



ÉKOTOXIKOLOGIA: MATEMATIKA INGURUMENAREN ERRESKATERA

JOSUNE URIEN
Urrutiko Hezkuntzarako Unibertsitate Nazionaleko
irakasle-tutorea (UNED), Bergarako ikastetxe elkartuan

RODRIGO GIL-MERINO
Kantabriako Unibertsitatea. Simulazioan eta eredu
matematikoan aplikazioetan aditua

Giza biztanleriaren hazkundeak baliabide naturalen gaineko presio handia dakar berekin. Horren ondorioz, batetik, naturan eskuragai dauden lehengaien neurritz gaindiko eskaria sortzen da; bestetik, gizakiok funtsezko zerbitzuez hornitzen gaituzten ekosistemetan albo-ondorio kaltegarriak agertzen dira, bai eta gure osasunean zuzenean eragiten duten efektuak ere. Zorionez, ekosistema horietan dauden zenbait bizidunek haien kalitatea bermatzen dute. Bioadierazle horiek aztertuz, ekosistemek hondakinak jasateko duten ahalmenaren muga hobeto ezagutuko dugu, eta hala, ingurumenaren degradazioa saihestu.

GIZA EKINTZA ETA POLUZIOA

Gure hondakinen ibilbide osoa eta giza populazioetan duten eragina ezagutzea ezinezkoa da normalean, tartean dauden faktoreengatik eta faktore horiek kudeatzeko dugun ezgaitasunagatik. Hala ere, badira lagungarri izan daitezkeen izaki bizidun batzuk: bizi ahal izateko, kondizio zehatz batzuk behar dituzte ingurunean; hain zuzen, ekosistema batean egotea edo falta izatea ekosistema horren kalitatearen adierazle da. Adierazle biologiko edo *bioadierazle* izenez ezagutzen dira. Zenbait konposaturen kaltegarritasuna aztertzeko, konposatu horiek eta bioadierazleen populazio bakartuak kontaktuan jar daitezke. Horrela lortutako informazioa lagungarri izan daiteke gure industriaren hondakinen kudeaketa hobetzeko, baita ingurumenaren eragiten duten kaltea murrizteko ere.

Ingurune urtarretara ezin konta ahala kutsatzaile iristen dira egunero, bai isurketa handietan (poluzio puntuala), baita etengabeko iragazte eta isurketa txikiago eta zehaztugabeen bidez ere (poluzio lausoa). Azkenengo horiek hain ikusgarriak ez izan arren, besteak bezain kaltegarriak dira, eta kontrolatzen zailagoak dira. Arriskutsuak izan daitezken osagaien zerrenda etengabe berrikusten da, baita ingurumen-inpaktua izan dezaketen gutxieneko dosiak ere. Dena den, urtero milaka produktu berri merkaturatzen dira (pestizidak, belar-pozoiak, industrian erabiltzeko konposatu kimikoak...). Aldi berean, legez onartutako gutxieneko dosiak baino kantitate txikiagoak erabiliz ingurumenari egindako kaltearen ebidentzia zientifikoak gero eta ugariagoak dira, baita ordura arte kaltegarritzat jotzen ez zirenenak ere.

Beste adibide bat ibaietan berriki aurkitutako eguzki-kremen eta beste zenbait produktu kosmetikoren konposatu kimikoak dira. Substantzia horiek hondakin-uren bi-



Ez da erraza industriaren eta naturaren arteko oreka. ARG.: © MORGUEFILE.

dez igarotzen dira ibaietara (gaur eguneko iragazki gehienek ez dituzte geldiarazten), eta disruptore endokrinoak dira, hau da, eragina dute izaki bizidunen sistema endokrinoan; izan ere, garapena, ugalketa edota biziraupena aldatzen dizkiete, eta, ondorioz, ekosistemaren biodibertsitateari ere kalte egiten diote.

Azken finean, gizakiak erabilitako konposatu kimikoen ingurumen-inpaktuaren azterketak ezinbesteko egiten ditu ikerkuntza eta etengabeko kontrolak. Metodo ezagunena analisi fisiko-kimikoa da: ur-laginak hartu, eta, zenbait prozedura egin ondoren, uraren aldagaiak (pH-a, temperatura, gogortasuna...) analizatzen dira, baita duten arriskugarritasunagatik aukeratutako konposatu kimikorik ba ote dagoen ere (horregatik da garrantzitsua konposatu arriskutsu horien zerrenda aldizka berrikustea). Ezinbesteko baliabidea da, eta laginketa egiteko unean urak duen egoeraren "argazkia" eskaintzen digu.

