzen den gainazala da. Honengatik, oso garrantzitsua da gainazal hau guztiz garbia eta ondo definiturik egotea [7].
- **Kontra-elektrodoa:** Zirkuitu elektrikoa ixten du, elektroien korrontearen fluxua ahalbidetuz. Kontra-elektrodoaren gainazala lan-elektrodoarena baino handiagoa izaten da eta horregatik platinozko alambre bat erabiltzen da normalean [7].



2. irudia. Metalaren erredukzio prozesuaren eskema zelda elektrolitikoan.

Ondoren, potentzial altuagoetarantz ekorketa egiterakoan, metatutako metalen oxidazioa ahalbidetzen da. Honen ondorioz, elektroiti-transferentzia bat gertatzen da, metala eta elektrodoaren artean elektroiti-fluxuaren norabidea aldatuz (**3. irudia**).



3. irudia. Metalaren oxidazio prozesuaren eskema zelda elektrolitikoan.

Prozesu horretan sortzen den elektroiti-fluxua (korrontea) neurtu egiten da, eta lortutako seinalea (gailurra) zuzenean erlazionatzen da uretan dagoen metal-kontzentrazioarekin. Metal bakoitzak potentzial ezberdin bat behar duenez oxidatzeko edo elektroiti-transferentzia hori gertatzeko, nahaste batean ioi ezberdinak bereiztea posible da [7]. Sistema elektrokimiko baten funtsa hau izanik, tresna eskuragarria bihurtzen da uretan metal ioiak detektatzeko, izan ere, hauek potentzial diferentzial bat ezarriz erreduzitu zein oxidatu daitezkeen analitoak dira, hala detektagarria den seinale bat sortuz.

1.3 Gure lan-elektrodoak: arkatx mina

Sistema elektrokimiko batean, lan-elektrodoak da seinalea jasotzeaz arduratzen den elementu nagusia. Tradizionalki, material nobleak (urrea edo platinoa) edo karbono beiratzatuko elektrodo estandarrek erabili izan dira, haien propietate elektrokimiko egonkorrengatik. Hala ere, azken urteotan, sistemaren kostua murrizteko eta elektrodoak erraztasun handiagoz aldatu ahal izateko, ordeztako materialak ikertzen hasi dira.

Gaur egun, grafitoan oinarrituriko materialak oso erakargarriak bihurtu dira lan-elektrodo gisa erabiltzeko, hauen kostu baxuagatik, eskuragarritasunagatik eta propietate elektrokimiko onengatik [10]. Grafitoaren kasuan elektrodi-transferentzia eraginkorra bere egiturak ahalbidetzen du eta ez bere konposizioak. Adibide moduan, diamanteak eta grafitoak konposizio bera dute (karbonoa) baina egitura ezberdina da eta honek elektrodi-transferentzian eragina du [11,12]. Horrez gain, gainazala aldatzeko edo funtzionalizatzeko gaitasunak sentorearen funtzionamendua hobetzea ahalbidetzen du [13].

Analisi estandarretan zein biologikoetan, arkatx-minazko elektrodo gordinen prestazioak (sentikortasuna eta errepikakortasuna) karbono beiratzatuko elektrodoenak berdintzera zein gaintzera iritsi dira [14]. Hala ere, arkatx-mina askoz merkeagoa eta lortzeko errazagoa da. Beste lan batean, Schiff gatx batekin funtzionalizatutako arkatx mina elektrodo batek Cu^{2+} , Pb^{2+} , eta Cd^{2+} determinatzeko gaitasuna erakutsi zuen, banaka zein nahastean [15], hala ingurumenaren monitorizaziorako hautagai ezin hobe bihurtuz.

Lan hauek material arrunt bat erabilera konplexu batean erabil daitekeela erakusten dute, beti ere behar diren aldaketa zehatzak aurrera eramanez. Dena den, funtzionalizazio edo aldaketa kimikoek sistemaren sinpletasuna mugatu eta kostua handitzen dute. Hori dela eta, lan honetan ikuspegi minimalista bat proposatzen da: inolako aldaketa kimikorik gabe, arkatx-mina arrunt eta gordin bat erabiltzea, uretan beruna, kobrea eta kobaltoa detektatzeko. Horretarako, pulstuzko voltametri diferentziala (DPV) erabili da, bai metalak banaka eta baita nahastean detektatzeko ere. Arkatx-mina elektrodo gordinarekin lorturiko erantzunak karbono beiratzatuko elektrodo estandar batekin lorturikoekin konparatu dira, arkatx-minaren baliagarritasuna egiaztatzeko.

