

Zoladura iragazkorak, hirietako drainatze-sarean txertaturiko elementu gisa

(Permeable pavements as integrated elements of urban stormwater network)

Eneko Madrazo Uribeetxebarria^{1}, Maddi Garmendia Antín²,
Maite Meaurio Arrate³*

¹ Ingeniaritza Energetikoa Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, UPV/EHU

² Ingeniaritza Energetikoa Saila, Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, UPV/EHU

³ Prozesu Hidro/Ingurumeneko Ikertaldea (HGI), Kimika Aplikatua Saila,
Kimika Fakultatea, UPV/EHU

LABURPENA: Zoladura iragazkorak hirietako drainatze-sistema jasagarri mota bat dira. Ez dira berriak, baina oso mugatua da hirietako drainatze-sareko elementu integratu moduan duten erabilpena; besteak beste, sistema horien funtzionamenduari konfiantza-ezagatik. Artikulu honen helburua zoladura iragazkorren inguruan dagoen ezagutzaren inguruko ikuspegi eguneratua ematea da, Administrazio eta enpresetako teknikariek inplementazioarako tresna eskuragarri gehiago izan ditzaten. Horrela, zoladura iragazkorren deskribapena emateaz gain, hirietako saneamendu-sarearen kudeaketan dituzten inpaktuak aztertuko dira, baita diseinurako irizpide batzuk eskainiko ere. Guztia ikuspuntu hidrológico-hidrauliko batetik egingo da, azaleko isurketen bolumen- eta emari-murrizketa nabarmenduz, baina uraren kalitatea ere kontuan harturik. Bukarera, zoladura mota hauek ikertzeko eraiki den eremu baten deskribapena ere emango da, haren erabilgarritasuna azpimarratuz.

HITZ GAKOAK: SUDS, zoladura iragazkorra, hiri-hidrologia, uraren kalitatea, euri-uren kudeaketa.

ABSTRACT: *Permeable pavements are one type of sustainable urban drainage system. Although they are not new, their use is very limited as an integrated element of the urban drainage network, and the lack of confidence in their operation may be one of the reasons for that. The aim of this article is to offer an updated vision of the existing knowledge on permeable pavements, so that practitioners have more tools available for their implementation. Thus, not only the description of permeable pavements will be analysed, but also their impacts on the management of the urban stormwater networks, as well as some design criteria. All of this from a hydrological-hydraulic point of view, highlighting the volume and flow reduction for surface discharges, but also taking into account water quality. At the end, a description of an area built to investigate this type of pavement will also be given, highlighting its benefits.*

KEYWORDS: *SUDS, permeable pavement, urban hidrology, water quality, stormwater management.*

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Eneko Madrazo Uribeetxebarria. UPV/EHU, Torres Quevedo Ingeniariaren plaza, 1 (48013 Bilbo, Bizkaia). – eneko.madrazo@ehu.eus – https://orcid.org/0000-0002-5462-0825.

Nola aipatu / How to cite: Madrazo Uribeetxebarria, Eneko; Garmendia Antín, Maddi; Meaurio Arrate, Maite (2022). «Zoladura iragazkorak, hirietako drainatze-sarean txertaturiko elementu gisa»; *Ekaia*, ale berezia 2022, 91-107. (https://doi.org/10.1387/ekaia.23083).

Jasotze-data: 2021eko, irailak 29; Onartze-data: 2022ko urtarrilak 11

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2022 UPV/EHU



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-LanEratorririkGabe 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Azken hamarkadetan nabarmen egin du gora mundu-mailako biztanle kopuruak, eta, horrenbestez, baita planetako azalera urbanizatuak ere. Bide horri jarraituz gero, 2050. urterako, mundu-mailako biztanleen bi heren hiriguneetan biziko direla aurreikusten da [1]. Tradizionalki, urbanizazio-prozesua gauzatzeko, natura- edo nekazaritza-inguruneak eraldatu izan dira, hiri-ingurune berrian lurzoru naturaleko eremuak zein landaretza murriztuz, agerikoa denez.

Hala, urbanizazio-prozesu horrek kalte egiten dio ingurumenari, arrazoi asko direla bide. Besteak beste, giza jarduerak kutsadura-hodeiak sortzen ditu airean, baita kutsadura lausoa ere ibilguetan; aldaketa topografikoek zokoratu egiten dituzte kanal eta hustubide naturalak, eta, ondorioz, hiri-ingurunea are gehiago desnaturalizatu da; lurzoruaren zoladura iragazgaitzak temperaturaren gorakada eragiten du (bero-uharte gisa ezagutzen dena), baita euri-ura iragaztea eragozten ere, azaleko isurketak areagotuz.

Urbanizate- eta iragazgaitze-prozesuek ere sortzen dituzte euri-uren kudeaketan eragina duten fenomenoak: azaleko jariatzea areagotzen dute, kontzentrazio-denbora laburtzen, isurketaren abiadura handitzen, eta uraren kalitatea murrizten. Gainera, are larriagoa da egoera, klima-aldaketak eragindako muturreko egoerak kontuan hartuz gero, prezipitazio bortitzagoak espero baitira.

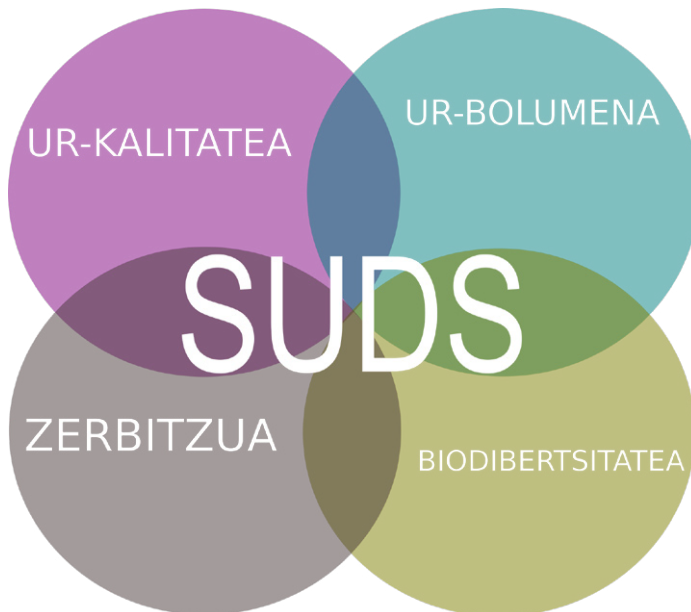
Hori dela eta, uraren hiri-zikloa gero eta urrunago dago uraren ziklo naturaletik, saneamenduari dagokionez bederen. Ziklo naturalean, urak akui-feroak hornitzen ditu; prozesu horretan, gainera, iragazi eta garbitu egiten da, naturalki. Hiriguneetan, aldiz, lurra zigitatua dagoenez, ura kolektoreetan jasotzen da, eta handik araztegiraino eramaten dira hondakinak zein sedimentuak, edo, batzuetan, baita ingurunera zuzenean isurtzen ere. Hau da, ura kontsideratzeko eredia aldatu egin da: hainbat funtzio dituen baliabide baliotsua izatetik, ahalik eta azkarren ebakuatu beharreko arazo izatera igaro da.