Dena den, esan bezala, gerta daiteke uretan dauden substantzia kaltegarri batzuk oraindik ez egotea kontroleko zerrendetan, edo substantzia horietarako analisi kimikorik ez egotea. Halaber, litekeena da laginketa egin baino aste batzuk lehenago gertatu izatea isurketa: uretan ez litzateke arrastorik geldituko, baina konposatu horrekiko sentikortasun berezia duten organismoen populazioetan kalte handia gertatuko litzateke. Analisi fisiko-kimikoen une jakin bateko egoeraren berri ematen dute; hori konpentsatzeko, uren egoera biologikoaren jarraipena egiten da. Poluzioarekiko sentikortasunagatik aukeratutako izaki bizidunen presentzia eta populazioa aztertzen dira. Lehen aipaturiko bioadierazleak dira. Bioadierazle horien artean daude, besteak beste, algak, arrainak eta artropodoak. Esate baterako, makroorganismo bentoniko edo bentikoek (eltxoen larbek, krustazeo



Lursagua Sakonetan (Gipuzkoa). Orain arte, ugaztunen eredu gehienak karraskariekin egin dira. ARG.: © JOSUNE URIEN.

txikiek, moluskuek...) interes bereziko taldea osatzen dute: haien tamainak laginketa errazten du, bizi-zikloaren zati handi bat jalkinetan (hondakinak pilotzeko ohiko lekuan) igarotzen dute, kate trofikoan funtsezko lekua dute, eta haien biziraupena oso egokia da isurketen osteko aldaketak aztertzeko. Poluzioarekiko sentikortasuna ez da berdina espezie guztietan, ezta konposatu guztien aurrean ere. Beraz, espezie bat edo beste nagusitzeak, bai eta aurkitutako espezien dibertsitateak ere, poluzioaren jatorria identifikatzeko laguntzen dute.

Hona hemen hurbileko adibide bat: Uraren Euskal Agentziak EAeko lurrazaleko urmasen egoeraren jarraipena egiteko sarea ezarri du; erkidego osoan hautatutako laginketa-estazioetan aldizkako kontrolak egingo

dira jarraipen hori gauzatzeko. Azterketa fisiko-kimiko, biologiko eta ekologikoak egiten dira, alderdi horiek guztiak alderatuz bakarrik lor baitaiteke gure uren egoeraren egiazko irudia. Zarauzko Iñurritza errekan dago laginketa-estazioetako bat. 2010ean, ibai txiki horren egoera fisiko-kimikoaren kalifikazioa "ona" izan zen; izan ere, fenolak, fluoruroak, amonioa eta kobrea aurkitu ziren arren, elementu horien kantitateek ez zuten kalitate-araua gaunditzen. Baina azterketa biologikoak, besteak beste, hutsuneak aurkitu zituen makroorganismoen populazioetan; halaber, urtarokiko bariazioak ikusi ziren, bai eta espezie sentikorren presentzia oso txikia zela eta *Chironomus riparius* eltxoa nagusitzen zela ere. Baldintza horiek guztiak aztertuta ikusi zen oxigeno falta eta jatorri ezezaguneko poluzio organikoa zeudela. Emaitza hori izan zen, egoera hidromorfologikoaren asaldurekin batera (erriberako landaretza, ibilgua, ur-emaria eta halakoak), "Egoera Ekologiko Eskasa" kalifikazioaren arrazoia, egoera fisiko-kimikoa ona izan arren.