Pulstuzko voltametri diferentzialak (DPV), uretan dauden metal kantitate oso txikiak detektatzeko sentikortasun handia du. Teknika honen abantailetakoa bat seinalearen zarata murrizten duela da. Hemen, sistemak potentzial-pulstu txikiak ematen dizkio laginari eta teknikak pulstua eman baino lehenago eta eman ondoren dagoen korrontearen arteko aldea neurtzen du. Horri esker, metalaren seinalea askoz garbiagoa da eta metal kontzentrazio oso baxuak detektatzeko aukera ematen du. Bukatzeko, emaitza gisa, grafiko batean gailurrak lortzen dira [16]. Gailurraren altuera, hau da, korrontearen intentsitatea, proportzionala da metal kontzentrazioarekiko, eta grafikoan gailurra zein potentzialean agertzen den ikusita, zein metal mota den identifika daiteke.

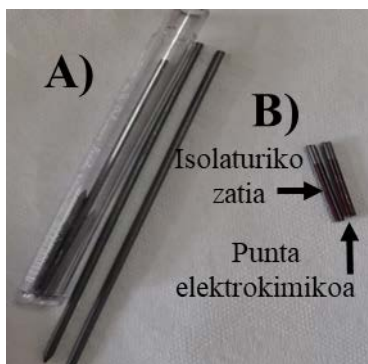
2. GURE ESPERIMENTUA: ARKATZ-MINAREN AZTERKETA METAL ASTUNEN DETEKZIORAKO

2.1. Materialak

Kutsatzaileen disoluzioak prestatzeko ur destilatua eta gatz ezberdinak erabili ziren: kobre(II) kloruro dihidratatua (% 99-ko purutasuna) eta kobalto(II) kloruro hexahidratatua (% 99-ko purutasuna) PanReac-en erositakoak eta Sigma-Aldrichen hornitutako berun(II) nitratoa (% 99,99-ko purutasuna). 0,2 mol/L azetatozko disoluzio indargetzailea prestatzeko Sigma-Aldrichetik lortutako sodio azetato anhidroa (% 99-ko purutasuna), eta azido azetiko (% 99,8-ko purutasuna) erabili ziren. Elektrodo moduan Filgo markako 2 mm diametroko eta 2B gogortasuna mailako arkatz-mina erabili zen. Prestatutako lan elektrodoaren jardura elektrokimikoa aztertzeko disoluzioa Sigma-Aldrichen erositako $K_3[Fe(CN)_6]$ (% 99-ko purutasuna) eta KNO_3 (% 99-ko purutasuna) erabiliz prestatu zen. Elektrodoa garbitzeko 2,0 mol/L azido nitriko (PanReac, % 68-ko purutasuna) erabili zen.

2.2. Arkatz-minan oinarritutako lan elektrodoaren prestaketa

Lan elektrodoaren prestaketarako, 2,0 mm diametroko eta 2,7 cm luzerako Filgo markako arkatz-mina erabili zen. Punta elektrolitiko leuntzeko iragazki-papera erabili zen, honekin igurtziz gainazal homogeneo eta leuna lortu arte, inolako ageriko irregulartasunik gabe. Gainerako arkatz-mina zatia, azken 7,0 mm-ak izan ezik, pintura isolatzaile batekin isolatu zen, analitoak prestatutako gainazalarekin bakarrik kontaktuan egon zitezen eta hala seinale erreproduzigarriago bat lortzeko. Arkatz-mina hiru elektrododun sistema elektrokimikora konektatu zen, hau da, kontra-elektrodo zein erreferentzia-elektrodoarekin konektatu zen, isolatu gabeko puntatik kable isolatzaile batekin (**4. irudia**). Neurketa bakoitzaren aurretik eta ondoren, lan-elektrodoaren punta elektrolitikoarekin garbitu zen 5 minutuz.



4. irudia. A) Lan elektrodorako erabili den arkatz mina eta B) prestatutako lan elektrodoak.

2.3. Sistema elektrokimikoaren prestaketa

Neurketa elektrokimikoak hiru elektrodozko sistema arrunt batekin eraman ziren aurrera: arkatz minazko lan elektrodoak, Ag/AgCl-ko erreferentzia elektrodoak eta platinozko kontra-elektrodoak. 0,2 mol/L-ko azetato disoluzio indargetzailea 5eko pH-an erabili zen elektrolito moduan. Neurketa elektrokimikoen datuak jaso eta gordetzeko eta analisiak egiteko PalmSens4 potentziostatoa (PalmSens) erabili zen, PSTrace 5.9 softwarearekin (PalmSens). Karbono beiratzatuko lan elektrodo bat (Basi MF-2012) erabili zen prestatutako lan elektrodoak elektrodo estandar batekin konparatzeko.

2.4. Neurketa elektrokimikoak

Prestatutako elektrodoak elektrokimikoki aktiboak zen ikusteko voltametria ziklikoa (CV) erabili zen 5,0 mmol/L $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ eta 0,1 mol/L KNO_3 disoluzio batean. Hasierako potentziala -0,5 V-tan ezarri zen, eta 1 *vertex* eta 2 *vertex* potentzialak -0,5 V-tan eta 1 V-tan ezarri ziren, hurrenez hurren. Voltametria zikliko batean *vertex* potentzialak ekorketaren noranzkoa noiz aldatzen den adierazten du. Potentzial-tartea 0,01 V-tan ezarri zen eta eskaneatze-indizea 0,1 V/s-tan.