Gauzak horrela, hainbat proposamen osagarri sortu dira euri-ura hirien plangintzan eta diseinuan integratzeko, baita klima-aldaketaren aurrean erresilientzia handiagoa eskaintzeko ere, edota hiriei bizigarritasuna, eraginkortasuna eta komunitate-zentzua emateko. Proposamen horiek izen anitz jaso dituzte: *Low Impact Development* Ameriketako Estatu Batuetan, Kanadan eta Zeelanda Berrian, eta *Sustainable Urban Drainage Systems* edo SUDS, jatorriz eskoziarra den baina gaur egun mundu-mailara hedaturiko izena, CIRIA erakundeari esker; gurera ekarrita, *drainatze jasangarriko hiri-sistemak*. Izen horien pean, euri-uren kudeaketa jasangarriari aurre egiteko erabiltzen diren oinarritzko printzipioak eta teknikak jasotzen dira, euri-uren kudeaketan paradigma-aldaketa ekarri dutenak [2].

Zehazki, SUDS sistemak euri-ura kudeatzeko teknikak dira, erreproduzitu eta/edo lehengoratu egin nahi dituztenak hirigintza-garapenaren aurreko prozesu hidrológicoak (isurketa-atzeratzea, iragazketa, biltegitratzea edo ebapotranspirazioa), hiri-paisaian jariatze-uren kontrol-elementuak estrategikoki integratuz [3]. SUDS filosofia funtsezko lau zutabetan oinarritzen da, 1. irudian ikus daitekeen modura [4]: *biodibertsitatea*, sistema naturalak babestuz eta hiri-inguruneetako ur-zikloa hobetuz; *zerbitzua*, paisaia hobetuz, bertan euri-uren tratamendua integratuz ur-eremuak txertatzean, hala herritarrentzako zerbitzua maximizatuz; *uraren kalitatea*, hiriko jariatzeak daraman kutsadura gutxituz, eta *ur kantitatea*, eremu urbanizatuetatik datozen jariatze-bolumenak eta puntako emariak murriztuta atxikitze-prozesuak bultzatuz eta eremu iragazgaitzak minimizatuz.

Oro har, drainatze jasangarriko teknikek lau funtzio bete ditzakete urari dagokionez [5]: infiltratzea, iragaztea edo araztea, atxikitzea eta berrerabiltzea. Zein den indartu nahi dugun funtzioa, teknika bat edo beste erabiltzea komeni da:

- Estalki begetatuak: euri-urak biltzen dituzte, eta horien funtzio nagusia euri-ura iragaztea, atxikitzea eta berrerabiltzea da.
- Etxeko deposituak: estalki edo teilatu bateko euri-ura jasotzen duten depositu txikiak dira. Lurperaturik ere egon daitezke.



1. irudia. Drainatze jasangarriko hiri-sistemen lau ardatz nagusiak.

- Zoladura iragazkorak: euri-uraren infiltratze partziala edo osoa errazteko diseinatu ohi diren zoladurak dira.
- Iragazteko eta atxikitze sistema linealak: luzetarako elementuak dira; drain eta zanga bidez garraiatzen dute euri-ura.
- Iragazte-biltegiak: gelaxka handien edo plastikozko blokeen bidez sorturiko lurpeko deposituak dira, ur-bolumen handia biltzeko eta, ahal denean, iragazteko aukera ematen dutenak.
- Bioerretentzio-guneak: landaretza duten elementuak dira, eskala handiagoko edo txikiagoko elementuen bidez euri-ura arazteko aukera ematen dutenak, hala nola hezeguneak, lorategiak, zangak edo txorkoak.

Artikulu honek, zehazki, teknika horietako batean jarriko du arreta: zoladura iragazkorrean. Artikuluak azaldu nahi du zer diren zoladura iragazkorak, zein diren motarik ohikoena, nolakoak diren horien ezaugarri esanguratsuenak, eta zer-nolako funtzioa duten euri-uren kudeaketa hobetzeko garaietan, betiere ikuspuntu hidrogeliko-hidraulikotik eta ingurumenera isuritako kutsatze-mailaren ikuspegitik.

2. ZOLADURA IRAGAZKORRAK

Oro har, *zoladura* deitu ohi diogu espaloi edo errepide baten gainazalean ikusgai dagoen materialari, hots, zapaldu ohi dugunari, baina baita ere lur naturalaren gainean ipini ohi diren geruza artifizialen multzoari. Aldiz, *zoladura iragazkor* deitzen diegu, zoladura tradizionalak ez bezala, euri-ura jasotzeko eta gordetzeko gai diren horiei.

Horrela, *zoladura iragazkorreko sistema* dei diezaiokegu lur naturalaren gainean dagoen geruza iragazkorren multzoari, geruza horiek elementu bakarra osatuko balute bezala jarduten baitute. Hau da, drainatze jasangarrien filosofiari jarraituz, zoladura iragazkorak jasotako eta gordetako euri-urari aukera ematen dio lur naturalera infiltratzeko edo atmosferara lurruntzeko, eta hori guztia zoladuraren funtzio nagusia behar bezala bermatuz, hau da, trafikoa ahalbidetzea edo oinezkoen joan-etorria erraztea [6].