TOXIKOEN KALTEGARRITASUNAREN NEURKETA

Orain arte esandakoaren arabera, aipaturiko arazoak saihesteko nola neurtu behar dugu toxikoen eragina leku desberdinetan? Europako Kontseiluak, Kooperazio eta Hazkunde Ekonomikorako Erakundeak (OECD) eta antzeko erakunde ofizialek argitaraturiko gidaliburuaren argibideei jarraituz, saiakuntzak egi-

Zarauzko Iñurritza ibaiaren analisisen emaitzak

	Iñurritza-A	MASA
Adierazle biologikoak	Makroorganismoak	Eskasa
	Fitobentoak	Moderatua
	Arrain-fauna	Ona
	Makrofitoak	Moderatua
	EGOERA BIOLOGIKOA	Eskasa
Adierazle fisiko-kimikoak	IFQ-R	Ona
Adierazle hidromorfologikoak	QBR indizea	Eskasa
	Aldaketa hidromorfologikoak	Oso eskasa
	EGOERA EKOLOGIKOA	Eskasa

ITURRIA: URAREN EUSKAL AGENTZIA



ten dira laborategian, hainbat dositan, eta organismo bioadierazleen erantzuna jasotzen da: heriotza-tasa, hazkundera, ugalketa eta biometatzea, besteak beste.

Legez onartutako mugak ezartzeko beharrezkoak diren datuak lortzeaz gainera, substantziak organismoan duen eragina ulertzen laguntzen dute saiakuntza horiek, xurgapen-, banaketa-, metabolismo- eta kanporatze-parametroen bidez, duela hamar markada batzuetatik farmazia-industriaren osagai aktibo berri bat ikertzen dutenean egiten diren azterketa farmakologikoetan egiten den bezala.

Berrazter dezagun egoera: etengabe gehitzen ari den eta erloju kontrako lasterketan neurtu behar diren substantzia kaltegarrien kopuru ikaragarria, adierazle biologikoen zerranda luzea —haietako batzuen fisiologia oraindik ere ez da osorik ulertzen— eta ezin konta ahala agertoki: isurketa puntualak, kronikoak, sinergikoki eragin dezaketen konposatuena nahasketak... Konbinazio horiek guztiak ordena batean aztertzeke, matematikara jo behar dugu.

Azken urteetan izan diren ekarpen onenarikoa hau izan da: eredu matematikoen eta ordenagailu bidezko simulazioaren erabilera,

ekosistemen azterketari aplikatua. Ekotoxikologiako eredu matematikoez ez dituzte behar datu kopuru handiak, landakoak nahiz laborategikoak, toxikoak organismo batean edo gehiagotan duen eragina adierazten duten formula matematikoez aurkitzeko. Produktu zehatz batek ekosistema jakin batean izango dituen efektuak aurretik jakiten laguntzen du horrek, bai eta, zenbait kasutan, erabaki egokiak hartzen ere; eta ez bakarrik legezko mugak ezartzen laguntzen duten erabakiak hartzen. Demagun, adibidez, ibai batean gertatutako isurketaren ondorioz, neutralizazio-produktua edo garbiketarako prozedura aukeratu behar dela. Eredu egokiak aukera guztiak simulatuko lituzke, eta ingurumenean ondorio gutxien dituen prozedura aukeratzeko lagunduko liguke. Simulazioak, era berean, alegiazko egoerak aztertzeke aukera ematen du. Hasieran kontuan hartzen ez ziren ikuspuntu eta planteamendu berriei atea irekitzen dieten ustekabeko emaitzak jasotzen dira behin baino gehiagotan.

EREDUAK ETA SIMULAZIOAK EKOTOXIKOLOGIAN

Ekotoxikologian, estatistika da eredu matematikoez aurkitzeko abiapuntua. Horretarako,

datu esperimentalak hartu behar dira, eredu matematiko hori izango den adierazpen matematikoa sortu, eta datuetara egokitzen diren parametroak bilatu. Adierazpen matematiko hori aurkitzea, hau da, eredu azalduko duen funtzio matematiko egokia aurkitzea da pausorik zailena prozesu honetan. Askotan, banaketa esponentzial arruntarekin hasi, eta eraldatuz joaten da, pixkanaka, datuen doikuntza optimoa lortu arte. Banaketa esponentzial sinplea aldatuz, adibidez, irits gaitezke Weibullen banaketara (berretzailea bera parametro batez berretuz), edo Gonpertzaren banaketara (berretzailean beste esponentzial bat du), besteak beste. Batzuetan, lortutako datuen izaera hain da berezia, non haien banaketa lortzea oso lan zaila izan baitaiteke. Halako kasuetan, lehen aipatutako banaketan edo beste banaketa batzuen konbinazioekin egiten dira probak. Askotan, esponentzialarekin zerikusirik ez duten banaketak ere erabiltzen dituzte. Arazo jakin baterako konbinazio edo funtzio bat proposatzen bada lehen aldiz, emaitza arrakastatsua bada, adierazpenak, azkenean, haren aurkitzailearen izena hartuko du.

