EKAIA (2026), artikulua prentsan/article in press.
https://doi.org/10.1387/ekaia.28814
Behin-behineko bertsioa (euskara-orrazketaren faltan).

ekaia
ZIENTZIA eta TEKNOLOGIA ALDIZKARIA

ISSN: 0214-9001
e-ISSN: 2444-3255
© /EHU Press

Mikroplatikoak Eta Hesteetako Mikrobiota: Disbiosiatik Osasun-Ondorioetara

(*Microplastics and the Gut Microbiota: From Dysbiosis to Health Implications*)

Nora Sota Coronado[1], Garazi Ocerín Amondarain[2], Silvia Íñiguez-Barrio[3], Miquel Saumell-Esnaola[3], Imanol Gonzalez-Burguera[2]

[1]Farmazia Fakultatea, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Vitoria-Gasteiz, Araba

[2] Neurozientzia Saila, Farmazia Fakultatea. UPV/EHU

[3] Farmakologia Saila, Farmazia Fakultatea. UPV/EHU

LABURPENA: Mikroplatikoen presentzia gero eta handiagoa da ingurumenean eta elikadura-katean, eta, ondorioz, gizakien esposizio kronikoa ia saihestezina bihurtu da. Azken urteotan arreta berezia piztu du partikula horiek hesteetako mikrobiotan izan dezaketen eraginak, mikrobiota osasun gastrointestinalaren, metabolismoaren eta immunitate-sistemaren erregulazioan funtsezko zeregina betetzen duen ekosistema baita. Lan honek mikroplastikoen esposizio dietetikoaren eta giza hesteetako mikrobiotaren arteko elkarreraginari buruz gaur egun dagoen ebidentzia zientifikoa aztertzen du, giza laginetan, in vitro ereduetan eta animalia-ereduetan egindako ikerketak kontuan hartuta. Bereziki, mikroplastikoek disbiosia, kate motzeko gantz-azidoen ekoizpenaren murrizketa, heste-hesiaren disfuntzioa, estres oxidatiboa eta hanturazko erantzunaren aktibazioa sustatzeko dituzten mekanismo nagusiak berrikusten dira, bai eta alterazio horiek osasun gastrointestinalean eta sistemikoan izan ditzaketen ondorioak ere. Nahiz eta *in vitro* eta animalia-ereduetan lortutako emaitzek mekanismo fisiopatologiko koherenteak proposatzen dituzten, giza populazioan egindako ikerketak oraindik urriak dira, eta ez dago kausalitatea frogatzeko ebidentzia nahikorik. Horregatik, beharrezkoa da esposizio errealetan oinarritutako ikerketa prospektiboak eta metodologia estandarizatuak garatzea, mikroplastikoen benetako inpaktua hobeto ulertzeko. Ezagutza horrek etorkizunean prebentzio-, nutrizio- eta osasun publikoko estrategiak garatzen lagundu ahal izango du.

GAKO-HITZAK: *MPak, Hesteetako mikrobiota, disbiosia, heste-hesia, inflamazioa*

ABSTRACT: The widespread presence of microplastics in the environment and food chain has made chronic human exposure virtually unavoidable. In recent years, increasing attention has focused on the potential effects of these particles on the gut microbiota, a key regulator of gastrointestinal homeostasis, metabolism, and immune function. This review examines the current scientific evidence on the interactions between dietary microplastic exposure and the human gut microbiota, drawing on studies involving human samples, in vitro models, and experimental animals. It summarizes the main mechanisms by which microplastics may promote gut dysbiosis, reduce short-chain fatty acid production, impair intestinal barrier integrity, and trigger oxidative stress and inflammatory responses, as well as the potential gastrointestinal and systemic health consequences associated with these alterations. Although findings from in vitro and animal studies consistently support biologically plausible