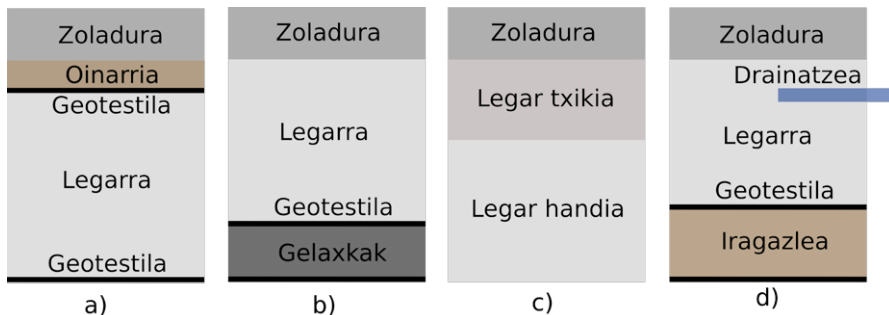
2.1. Materialak

Esan bezala, zoladura iragazkorreko sistemek zoladura edo gainazal iragazkor bat dute goialdean, euri-ura beherantz pasatzen utziko duena eta, aldi berean, beherago dauden geruzak higaduratik babesteko gai dena. Azpian, bestalde, porositate altua duten materialak erabiltzen dira, legar garbiak batez ere, granulometria ezberdinekoak, gai direnak azaleko geruzatik infiltratu den ura jaso eta gordetzeko, eta denbora emanez lurruntzeko edo

lur naturalera infiltratzeko. Horrenbestez, bi eremu bereiz daitezke: zoladura edo gainazala bera, eta gainazal horren egonkortasuna bermatzen duten azpiko geruzak.

Sarri, zoladura iragazkorren sailkapena egitean, gainazaleko geruza erabili ohi da erreferentzia moduan. Hala, zoladura jarraituak edo porotsuak (hormigoia edo asfaltoa, adibidez) eta ez-jarraituak bereiz daitezke (galtzada-harriak edo plastikozko gelaxkak, esaterako, euria elementuen artean utziriko junturetatik iragazten dutenak, hain zuzen ere). Azaleko geruza horren funtzio nagusia urari beheko geruzetara pasatzen uztea litzateke, eta, aldi berean, material kutsakorren lehen iragazle izatea, trafikoaren eta oinezkoen joan-etorriak bermatuz betiere. Egun, hormigoiri iragazkorra, asfalto iragazkorra eta bloke iragazkorrak dira gehien ikertzen diren materialak [7].

Bestalde, azaleko geruza horren azpian, legar garbia da gainontzeko geruzak eratzeko erabiltzen den material nagusia, 2. irudiko sekzioetan ikus daitekeen moduan. Legarrak sekzio osoaren oinarri-funtzioa betetzeko ahalmena du, eta, aldi berean, porositate handia duen materiala da, ezinbestekoa ura biltegitatzeko. Sarri, zoladuraren oinarri gisa oso legar txikia edo harea ere erabiltzen da trantsizio-geruza moduan, batez ere zoladura modularra bada, 2. irudiko a) sekzioak erakusten duen moduan. Kasu horietan, geotestila erabili ohi da materialen nahastea eta galera saihesteko.



2. irudia. Zoladura iragazkorreko sistemetan erabil daitezkeen eredu-sekzioetako batzuk: oinarriarekin (a), plastikozko gelaxkekin (b), neurri anitzeko legarrekin (c) eta material iragazlearekin (d).

Batzuetan, oso porositate handia duten plastikozko gelaxkak ere erabiltzen dira oinarrian, sistemak ura biltegitatzeko duen ahalmena handitzeko, 2. irudiko b) sekzioan ageri den moduan ipinita. Sekzioak tamaina anitzeko legarrak ere izan ditzake, 2. irudiko c) irudian adierazi bezala, zoladuraren azpiko goi-geruzaren uniformetasuna hobetzeko helburuarekin. Gainera, bermatu nahi bada kutsatzailerik ez dela iragaziko lur naturalera, hon-

darrezko geruza bat ipin daiteke, iragazle-funtzioa bete dezan, 2. irudiko d) sekzioak erakusten duen modura.

Bestalde, ohikoa da segurtasunezko drainatze bat ipintzea, azken irudian ageri dena bezalakoa, sistemak gainezka egin ez dezan. Edonola ere, ez dago eredu-sekzio bakar bat, soluzioak anitz baitira. Profesional bakoitzak aplikazioaren egitura-eskakizunetara eta baldintza hidrologikoetara moldatuko diren elementuak aukeratu beharko ditu [8, 9].

2.2. Gainazalaren asetzea

Zoladura iragazkorak ezinbestekoa duen ezaugarrietako bat gainazalaren iragazkortasuna da, bestela urak ezin izango baitu sekzioaren behe-geruzetara igaro. Hiriguneetako espaloi, teilatu eta gainazaletan, lurzorua higaduratik baina batez ere aktibitate antropikotik (trafiko, industria, eta abar) datozen sedimentuak edo hauts-partikulak metatzen dira. Azken horiek kutsatzaileak izan ditzakete, eta isuritako urak, gainazaletik desplazatzean, eraman egiten ditu. Ondorioz, horiek zoladurak atxikitzen dituzten ura iragaztean, zoladuraren poroak ixten joango dira, zahartu ahala. Horrek, noski, infiltratzen den ur-bolumenari eta isurtzen den ur-emariari eragingo die, eta, ezinbestean, baita kutsatzaileen atxikitzeari ere.

Zoladuren eraginkortasun-murrizketa hobetzeko eta, ahal den heinean, poroak eraiki berritan zuten egoerara leheneratzeko, zoladura iragazkorak noizbehinkako tratamendua behar du. Horretarako erabil daitezkeen teknikak asko dira: aspirazio bidezko xurgatzea, presio bidezko garbitzea eta gainazaleko goi-geruza kentzea, esaterako. Edonola ere, teknika batzuk besteak baino eraginkorragoak izango dira, biziberritu nahi den zoladura motaren arabera [10].