Neurketa baino lehen, aurretratamendu bat egin zen, -1,5 V-ko potentziala eta 230 s-ko deposizio-denborarekin. Prozesu hau irabiaketa konstantepean egin zen. Detekziorako, -1,2 V eta 1,0 V tarteko tentsioa ezarri zen, potentzial-tartea 0,01 V-koa eta potentzial-pultsua 0,025 V-koa izanik. Pultsu bakoitzaren iraupena 0,02 s-koa ezarri zen eta eskaneatze-tasa, aldiz, 0,1 V/s-tan. Neurketa bakoitzaren ondoren 1,0 V-ko potentzialarekin 230 s-tan tratatu zen elektrodoak, garbitzeko. Honen ostean, prestatutako lan elektrodoak azido nitrikoarekin garbitu zen gera zitezkeen metalak kentzeko.

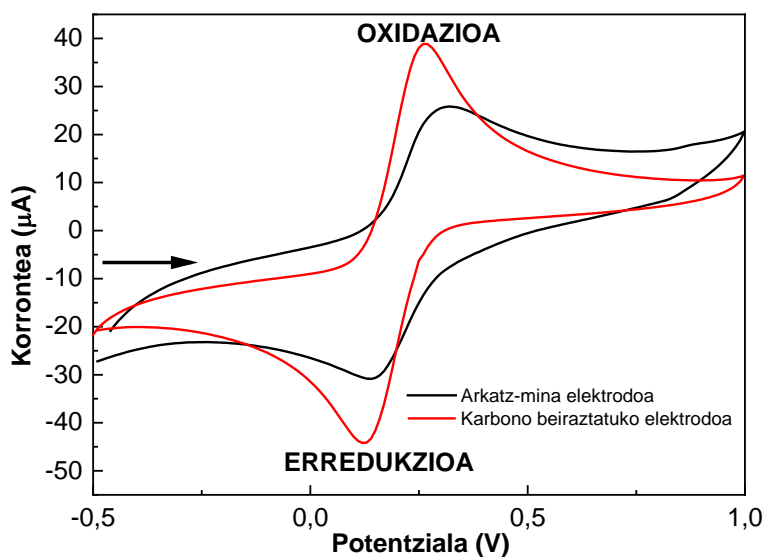
3. EMAITZAK

3.1. Arkatz mina lan elektrodoaren ebaluazioa elektrokimikoa

Voltametria ziklikoaren bidez ikusi zenez, arkatz-minaren eroankortasun elektrikoa karbono beiratzatuko elektrodo komertzialaren parekoa izan zen. **5. irudian** ikus daitekeen bezala lortutako seinaleak oso garbiak eta simetrikoak izan ziren, elektrodo garestiagoekin konparagarriak izanik. Honekin, beraz, prestatutako lan-elektrodoak detekzio elektrokimiko bat egiteko portaera aproposa zuela frogatu zen.

Bi lan-elektrodoekin lortutako potentzialek ezberdintasun txiki bat erakutsi zuten: 0,06 V ingurukoa oxidazioan eta 0,02 V ingurukoa erredukzioan. Honetaz gain, arkatz-minarekin lorturiko korrone-intentsitatea ($\approx 29,50 \mu\text{A}$) karbono beiratzatuko elektrodoarekin lortutakoa ($\approx 43,90 \mu\text{A}$) baino ahulagoa izan zen. Jakina da elektrodoaren gainazal propietateek eta erabilitako materialek eragin nabarmena dutela potentzian [17], beraz, badirudi arkatz-minak karbono beiratzatukoak baino oztopo handiagoa jartzen diola elektro-transferentziari. Lortutako emaitzek baieztatu dute lan honetan garatutako

elektrodoaren gainazala elektrokimikoki aktiboa dela eta analisi elektrokimikoak egiteko erabilgarria dela.



5. irudia. Arkatz-mina lan elektrodoaren eta karbono beiraztatuko elektrodoaren voltamograma ziklikoa 5,0 mmol/L $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ eta 0,1 mol/L KNO_3 disoluzioan.

3.2. Kutsatzaileen analisisa uretan

3.2.1 Metalak bakarka

Prestatutako elektrodoak metalen detekzioarako aplikazioetan erabilgarria den aztertzeko, ur disoluziotako metal astunak - zehazki beruna, kobrea eta kobaltoa - detektatzeko gaitasuna aztertu zen. Metalen determinazioa banaka egitean, metal ioi bakoitzak seinale elektrokimiko bereizgarri bat eman zuen, metal bakoitzarentzako bereizgarrian den potentzialaren inguruan (**6. irudia**). Ondorengo taulan (**1. taula**), arkatz-minazko lan elektrodoarekin eta karbono beiraztatutako elektrodoarekin lorturiko potentzialen arteko konparaketa ikus daiteke.