***Harremanetan jartzeko/ Corresponding author**: Imanol Gonzalez, Farmazia Fakultatea EHU (01006 Vitoria-Gasteiz). https://orcid.org/ 0000-0003-2370-9381, imanol.gonzalezb@ehu.eus

Nola aipatu / How to cite: Sota Coronado, Nora; Ocerín Amondarain, Garazi; Iñiguez-Barrio, Silvia; Saumell-Esnaola, Miquel; Gonzalez-Burguera, Imanol.(2026). << Mikroplatikoak Eta Hesteetako Mikrobiota: Disbiosiatik Osasun-Ondorioetara>>, Ekaia, 50, xx-xx. (https://doi.org/10.1387/ekaia.28814)

Jasoa: uztailak 24, 2026; Onartua: azaroak 5, 2026

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

Obra *Creative Commons Atribución 4.0 Internacional*-en lizentziapean dago

pathophysiological mechanisms, evidence from human studies remains scarce, preventing the establishment of a direct causal relationship between microplastic exposure and disease. Furthermore, methodological heterogeneity in exposure assessment and microplastic detection limits the comparability of available studies. Future research should prioritize standardized analytical methods together with large-scale prospective human studies to clarify the biological and clinical relevance of chronic microplastic exposure. A better understanding of these interactions will be essential for developing evidence-based nutritional, preventive, and public health strategies aimed at minimizing the potential health risks associated with microplastic exposure.

KEYWORDS: *Microplastics, Gut microbiota, Dysbiosis, Intestinal barrier, Inflammation*

.

1. 1 SARRERA

Azken hamarkadetan plastikoaren ekoizpena eta kontsumoa etengabe handitu dira, eta, ondorioz, plastiko-hondakinen metaketa ingurumeneko arazo global bihurtu da [1-7]. Material horien degradazio biologikoa oso motela denez, plastikoek hamarkadetan edo mendeetan iraun dezakete ingurumenean. Eguzki-erradiazioaren, tenperaturaren, higadura mekanikoaren eta bestelako prozesu fisiko, kimiko zein biologikoen eraginez, plastikoak tamaina txikiagoko partikuletan zatitzen dira, Mikroplastikoak (MP; <5 mm) eta nanoplastikoak eratuz [6]. Tamaina txikiari, iraunkortasunari eta sakabanatzeko gaitasun handiari esker, partikula horiek atmosfera, lurzorua eta ur-ekosistemetan zehar hedatzen dira, kate trofikoan sartuz eta organismo bizidunetan metatzeko gaitasuna erakutsiz [6-7].

Hedapen global horren ondorioz, gizakien MPekiko esposizioa ia saihestezina bihurtu da. Gaur egun identifikatutako esposizio-bideen artean inhalazioa, dermis bidezko kontaktua eta ingestio dietetikoa daude; hala ere, azken hori esposizio-iturri nagusietako bat dela iradokitzen dute egungo ikerketek [1, 8, 9]. MPak ur edangarrian, itsasoko produktuetan, gatzean eta landare zein animalia-jatorriko hainbat elikagaitan detektatu dira, eta elikagaien prozesamenduak nahiz ontziratze-materialek ere kutsadura gehigarria eragin dezakete [8, 9]. Horrez gain, dieta-ereduek ere esposizio-mailan eragina izan dezakete; izan ere, itsas produktuen eta elikagai prozesatuen kontsumo handiagoa MPen ingestio handiagoarekin lotu izan da [8]. Dena den, oraindik ez dago adostasunik gizakiak benetan irensten duen MP kopuruari buruz, detekzio-metodoen, laginketa-protokoloen eta analisi-tekniken arteko heterogeneotasun handia dela eta [10-12]. Horrek zaildu egiten du esposizioaren benetako dimentsioa eta osasunerako duen arriskua zehaztasunez ebaluatzea.