3. ZOLADURA IRAGAZKORRAK, SANEAMENDU-SAREKO ELEMENTU GISA

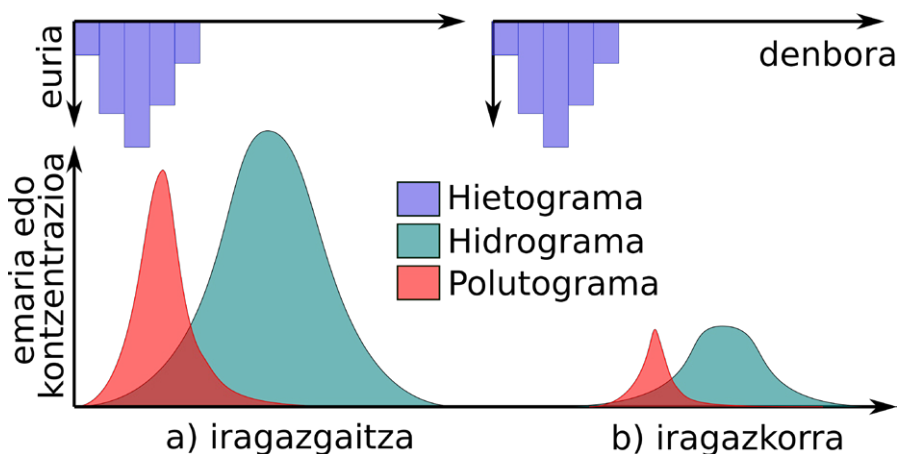
3.1. Ur-bolumen eta emarian eragina

Zoladura iragazkorreko sistemen abantaila nagusienetako bat euri-ura kudeatzeko modua da. Zoladura tradizionalak euri-ura drainatze- edo saneamendu-sarera lehenbailehen bideratzeko diseinatu ohi dira, eta gainazaletik egin ohi dute hori, iragazgaitzak izaki. Zoladura iragazkorak, aldiz, ur hori jatorrian kudeatzeko gai dira, eta, ura jasotzeko eta gordetzeko ahalmen hori dela medio, murriztu egiten dute saneamendu-sarera isurtzen duten puntako emaria eta ur-bolumena. Hori da, hain zuzen ere, saneamendu-sarearen kudeatzaileentzat duten abantaila nagusia; izan ere, nabarmen murriztu dezakete saneamendu-sarera bideratzen den ur-bolumena, saneamendu-sarearen behin-behineko gainezkatze-egoerak urrituz [11].

Zoladura iragazkorrek porositate handiko gainazalak dituzte: % 15-25 bitartekoak, hormigoia edo asfaltoa bezalako material jarraituak badira. Bloke moduko materialak badira, aldiz, askotarikoak izan daitezke balio horiek, utziriko tarteen eta tarte-betegarriaren ezaugarrien arabera. Edonola ere, infiltrazio-ahalmen handiko materialak izaten dira, eraiki berriak direnean milaka mm/h artekoak, eta hori edozein euri-intentsitate baino handiagoa denez, prezipitazioen zati handi bat xurgatzeko gai dira [12].

Ondorioz, euri-ur guztia infiltratzeko eta prezipitazioa bere osotasunean kudeatzeko gai izango dira, urak aukera izango baitu lur naturalera iragazteko edo lurruntzeko hurrengo ekaitza iritsi baino lehen, baldin eta lur naturalaren iragazkortasunak edo lurruntze-baldintzek horretarako aukera ematen badute. Hala, 3. irudiko a) eta b) irudiak alderatuz ikus daitezkeen bezala, zoladura iragazkorrek isuritako azaleko ur-bolumena askoz ere txikiagoa da, isurketarik ez egotea ere ohikoa den arren. Edonola ere, bolumen-murrizketarekin batera, nabarmen txikitu dezake saneamendu-sareak kudeatzen duen puntako emaria, prezipitazioaren zati handi bat infiltratu egiten baita. Ez hori bakarrik; euri-ura gorde egiten denez, ur hori erabiltzeko aukerak handitu egiten dira, lorategiak ureztatzeko edota kaleak garbitzeko, adibidez.

Horrek guztiak saneamendu-sarean izan dezakeen inpaktua bistakoa da. Batetik, sarea unitarioa denean —eta sarri gertatzen da hori—, ur-bolumenaren murrizketak eragina du ura tratatzen den araztegiatan. Bestalde, puntako emariaren gutxitzearekin batera, hodian diseinu-ahalmena murriztu egiten da eta, ondorioz, saneamendu-sarearen dimentsioak edo hodian diametroak ere nabarmen txikitu daitezke. Batak zein besteak kudeaketa-kostuetan dituzten inpaktuak kontuan hartzekoak dira, nola ez.



3. irudia. Zoladura iragazgaitzetan (a) eta iragazkorretan (b) sorturiko hidrogramak (berdez) eta polutogramak (gorriz), prezipitazio-segida berdinen ondoren (urdinez).

3.2. Ur-kalitatean eragina

Ur-bolumenean eta emarian ez ezik, aipaturiko gainazalaren inpermeabilizazioak eragina du uraren abiaduran ere, eta, ondorioz, kutsagaiak garraiatzeko ahalmenak ere gora egiten du. Kutsatzaileen kontzentrazio handiena ekaitzen hasieran gertatu ohi da, orduan hasten baita ura azaleko kutsagaiak garraiatzen. Fenomeno horri *lehen deskarga* deitzen zaio. Zentzu horretan, 3. irudian ikus daiteke SUDS sistemek, isurketa murriztearekin batera, gutxitu egiten dutela kutsatzaileen kontzentrazioa azaleko isurketan.

Ohikoa da euri-uretan besteak beste honako metal astun hauek topatzea [13]: Cu, Hg, Pb eta Zn. Metal horiek *hirietako elementu tipikoak* dira, mundu guztiko lurzoru eta sedimentuetan metatzen direlako [14, 15]. Normalean, metal astunak *traza-elementu* gisa topatzen dira, hau da, lagineko elementuen batez besteko kontzentrazioa txikiagoa da 100 milioiko parte bat baino. Baina osasunerako eta ingurumenerako arriskutsuak diren kontzentrazioetan ere ager daitezke; orduan, *elementu potentzialki toxiko* edo PTE (potential toxic elements) deitzen zaie elementu horiei.

Metalak ez ezik, sedimentuek eta horiek garraiatzen dituzten isurketa-urek hidrokarburoak ere izan ditzakete [16]. Gainera, ongarrien, herbiziden eta pestiziden erabileraren ondorioz, nitrogenoa, fosforoa eta elementu kimiko toxikoak topa daitezke gainazaleko uretan [17]. Ibilgailuen trafikoa ere kutsatzaile ugariaren jatorria da, gurpilen eta freno-pastillen higadurak metalak eta partikula solidoak askatzen baititu [18]. Hori gutxi ez eta gaur egun ere aztertzen dira beste kutsatzaile batzuk, hala nola mikroplastikoak (≤ 5 mm), eragina baitute edateko uran, sedimentuetan eta elikagaietan.