1. taula. Metal bakoitzarentzako lan-elektrodo bakoitzarekin lortu den potentziala.

Potentziala (V)		
Elektrodoa	Arkatz-mina	Karbono beiraztatua
Cu(II)	0,07 ± 0,04	0,05 ± 0,03
Pb(II)	-0,44 ± 0,08	-0,51 ± 0,05

Co(II)	-0,15 ± 0,05	-0,24 ± 0,02
--------	--------------	--------------

Honetaz gain, arkatz-mina elektrodoarekin lortutako korrante intentsitateak 0,7-10,1 μA tartean kokatu ziren; karbono beiraztatuko elektrodoarekin, aldiz, 15,5-55,0 μA bitartean. Desberdintasun hauek elektrodoaren gainazal eta materialarekin erlazionatu daitezke, izan ere, lehen aipatu bezala, materialaren izaerak edota geometriak elektrodo-transferentzian eragiten dute, erredox potentzialak edota potentzial gailurren intentsitatea aldatuz.

Prestatutako lan elektrodoarekin detektatu ziren kontzentrazio baxuenak 0,44 mg/L Pb(II), 0,60 mg/L Cu(II) eta 0,74 mg/L Co(II) izan ziren. Nabarmentzekoa da kobreakaren kasuan, prestatutako elektrodo ur edangarrian onartutako kobreakaren kontzentrazio maximoa baino Cu(II) kontzentrazio baxuagoak detektatzeko gai izan zela, Europar batasunak 2,0 mg/L-tan ezartzen baitu muga [18].

Behin metalak banaka detektatzeko gaitasuna egiaztatuta, lortutako seinalearen eta metal-kontzentrazioaren arteko erlazioa, hau da, linealtasuna aztertu zen. Prozesu hau funtsezkoa da sentsoarekin metal kantitatea zehaztasunez kuantifikatu dezakeen ebaluatzeko. Korrontearen intentsitatea kontzentrazioaren aurrean irudikatzean lortzen den grafikoaren R^2 balioak adierazten du zein nolakoa den bien arteko linealtasuna: R^2 balioa 1etik zenbat eta hurbilago egon, orduan eta handiagoa da linealtasuna eta era berean sentsoarekin fidagarritasuna analitiko kuantifikatzeko.

Kobreakari (Cu) dagokionez, emaitzak esanguratsuak izan ziren. 0,6-1,5 mg/L-ko tartean, arkatz-minazko elektrodoak erakutsi zuen linealtasuna (R^2) 0,9589-koa izan zen, karbono beiraztatuko elektrodo estandarrena 0,9187-koa izan zelarik 0,3-1,5 mg/L tartean, antzeko linealtasuna erakusten badute ere, karbono beiraztatuko elektrodo estandarrek determinazio tarte zabalago batean ahalbidetzen du.

Berunaren (Pb) kasuan, ordea, aldea nabarmenagoa izan zen. Karbono beiraztatuko elektrodoak erakutsi zuen linealtasuna 0,9995-ko izan zen 0,44-1,31 mg/L-ko tartean. Arkatz-mina elektrodoak, ordea, ez zuen joera linealik erakutsi tarte horretan ($R^2 = 0,1268$), berunaren detekzio kuantitatibo bat egiteko aukera mugatuz.