Aukeratutako banaketaren doikuntza-parametroak, normalean, aldagai ezagunekin



Txingudiko padurak, balio ekologiko aintzatetsia duen espazio naturala. ARG.: © JOSUNE URIEN.



Zarauzko biotopo babestua. ARG.: © JOSUNE URIEN.

erlazonaturik daude. Esate baterako, EC50, aztergai den efektua populazioaren % 50ean gertatzeko behar den dosia edo kontzentrazioa. Beste batzuetan, zailagoa da ereduaren parametro guztiei zentzu biologikoa ematea.

Halako zailtasunak gainditzeko badago ereduak egiteko beste bide bat, aztertzen diren organismoen fisiologia eta metabolismoa jasotzen dituena. Hori dela eta modelo hauek "Fisiologian oinarritutako eredu toxikokinetiko" izenez ezagutzen dira (PBTk ingelesez: Physiology Based ToxicoKinetic models). Beraz, kasu hauetan aplikatzen den teknika sofistikatuagoa da: izakia konpartimentuetan banatzen da, batzuetan bakarra, bestetan bat baino gehiago, eta zera ikertzen da: toxikoa nola igarotzen den konpartimentu hauetatik, eta beraiekin duen elkarrekintza, lehenago aipaturiko metabolismo, xurgapen, banaketa eta eliminazio tasak lortuz. Ugaztun edo arrainen kasuan fisiologia ezagunagoa da, baina teknika hau benetako erronka bihurtzen da zenbait ornogabeei aplikatzen saiatzen garenean. Paradoxikoa da animalia hauen datu murriztuek eredu beharrezkoa bilakatzeko dutela.

Ereduak planteatzeko beste bide bat hau da: toxikoen egitura molekularra sortzen dituzten efektuekin erlazonatzea, efektu ho-

riek antzeko egitura molekularra duten beste toxikoetara estrapolatu ahal izateko. Egitura horiek "aktibitate-egitura erlazio kuantitativo" ereduak dira (ingelesez, QSAR: Quantitative Structure Activity Relationship). Erlazioa lortzeko, datu-kopuru handiak kudeatu behar dira; hasieran erregresio estatistikoaren bidez egiten zen, eta, gaur egun, konputazioaren laguntzaz, neurona-sare artifizialak erabiliz.

Beraz, datu-kantitate mugatua erabiliz egiten den eredu balioztatzen bada, hau da, beste datu esperimentalak adierazteko edota auresateko balio duela frogatzen bada, simulazioak egitea izango da hurrengo pausoa. Hau da, ereduaren parametro batzuk alda ditzakegu, bariazio horrek beste parametroetan duen eragina ikusteko. Edota parametro guztien eboluzioa aztertu denboran zehar, aukeraturako organismoan toxikoak epe luzera izango duen eragina ulertzeko.

ONDORIOAK

Giza jarduerak askotan ekosistemen degradazioa badakar ere, gaur egun baliabide matematiko eraginkorrak ditugu efektu hori aztertzeko. Ekosistema desberdinetako adierazle biologikoen identifikazioa, bai eta haren deskribapena ere maila funtziona-

lean eta organikoan, ezinbestekoa izan daiteke ingurumenaren narriatzea geldiarazteko. Eredu matematiko zehatzak erabiliz bioadierazleen gaineko efektuak ulertzeko gai bagara, toxikoak saihesteko edo prozesatzeko estrategia egokiak diseinatu ahal izango ditugu, giza jardueraren garapen jasangarriari aukera emateko. ●



SAREAN+

BIBLIOGRAFIA

- DEVILLERS, J.: *Ecotoxicology Modeling*. Springer.
- WALKER, C. H.: *Principles of Ecotoxicology*. Taylor & Francis.
- CARSTEN, P. et al.: "A new risk assessment approach for the prioritization of 500 classical and emerging organic microcontaminants as potential river basin specific pollutants under the European Water Framework Directive" in *Science of the Total Environment*, 409 (2011), 2064–2077.
- Ur Agentzia. Ur egoeren jarraipen sareak. <http://www.uragentzia.euskadi.net>
- DIXON, K. R.: *Modeling and simulation in Ecotoxicology with Applications in Matlab and Simulink*. CRC/Taylor & Francis.