Hala eta guztiz ere, aipaturiko sedimentuen inpaktua hain da handia, ezen gainazaleko ur-masetara isurtzen den hirietako ur kutsatuaren % 46k gainazaleko isurketan duen jatorria [19]. Hala, zoladura iragazkorrek hobetu egin dezakete ibai eta akuiferoetara isurtzen den uraren kalitatea, bi fenomenoren bidez: batetik, azaleko isurketa murriztuz, azaletik ur gutxiago joatean urriagoa baita sedimentuak garbitu eta garraiatzeko aukera (ikus 3. irudia), eta, bestetik, zoladuren iragazte-ahalmena areagotuz, zoladuran zehar infiltratzean kutsatzaileak bertan meta baitaitezke, uraren kalitatea hobetuz. Beraz, zoladura iragazkorrek tresna baliagarriak dira euri-uren isurietan sedimentuetan agertzen diren kutsagaien inpaktua arintzeko [4].

Ikerketa batzuek adierazten dutenez, zoladura iragazkorrek uraren kalitatea hobetu dezakete, batez ere solido esekien, ongarrien (nitrogenoa eta fosforoa) eta metal astun batzuen kontzentrazioa murriztuz [21, 20]. Autore horiek aipatzen duten kalitate-hobetzea iragazketa mekanikoaren ondorio da batik bat [22]. Gainera, zoladura iragazkorrek bioerreaktore-lana ere egin dezakete eta hidrokarburoak degrada ditzakete [23].

Beste ikerketa batzuek nabarmentzen dutenez, bestalde, zoru iragazkorretan erabil daitezkeen geotestilek ere hobe dezakete uraren kalitatea, dela filtrazioa hobetzen dutelako [24], dela bertan gertatzen diren prozesu mikrobiologikoei mesede egiten dietelako [25, 26]. Beste aukera bat zoru iragazkorretan biofilm-egiturak jartzea izan daiteke, geotestilekin konbinatuta. Halakoetan, mikrobio-komunitateek (bakterio, onddo, alga eta lohi aktibatuak) uraren deskontaminazioan parte hartzen dute. Metodo merkea izan arren —eta energia gutxi behar duena, gainera—, eragin handia dute ingurune-baldintzek (pH, tenperatura, kontaktuan dauden denbora, eta abar), eta kutsatzaileek aldatu egin dezakete biofilmaren egitura (besteak beste, mikrobio-komunitateak zein biomasa alda ditzakete, edo aldaketa morfologikoak eragin), haren eraginkortasuna gutxituz [27].

Arestian aipatu bezala, hirietako ur-isuriek kutsagai ugari garraia ditzakete. Hori horrela, kutsatzaileek ingurumenean zein giza osasunean sortzen dituzten arriskuek gero eta kezka handiagoa eragiten dute [28]. Zoladura iragazkorrek tresna eraginkorrak diren arren uraren kalitatea hobetzeko, kutsagai batzuk beste batzuk baino hobeto degradatuko edo atxikiko dituzte, zoladuraren egituraren eta materialen arabera. Oraindik ez dira behar adina ezagutzen zoladura iragazkorrei eta kutsatzaileei eragiten dieten prozesu ugari, hala nola euren arteko interakzioak, prozesu fisiko-kimiko-biologikoak, kutsagai-metatzeak zoladura-degradazioan duen inpaktua edo inguruneke baldintzek kutsagai-metatzean duten eragina.

4. ZOLADURA IRAGAZKORREN DISEINUA

4.1. Diseinu hidrológico-hidraulikorako aldagaiak

Zoladura iragazkorrek diseinatzean kontuan hartu beharreko lehen aldagaia euria da, horrek baldintzatuko baitu zoladurak kudeatu behar duen euri-intentsitateen segida (adibidez, 3. irudiko prezipitazioa), baita bolumen osoa ere. Drainatze-sare tradizionalak itzultze-aldi jakin bat aukeratuz eta horri dagozkion euri-intentsitateak zehaztuz diseinatu ohi dira, sarea gai izan dadin modu horretan sortzen diren puntako emariak garraiatzeko. Aitzitik, SUDS sistemak diseinatzean, ekaitzik handienak albo batera utzi, eta ohikoenak diren ekaitzei dagozkien euri-bolumenen arabera egiten da diseinua. Hala, SUDS sistemek guztiz tratatuko dituzte ohikoenak diren euriak, baina ohi baino euri gehiago egitean gainezka egin eta ura saneamen-du-sarera joango dela onartu beharko dugu.

Horrela, diseinuko bolumena zehaztean, urtean zehar gertatzen diren ekaitzak aztertzen dira. Bada, V_{80} bezala defini dezakegu honako bolumen hau: urte osoko ekaitzen % 80k gainditzen ez duen euri-bolumena. Bolumen hori zoladura iragazkorreko sistemaren ahalmena zehazteko erabil daiteke, kontuan harturik inguruko zein eremuren azalera jasotzen duen;

ez da komeni azalera horrek zoladura iragazkorrari dagokionaren bikoitza gainditzea [4]. Erreferentziazko bolumen hori, V_{80} , zoladuraren bolumen-ahalmena zehazteko eta gainezkatze-sistema definitzeko erabiliko genuke. V_{80} hori zehazteko azterketarik ez dago egina Euskal Herriko plubiometro-datueta oinarriturik, baina Madrilgo Udalaren gidan 15 mm litzateke [29], eta Castelló de la Planako Udalaren gidan 14 mm [30].

Gainontzeko aldagaiak zoladura iragazkorraren ezaugarri fisikoak dira, hala nola sekzioaren eta lur naturalaren infiltratzeko ahalmenak, edota sekzioak ura biltegitratzeko duen ahalmena. Horiek, noski, zoladuraren kokapenak baldintzatuta egongo dira batez ere, eta diseinatzaileak zehaztuko ditu, erabilpen nagusia eta finkaturiko helburuak kontuan harturik.