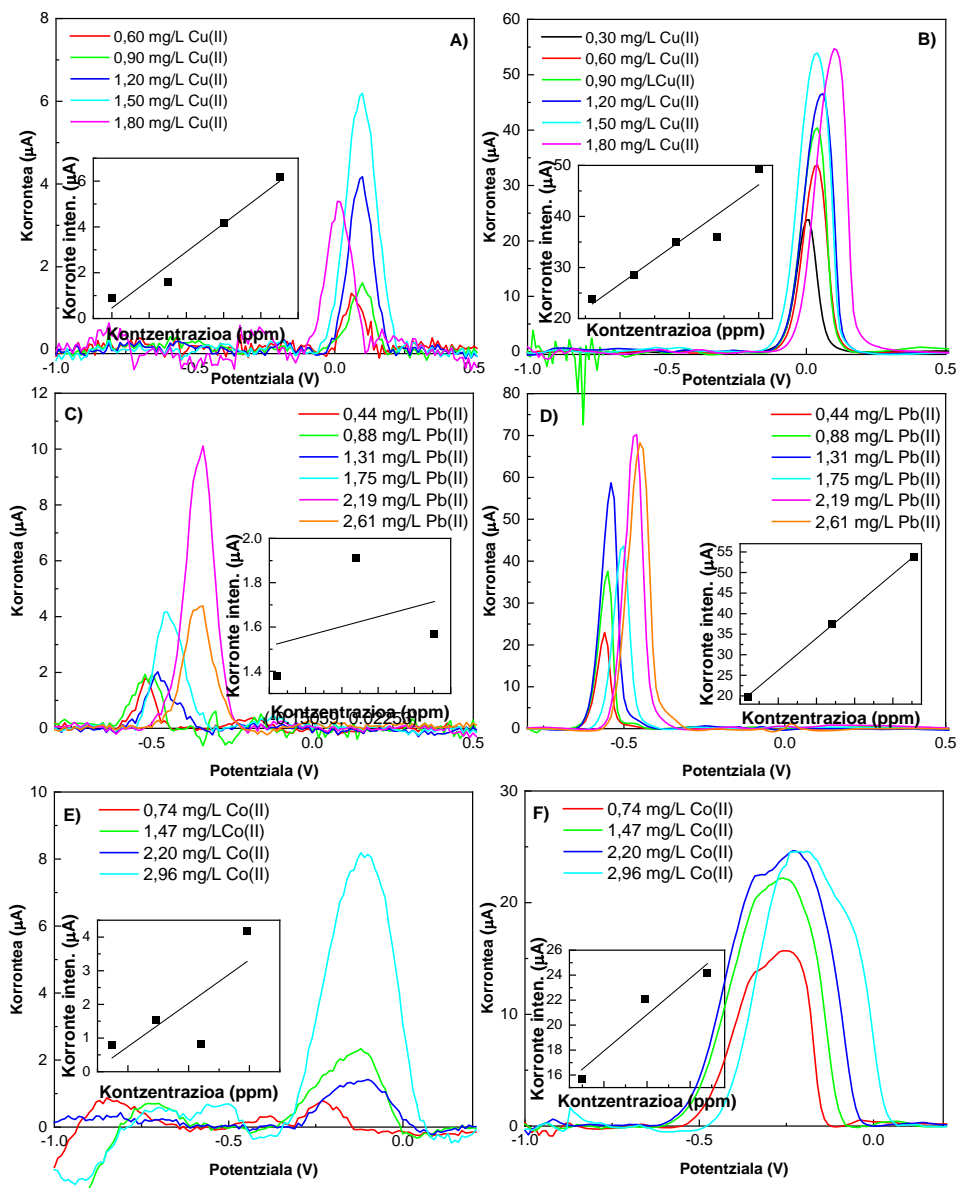
Kobaltoari (Co) dagokionez, emaitzek bi elektrodoen arteko desberdintasuna berretsi zuten. 0,74- 2,96 mg/L-ko tartean, karbono beiraztatuko elektrodoak 0,6955-eko R^2 balioa erakutsi zuen, eta arkatz-minak, berriz, 0,5872-koa. Tarte 0,74-2,20 mg/L-ra mugatzean, karbono beiraztatuko elektrodoaren linealtasuna nabarmenki igo zen ($R^2=0,9196$).

Kasu bakoitzean lorturiko linealtasunaren maldak kontuan hartuta, ikusi zen determinazio guztietan karbono beiraztatuko elektrodo sentikorragoa izan zela arkatz-minazko elektrodo baino, izan ere, malda balio guztiak altuagoak izan ziren (**2. taula**).

2. taula. Metal bakoitzaren determinazioarako lortu zen linealtasunaren malda.

Malda		
Elektrodoa	Arkatz-mina	Karbono beirztatua
Cu(II)	6,1386	19,4406
Pb(II)	0,2207	38,9948
Co(II)	1,4731	5,8243

Hau horrela izanik, ikusi zen karbono beirztatuko elektrodoekin lorturiko seinaleek bereizmen hobea erakutsi zutela arkatz-minarekin alderatuta. Arkatz-minazko lan elektrodoaren kasuan, seinalea ahulagoa izateak sentikortasuna gutxitzen du. Bereziki, arkatz-minaren kasuan ikusitako linealtasun faltak adierazten du elektrodoaren gainazalak ez duela elektro-transferentzia edo trukea modu uniformean bideratzen.