4.2. Kalitatearen diseinurako aldagaiak

Diseinua kalitatearen eraginkortasunaren ikuspuntutik egiteak zailtasun gehiago ditu ikuspegi hidrológico-hidraulikotik egiteak baino. Hasteko, kutsatzaileen metatze-datuak askoz ere urriagoak dira euriarenak baino, esparru hori oso gutxi ikertu baita. Bestalde, zoladurak kutsatzaileak atxikitze duen ahalmena ere oso ezezaguna da, ikerketa batzuk badauden arren. Edonola ere, prozesu horretan eragina dutenez euri-erregimenak, eremuko kutsadurak eta zoladura-sekzioak, aldakorra da oso. Ohikoa da, horrelakoetan, V_{80} edo V_{90} euri-bolumenerako diseinatuta dagoen zoladuraren kalitate-eraginkortasuna onargarria dela jotzea. Esaterako, Castelló de la Planako Udalaren gidan $V_{90} = 24$ mm erabiltzen da [30].

4.3. Diseinurako eredu matematikoak

Arrunta da saneamendu-sareko elementuen diseinua zehazteko eredu matematikoetan oinarritzea. Eredu matematiko asko dira SUDS mota ezberdinen azterketa egiteko gai, esaterako MOUSE eta HYDRUS, baina SWMM (Storm Water Management Model) da mundu-mailan hedatuena, bai kalkulu hidrológico eta hidraulikoak egiteko metodo-aniztasuna duelako, bai kode irekia duelako [31]. SWMM ereduak, gainera, zoladura iragazkorrez gain, hiri-arroak osotasunean modelizatzeko aukera ere ematen du, baita uraren kalitatea ere; horrez gain, zoladura iragazkorrek bertan duen inpaktua aztertzeo aukera eskaintzen du.

Zoladura iragazkorrei dagokienez, SWMM ereduak material ezberdinetako geruza-eredu bat erabiltzen du. Hauek dira, goitik behera adierazita [32]: gainazala, zoladura, oinarria, biltegia eta drainatzea. Geruzak 2. irudiko d) eredu-sekzioan jasotakoak dira. Uraren azaleko isurketa gainazalaren ezaugarriek baldintzatzen dute (zimurtasunak eta maldak, nagusiki), eta infiltra daitekeen ur-bolumena biltegi ez-linealaren eredu erabiliz zehazten da. Gainera, hautazkoa den oinarri baten gainean, zoladura

jarraituak (asfaltoa edo hormigoia) zein ez-jarraituak (tartea duten galtzadaha-erriak edo soropilak) modeliza daitezke. Azpian biltegia egongo da, porositate handikoa, ura gordeko duena eta hautazko drainatze bat izan dezakeena.

Eredua, normalean, diseinurako zein sarearen funtzionamendua aztertzeko erabili ohi da. Baterako zein besterako, ereduak materialen ezaugarri fisikoak xedatzen ditu (20 dira SWMM ereduak); esaterako, geruzen lodierak, eremuaren malda eta material anitzen porositateak. Sarearen funtzionamendua aztertu nahi denean, gainera, eredu hori kalibratu eta balioztatu egin beharko litzateke erabili aurretik. Parametro fisikoak zehazteak, baina, badiu bere zailtasunak, zaila baita, adibidez, lur naturalaren **infiltrazio-ahalmena** eta, ondorioz, sekzioak izango dituen infiltrazio-galerak zehaztasunez finkatzea, balio hori eremu hurbilean ere oso aldakorra izan baitaiteke.

Edonola ere, zoladura iragazkorren funtzionamendu hidrogikohidraulikoa aztertzean, prezipitazio-agerraldi baten aurrean zoladurak eragingo duen isurtze-murrizpena nolakoa izango den zehaztea izaten da ohikoena. Horrelakoetan, interesgarria da jakitea zoladura iragazkorreko sistemaren parametro fisiko guztien eragina ez dela bera, eta, ondorioz, parametro jakin batzuk direla zoladuraren azaleko isurketa baldintzatuko dutenak [33]. Hori oso lagungarria izango da diseinuan zein funtzionamendua azterketan, murriztu egiten baitu aztertu beharreko parametro kopurua.

Bestalde, zoladura iragazkorren funtzionamendua kalitatearen aldetik aztertu nahi bada, parametro ugari zehaztu beharko dira. Batetik, kutsatzaile bakoitza modu independentean aztertzen da, zoladurak kutsatzaile bakoitzaren aurrean duen eraginkortasuna ezberdina baita. Ondorioz, lehenik kutsatzaile bakoitzaren jatorria edo sorrera ezagutu behar da, hots, jakin behar da zoladuran edo aztertzen ari garen hiri-eremuan nola metatzen den euririk egiten ez duenean. Bestalde, zehaztu behar da euri-garaietan nola garbitzen duen azaleko isurketak kutsatzailea eta nola nahasten den urarekin. Ondorioz, kalitatearen ereduak egin ahal izateko, azterketa-eremuari dagozkion ezaugarriak zehaztu behar dira, eta horrek aurreazterketa ugari eskatzen ditu.

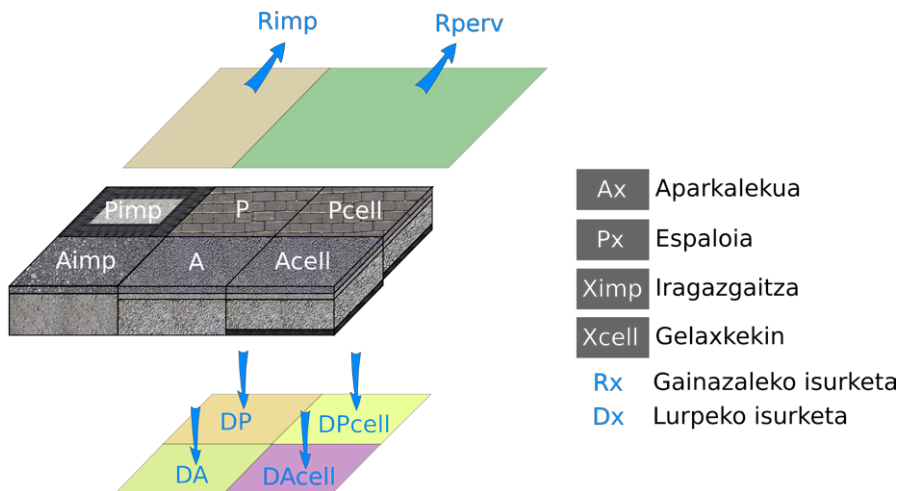
5. TXOMINENEA IKERGUNEA

Oso ohikoak ez diren arren, Euskal Herrian badira zoladura iragazkorreko eremu batzuk jada eraikita [34]. Ikerketa-eremuak, hala ere, ez dira oso ugariak. Horietako bat Donostiako Udalak Martuteneko Txominenea urbanizazioan eraiki zuena da, Euskal Herriko Unibertsitateak kudeatzen duena. Ikerketa-eremua 2019. urtearen bukaeran amaitu zen eraikitzeaz, eta gaur egun datu-bilketa fasearen hasieran dago. Oraingoz, prezipitazioen eta emarien balioak jasotzen dira, baina etorkizunean uraren kalitatea ere aztertuko da.

5.1. Ereduaren deskribapena

Ereduak 180 m² ditu, eta 4. irudian jaso da haren eskema. Gainazalaren erdia espaloia da, baldosaz eta galtzada-harriz eraikia (P deitu zaie azalera horiei), eta beste erdia aparkaleku-eremuaren eraiki da, asfaltoarekin (A deitu zaie azalera horiei).

Eraikuntzan hiru sekzio ezberdin erabili dira. Lehen sekzioa, kontrol-eremu deitua, ohiko materialez eraiki da, eta ezkerreko bi gainazalek osatzen dute. Horietan ohiko asfalta (A_{imp}) eta baldosa iragazgaitzak (P_{imp}) erabili dira. Bigarren sekzioan asfalta (A) eta galtzada-harri iragazkorak (P) erabili dira, zoladura iragazkorretan ohikoak diren legar-geruzen gainean: sekzio horri 2.a irudia dagokio. Azken sekzioa aurrekoaren berdina da ($cell$ azpi-indizea dutenak dira), baina plastikozko gelaxka batzuk ipini dira behealdean, ura biltzeko ahalmena handitzeko eta horrek isurketan izan dezakeen eragina aztertzeko. Sekzio horri dagokion eskema 2.b irudian jasotakoa da.



4. irudia. Zoladura iragazkorreko eremu esperimentalaren eskema, espaloia (P) eta aparkaleku-eremu (A) anitzekin, batetik, eta azaleko (R) zein lurpeko (D) hainbat isurketarekin.

Ereduan kudeaturiko ura horretarako eraiki diren arketa berezi bazu-tzuetara bideratu da. Hala, sei arketa ipini dira: bi azaleko urak jasotzeko dira (R deitu zaie azaleko isurketei), eta lau sekzioan zehar infiltraturiko ura jasotzeko (D deitu zaie horiei). Azaleko ura jasotzeko arketek bereiz jasotzen dute kontrol-eremuko ura (R_{imp}) eta eremu iragazkorreko ura (R_{perv}). Lurpeko ura jasotzeko arketek, aldiz, iragazkorra den eremu bakoitzeko ura jasotzen dute. Berezitasun moduan,

eremu horretako zoladura iragazkorra iragazgaiztu egin da lur naturalarekin duen kontaktu-azaleran, horrela sekzioek kudeaturiko ur-bolumenaren kontrola hobea izango zelakoan.

5.2. Datu-bilketa eta erabilgarritasuna

Eremuaren beste berezitasunetako bat zoladurak kudeatzen duen ur-bolumenaren monitorizazioa da. Helburu horrekin ipini dira 5. irudian ikus daitezkeen presio-sentsoreak, 4. irudian adierazitako isurketak jasotzen dituztenak, aipaturiko sei eremuetako bakoitzak azaletik zein infiltratu ondoren kudeatzen duen ur-bolumena neurtzeko. Eremu bakoitzetik irteten den ura isurgailu batetik pasazten da, eta sentsoreek ur-altuera neurtuaz, datu hori unibertsitateko datu-base batean jasotzen da. Ikertzaileek, horrela, isuritako ur-bolumenaren datua jasotzen dute. Gainera, isurketa-datuak ez ezik, prezipitazioaren datuak ere jasotzen dira, eta datu-base berean gordetzen.



5. irudia. Eremu esperimentaleko ura jasotzen duten hiru ubide: azaleko isurketa jasotzen duena (ezkerrean), asfalto iragazkorrekoa jasotzen duena (erdian) eta galztada-harrien ura jasotzen duena (eskuinean).

Aipaturiko datu guztiak SWMM ereduarekin sorturiko eredu batean txertatzea da helburua, eredu hori datu errealekin kalibratu eta balioztatu ahal izateko. Horrela, eredu hori hiriaren beste edozein eremutan erabiltzeko aukera legoke, zoladura iragazkorak izango lukeen eragina zehazteko, hura eraiki aurretik.

6. ONDORIOAK

Oraindik ere gutxi erabiltzen diren arren, aukera handiak eskaintzen dituzte zoladura iragazkorrek. Zentzu horretan, azterketa gehiago egin behar dira zoladura mota horren inguruan, asko baitago oraindik ikertzeke. Bestalde, ematen diren pausoak, txikiak diren arren, oso lagungarriak izan daitezke zoladura iragazkorak eremu berrietara zabaltzeko. Esaterako, Txominenea bezalako eremuetatik lortutako informazioa sekzio berrien eraginkortasun hidraulikoa aztertzeko erabil daiteke, edota eremu berri bateko euri-erregimenaren diseinua egiteko, betiere horretarako erabil daitezkeen eredu matematikoen laguntza ezinbestekoarekin.

ESKER ONAK

Ikerketa hau Euskal Herriko Unibertsitatearen (UPV/EHU) US19/17 proiektuak finantzatua da. Donostiako Udalaren babesa ere izan du, eta eskerrak eman nahi dizkiogu Udalarari proiektuan zehar eskainitako laguntza paregabeagatik.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. 2019. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York, United Nations.
- [2] GARMENDIA ANTÍN, M., MADRAZO URIBEETXE BARRIA, E. 2020. «Ura eta hirigintza. Paradigma-aldaketaren bidean hiri-uren kudeaketan». *Aldiri. Arkitektura eta abar*, I, 8-11.
- [3] FUNDACIÓN CONAMA. 2018. *Agua y Ciudad Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Grupo de trabajo ST-10, Congreso Nacional del Medio Ambiente 2018, Madrid.
- [4] WOODS BALLARD, B., WILSON, S., UDALE-CLARKE, H., ILLMAN, S., ASHLEY, R., KELLAGHER, R., MARTIN, P., JEFFERIES, C., BRAY, R., SHAFFER, P., WALLINGFORD, H. R. 2015. *The SUDS Manual*. CIRIA, London, UK.
- [5] RODRÍGUEZ-ROJAS, M. I. 2017. *Guía para la integración de los sistemas urbanos de drenaje sostenible en el proyecto urbano*. Universidad de Granada.