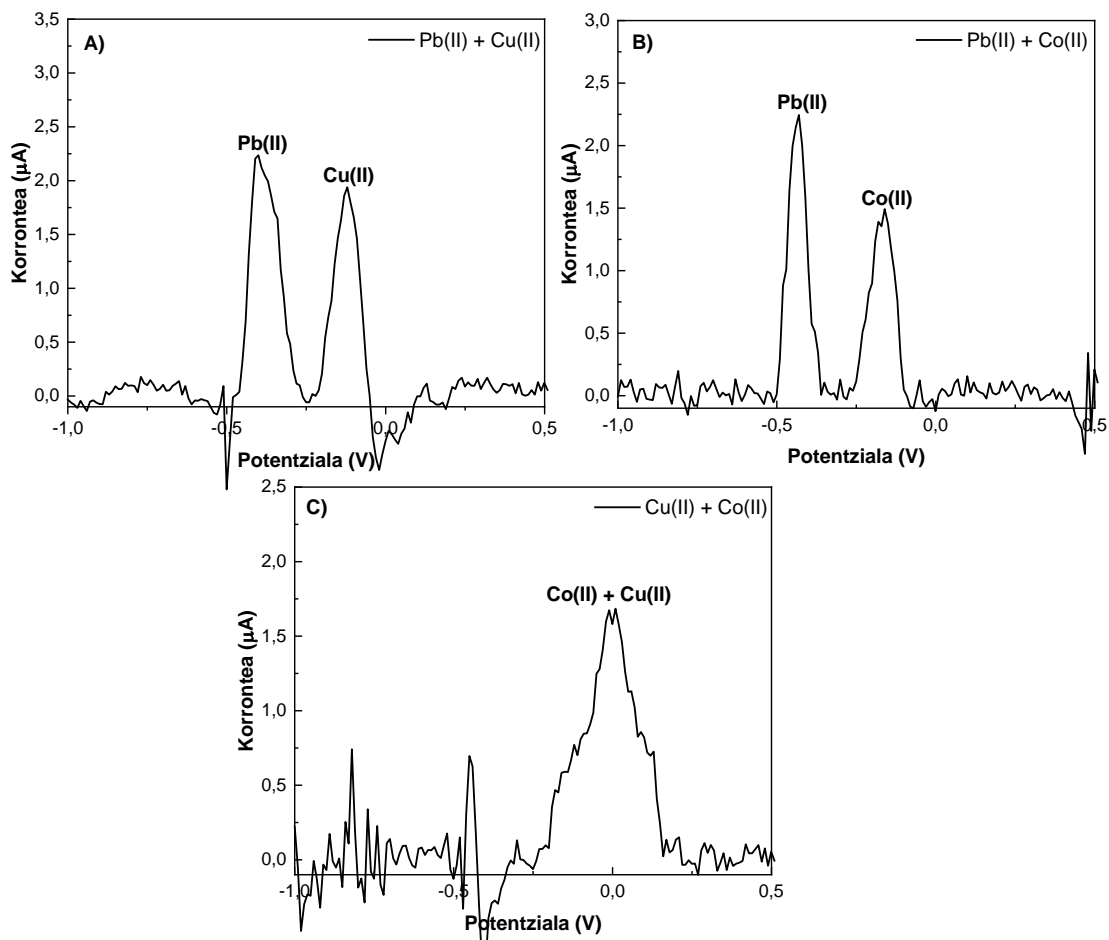


6. irudia. Metalen kontzentrazio ezberdinen determinazioa: Cu(II) detekzioarako **A)** arkatz minazko elektrodoarekin eta **B)** karbono beiratzatuko elektrodoarekin, Pb(II) detekzioarako **C)** arkatz minazko elektrodoarekin eta **D)** karbono beiratzatuko elektrodoarekin, eta Co(II) detekzioarako **E)** arkatz minazko elektrodoarekin eta **F)** karbono beiratzatuko elektrodoarekin.

3.2.2 Metalak nahastean

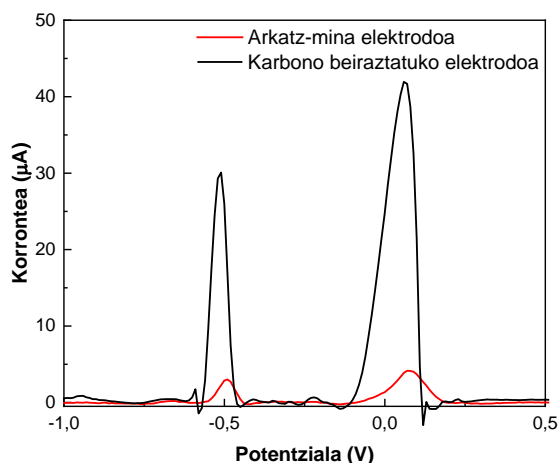
Arkatz-minazko elektrodoak metal ioi nahasteak detektatzeko gaitasuna erakutsi zuen. Berun eta kobrea edota berun eta kobaltozko disoluzioak aztertzerako garaian, gailur bakoitza erraz bereiz zitekeen, horrek analitoen aldibereko determinazioa ahalbidetuz (**7A eta B irudiak**). Honek Pb(II)ioiak, Cu(II) eta Co(II) ioien presentzian, segurtasunez identifika daitezkeela frogatzen du. Aldiz, nahiz eta kobrea

eta kobaltoa banaka detektatzeko gaitasuna erakutsi, biak batera analizatzean puntak gainjarri egiten dira, ondorioz, seinale zabalago bat lortuz eta determinazioa eragotziz (**7C irudia**).



7. irudia. Metal ezberdinen nahasketen determinazioa arkatx minazko lan elektrodoak erabiliz: **A)** 2,17 mg/L Pb(II) + 0,66 mg/L Cu(II), **B)** 2,17 mg/L Pb(II) + 4,32 mg/L Co(II) eta **C)** 2,5 mg/L Co(II) + 1,68 mg/L Cu(II).