- [6] SCHOLZ, M., GRABOWIECKI, P. 2007. «Review of permeable pavement systems». *Building and Environment*, 42, 3830-3836.
- [7] TZIAMPOU, N., COUPE, S. J., SANUDO-FONTANEDA, L. A., NEWMAN, A. P., CASTRO-FRESNO, D. 2020. «Fluid transport within permeable pavement systems: A review of evaporation processes, moisture loss measurement and the current state of knowledge». *Construction and Building Materials*, 243.
- [8] KURUPPU, U., RAHMAN, A., RAHMAN, M. A. 2019. «Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion». *Environmental Earth Sciences*, 78.
- [9] MULLANEY, J., LUCKE, T. 2014. «Practical review of pervious pavement designs». *CLEAN-Soil, Air, Water*, 42, 111-124.
- [10] WINSTON, R. J., AL-RUBAEI, A. M., BLECKEN, G. T., VIKLANDER, M., HUNT, W. F. 2016. «Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate - The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling». *Journal of Environmental Management*, 169, 132-144.
- [11] JOSHI, P., LEITÃO, J. P., MAURER, M., BACH, P. M. 2021. «Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows». *Water Research*, 191, 116780.
- [12] VAILLANCOURT, C., DUCHESNE, S., PELLETIER, G. 2019. «Hydrologic Performance of Permeable Pavement as an Adaptive Measure in Urban Areas: Case Studies near Montreal, Canada». *Journal of Hydrologic Engineering*, 24, 5019020.
- [13] DAVIS, A. P., SHOKOUHIAN, M., NI, S. 2001. «Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources». *Chemosphere*, 44, 997-1009.
- [14] GABERŠEK, M., GOSAR, M. 2018. «Geochemistry of urban soil in the industrial town of Maribor, Slovenia». *Journal of Geochemical Exploration*, 187, 141-154.
- [15] YANG, J.-L., ZHANG, G.-L. 2015. «Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils - A review». *Soil Science and Plant Nutrition*, 61, 30-46.
- [16] HAGER, J., HU, G., HEWAGE, K., SADIQ, R. 2018. «Performance of low-impact development best management practices: a critical review». *Environmental Reviews*, 27, 17-42.
- [17] AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th edn*. American Public Health Association, American Water Works Association, and the Water Environment Federation, Washington, DC.
- [18] ERIKSSON, E., BAUN, A., SCHOLES, L., LEDIN, A., AHLMAN, S., REVITT, M., NOUTSOPOULOS, C., MIKKELSEN, P. S. 2007. «Selected stormwater priority pollutants - a European perspective». *Science of The Total Environment*, 383, 41-51.

- [19] KAMALI, M., DELKASH, M., TAJRISHY, M. 2017. «Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff». *Journal of Environmental Management*, 187, 43-53.
- [20] BRATTEBO, B. O., BOOTH, D. B. 2003. «Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems». *Water Research*, 37, 4369-4376.
- [21] PAGOTTO, C., LEGRET, M., LE CLOIREC, P. 2000. «Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement». *Water Research*, 34, 4446-4454.
- [22] BEECHAM, S., PEZZANITI, D., KANDASAMY, J. 2012. «Stormwater treatment using permeable pavements». *Proceedings of the ICE-Water Management*, 165, 161-170.
- [23] NEWMAN, A.P., PRATT, C.J., COUPE, S.J., CRESSWELL, N. 2002. «Oil bio-degradation in permeable pavements by microbial communities». *Water Sci. Technol.* 45, 51-56.
- [24] NNADI, E. O., COUPE, S. J., SAÑUDO-FONTANEDA, L. A., RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J. 2014. «An evaluation of enhanced geotextile layer in permeable pavement to improve stormwater infiltration and attenuation». *International Journal of Pavement Engineering*, 15, 925-932.
- [25] COUPE, S. J., SMITH, H. G., NEWMAN, A. P., PUEHMEIER, T. 2003. «Biodegradation and microbial diversity within permeable pavements». *Eur. J. Protistol*, 39, 495-498.
- [26] SPICER, G. E., LYNCH, D. E., NEWMAN, A. P., COUPE, S. J. 2006. «The development of geotextiles incorporating slow-release phosphate beads for the maintenance of oil degrading bacteria in permeable pavements». *Water Sci. Technol.*, 54, 273-280.
- [27] FATHOLLAHI, A., COUPE, S. J., EL-SHEIKH, A. H., & SAÑUDO-FONTANEDA, L. A. 2020. «The biosorption of mercury by permeable pavement biofilms in stormwater attenuation». *Science of the Total Environment*, 741, 140411.
- [28] WRIGHT, S. L., GOUIN, T., KOELMANS, A. A., SCHEUERMANN, L. 2021. «Development of screening criteria for microplastic particles in air and atmospheric deposition: critical review and applicability towards assessing human exposure». *Microplastics and Nanoplastics*, 1, 6.
- [29] CHECA VERDES, M. S., DE PAZOS LIAÑO, M. 2018. *Guía básica de diseño de sistemas de gestión sostenible de aguas pluviales en zonas verdes y otros espacios libres*. Ayuntamiento de Madrid.
- [30] PERALES MOMPALER, S., CALCERRADA ROMERO, E., BADENES CATALÁN, C., BELTRÁN PITARCH, I. 2019. *Guía básica de diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible para el término municipal de Castelló de la Plana*. Ayuntamiento de Castelló de la Plana.
- [31] KAYKHOSRAVI, S., KHAN, U. T., JADIDI, A. 2018. «A Comprehensive Review of Low Impact Development Models for Research, Conceptual, Preliminary and Detailed Design Applications». *Water*, 10.

- [32] ROSSMAN, L. A., HUBER, W. C. 2016. *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I Hydrology (Revised)*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, USA.
- [33] MADRAZO-URIBEETXEBARRIA, E., GARMENDIA ANTÍN, M., ALMANDOZ BERRONDO, J., ANDRÉS-DOMÉNECH, I. 2021. «Sensitivity analysis of permeable pavement hydrological modelling in the Storm Water Management Model». *Journal of Hydrology*, 600, 126525.
- [34] ANDRÉS-DOMÉNECH, I., ANTA, J., PERALES-MOMPARLER, S., RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J. 2021. «Sustainable Urban Drainage Systems in Spain: A Diagnosis». *Sustainability*, 13.