Hiru metal-ioiz osatutako disoluzioa aztertzean, arkatx-minazko elektrodoak zein karbono beiratzatukoak antzeko portaera erakutsi zuten: hiru seinale izan beharrean, bi gailur bakarrik hauteman ziren (**8. irudia**). Lehenengoa, -0,50 V inguruan agertzen dena, berunari (Pb(II)) dagokio modu argian. Bigarren gailurrean, ordea, kobreak (Cu(II)) eta kobaltoaren (Co(II)) seinaleak gainjarri egiten dira. Horrek adierazten du sistemak eta baita karbono beiratzatuko elektrodoak zailtasunak dituztela egungo baldintza esperimentaletan, nahaste batean bi metal horiek banaka bereizteko.



8. irudia. Nahasketaren determinazioa arkatz mina elektrodoa eta karbono beiraztatuko elektrodoak erabiliz: 1,75 mg/L Pb(II) + 1,48 mg/L Co(II) + 1,20 mg/L Cu(II).

4. ABANTAILAK, DESABANTAILAK ETA ETORKIZUNeko LANA

Azterketa honetan lorturiko emaitzek elektrodo mota bakoitzari dagozkion abantaila zein desabantailak agerian utzi dituzte, **3. taulan** azaltzen diren moduan.

3. taula. Erabilitako bi elektrodoen abantailak zein desabantailak.

	Abantailak	Desabantailak
Arkatz-mina elektrodoa	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrodo prestaketaren kostu baxua eta eskuragarritasuna. • Ikuspegi minimalista, ez du aldaketa konplexurik behar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seinale ahula. • Linealtasun falta handiagoa. • Nahasteen muga.
Karbono beiraztatuko elektrodoa	<ul style="list-style-type: none"> • Linealtasun ona kontzentrazio tarte zehatzetan. • Sentikortasun altuagoa. • Neurketa egonkorragoak. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kostu altua.

Lan honetan frogatu denez, grafitozko arkatz-mina arrunt bat erabiliz prestaturiko lan-elektrodoak portaera elektrokimiko ona erakusten du. Sistema hau gai da Pb(II), Cu(II) eta Co(II) ioiak uretan banaka detektatzeko, nahiz eta kuantifikazioa mugaturik egon, karbono beiraztatuko elektrodo estandarrekin alderatuz arkatz-mina elektrodoak zehaztasun eta sentikortasun baxuagoa erakutsi baitu. Hala eta guztiz ere, grafitoan oinarritutako material eskuragarri honek metal astunen detekziorako aukera simple eta bideragarria dela frogatu du, bereziki ingurumenaren *in situ* monitorizazio azkar eta merkea egiteko. Hala ere, azpimarratu behar da lan hau sistemaren bideragarritasuna frogatzeko lehen hurbilketa bat

dela. Proba pilotuetan ikusi denez, sistemak optimizazio prozesu sakonagoa behar du errepikakortasun maila egokiak eta estatistikoki esanguratsuak bermatzeko; hori dela eta, azterketa hori hurrengo ikerketa-faserako utzi da.

Laburbilduz, arkatz-minak metalak banaka detektatzeko balio duen arren, kuantifikazio zehatzagoa lortzeko, gainazalaren eta metodoaren optimizazioan sakondu behar da. Sistemaren eraginkortasuna hobetzeko, honako urrats hauek proposatzen dira etorkizuneko ikerketetarako:

- Seinalea optimizatzeko parametro esperimentalak (potentzialak, denborak...) aldatu beharko lirakeke erresoluzioa eta zehaztasuna hobetzeko.
- Arkatz-minaren punta leuntzeko teknika berriak ikertu beharko lirakeke, gainazaleko elektroitransferentzia uniformeagoa ahalbidetzeko eta zehaztasuna zein errepikakortasuna areagotzeko.
- Analisi analitiko zehatzagoak egin beharko lirakeke: erreplikak, zuriaren analisiak, eta lagin errealean analisia.
- Kuantifikazio fidagarria lortzeko gainazalaren eta metodoaren optimizazio egin beharko lirakeke ioi kontzentrazio eta korronte intentsitatearen arteko linealtasuna lortzeko.
- Nahaste batean ioi guztien bereizketa lortzeko parametro berriak (potentzial tartea, deposizio denbora, eta potentzial pultsua) ikertu beharko lirakeke.

ESKER ONAK

Teresa Carranzak (POS_2025_1_0045) eta Maialen Uribarrenak (Ikertalent Programa) Eusko Jaurlaritzak emandako diru laguntza eskertzen dute.

5. ERREFERENTZIAK

- [1] TCHOUNWOU, P. B.; YEDJOU, C. G.; PATLOLLA, A. K.; SUTTON, D. J. 2012. <<Heavy Metal Toxicity and the Environment>>. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*, **3**, 133–164.
- [2] JAISHANKAR, M.; TSETEN, T.; ANBALAGAN, N.; MATHEW, B.B.; BEEREGOWDA. K.N. 2014. <<Toxicity, Mechanism and Health Effects of Some Heavy Metals>>. *Interdisciplinary Toxicology*, **7**, 60–72.
- [3] QUANG, D. T.; KIM, J. S. 2010. <<Fluoro- and Chromogenic Chemodosimeters for Heavy Metal Ion Detection in Solution and Biospecimens>>. *Chemical Reviews*, **110**, 6280–6301.

- [4] ARAGAY, G.; PONS, J.; MERKOÇI, A. 2011. <<Recent Trends in Macro-, Micro-, and Nanomaterial-Based Tools and Strategies for Heavy-Metal Detection>>. *Chemical Reviews*, **111**, 3433–3458.
- [5] ZHANG, L.; PENG, D.; LIANG, R.-P.; QIU, J.-D. 2018. <<Graphene-Based Optical Nanosensors for Detection of Heavy Metal Ions>>. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **102**, 280–289.
- [6] PUJOL, L.; EVRARD, D.; GROENEN-SERRANO, K.; FREYSSINIER, M.; RUFFIEN-CIZSAK, A.; GROS, P. 2014. <<Electrochemical Sensors and Devices for Heavy Metals Assay in Water: The French Groups' Contribution>>. *Frontiers in Chemistry*, **2**, 19.
- [7] ELGRISHI, N.; ROUNTREE, K. J.; MCCARTHY, B. D.; ROUNTREE, E. S.; EISENHART, T. T.; DEMPSEY, J. L. 2018. <<A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry>>. *Journal of Chemical Education*, **95**, 197–206.
- [8] LEFROU, C.; FABRY, P.; POIGNET, J.-C. 2012. *Electrochemistry: The Basics, With Examples*. Springer, Verlag Berlin Heidelberg.
- [9] EMEJI, I. C.; AMA, O. M.; AIGBE, U. O.; KHOELE, K.; OSIFO, P. O.; RAY, S. S. 2020. *Nanostructured Metal-Oxide Electrode Materials for Water Purification: Fabrication, Electrochemistry and Application*. Springer International Publishing, Cham.
- [10] SILVA, I. B.; ARAÚJO, D. M. DE; VOCCIANTE, M.; FERRO, S.; MARTÍNEZ-HUITLE, C. A.; SANTOS, E. V. D. 2021. <<Electrochemical Determination of Lead Using A Composite Sensor Obtained from Low-Cost Green Materials: Graphite/Cork>>. *Applied Sciences*, **11**, 2355.
- [11] YARDIM, Y.; ŞENTÜRK, Z. 2013. <<Electrochemical Evaluation and Adsorptive Stripping Voltammetric Determination of Capsaicin or Dihydrocapsaicin on a Disposable Pencil Graphite Electrode>>. *Talanta*, **112**, 11–19.
- [12] WANG, D.; KARATO, S.; JIANG, Z. 2013. <<An Experimental Study of the Influence of Graphite on the Electrical Conductivity of Olivine Aggregates>>. *Geophysical Research Letters*, **40**, 2028–2032.
- [13] SAGHATFOROUSH, L.; MAHMOUDI, T.; KHORABLOU, Z.; NASIRI, H.; BAKHTIARI, A.; SAJADI, S. A. A. 2023. <<Electro-Oxidation Sensing of Sumatriptan in Aqueous Solutions and Human Blood Serum by Zn(II)-MOF Modified Electrochemical Delaminated Pencil Graphite Electrode>>. *Scientific Reports*, **13**, 16803.
- [14] KARIUKI, J.; ERVIN, E.; OLAFSON, C. 2015. <<Development of a Novel, Low-Cost, Disposable Wooden Pencil Graphite Electrode for Use in the Determination of Antioxidants and Other Biological Compounds>>. *Sensors*, **15**, 18887–18900.

- [15] AHMED, A. S.; MOHAMED, M. B. I.; BEDAIR, M. A.; EL-ZOMRAWY, A. A.; BAKR, M. F. 2023. <<A New Schiff Base-Fabricated Pencil Lead Electrode for the Efficient Detection of Copper, Lead, and Cadmium Ions in Aqueous Media>>. *RSC Advances*, **13**, 15651–15666.
- [16] SCHOLZ, F., BOND, A. M., COMPTON, R. G., FIEDLER, D. A., INZELT, G., KAHLERT, H., KOMORSKY-LOVRIĆ, Š., LOHSE, H., LOVRIĆ, M., MARKEN, F., NEUDECK, A., RETTER, U., SCHOLZ, F., STOJEK, Z. 2010. *Electroanalytical Methods: Guide to Experiments and Applications*. Springer: Berlin, Heidelberg.
- [17] DAVID, I. G.; POPA, D.-E.; BULEANDRA, M. 2017. <<Pencil Graphite Electrodes: A Versatile Tool in Electroanalysis>>. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, **2017**, 1905968.
- [18] *Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano (versión refundida) (Texto pertinente a efectos del EEE)*; 2020; Vol. 435. <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/spa> (accessed 2025-07-22).