Ingestioaren ondoren, traktu gastrointestinala da MPen lehen kontaktu biologikoa. Bertan, partikulek heste-epitelioarekin eta hesteetako mikrobiotarekin elkarreraginean jarduten dute [13]. Hesteetako mikrobiota funtsezko osagaia da metabolismoaren erregulazioan, mantenugaien aprobetxamenduan, immunitate-sistemaren garapenean eta heste-hesiaren osotasunaren mantentzean; horregatik, haren orekaren alterazioek ondorio garrantzitsuak izan ditzakete bai heste-mailan bai maila sistemikoan [14-16]. Azken urteotan argitaratutako ikerketek iradoki dute MPek mikrobiotaren osaera eta jarduera metabolikoa alda ditzaketela, disbiosia, estres oxidatiboa, hantura eta heste-hesiaren disfuntzioa sustatuz. Mekanismo horiek,

elkarri lotuta, hainbat alterazio gastrointestinal eta metabolikoren abiapuntu izan daitezkeela proposatu da. Hala ere, gaur egun eskuragarri dagoen ebidentzia nagusiki *in vitro* eta animalia-ereduetatik dator, eta gizakietan egindako ikerketak oraindik urriak dira; horrenbestez, kausalitatea ez dago behar bezala ezarrita eta emaitzen interpretazioan zuhurtzia beharrezkoa da [16].

Testuinguru horretan, MPen eta hesteetako mikrobiotaren arteko erlazioa ikerketa-eremu estrategiko bihurtu da azken urteotan. MPen esposizio kronikoa gaur egungo gizartean ia saihestezina denez, ezinbestekoa da partikula horiek hesteetako homeostasian eta osasun gastrointestinalean izan ditzaketen ondorioak ulertzea, bai eta etorkizunean osasun publikoaren ikuspegitik izan ditzaketen inplikazioak ere. Horregatik, lan honen helburua MPen esposizio dietetikoak hesteetako mikrobiotan eta heste-osasunean izan ditzakeen ondorioei buruzko ebidentzia zientifikoa modu kritikoan berrikustea da. Horretarako, MPen esposizioaren iturri nagusiak, hesteetako mikrobiotan eragin ditzaketen alterazio-mekanismoak eta osasun gastrointestinal zein sistemikoan izan ditzaketen ondorio potentzialak aztertzen dira, egungo ebidentziaren muga metodologiko nagusiak eta etorkizuneko ikerketa-ildoak ere eztabaidatuz.

2. GARAPENA

2.1. Mikroplastikoen esposizio dietetikoa eta portaera gastrointestinala

MPak 5 mm baino diametro txikiagoa duten partikula plastiko sintetikoak dira, gehienbat polietilenoz, polipropilenoz, poliestirenoz eta antzeko polimeroz osatuak [1]. Ingurunean degradazio biologikoarekiko erresistentzia handia dutenez, kutsatzaile iraunkortzat hartzen dira, eta denboran zehar metatzeko gaitasuna dute [16]. Jatorriaren arabera, bi taldetan sailkatzen dira: MP primarioak, zuzenean tamaina mikrometrikoan fabrikatutakoak, eta MP sekundarioak, tamaina handiagoko plastikoen degradazio fisiko, kimiko eta biologikoaren ondorioz sortutakoak [1, 17]. Gainera, partikula horiek ez dira polimero hutsez soilik osatzen; plastikoaren fabrikazioan erabilitako gehigarriak eta ingurunean xurgatutako kutsatzaile kimikoak ere garraia ditzakete, haien toxikotasun potentziala handituz [18].

MPen beste ezaugarri garrantzitsu bat mikroorganismoek haien gainazala kolonizatzeko duten gaitasuna da. Kolonizazio horren ondorioz, biofilmak eratzen dira, eta bertan garatzen diren komunitate mikrobianoen multzoari plastisfera deritzo. Plastisferaren osaera MPen polimero motaren, gainazalaren ezaugarrien eta ingurumen-baldintzen arabera alda daiteke. Komunitate

horietan bakterioak, onddoak eta bestelako mikroorganismoak aurki daitezke, eta zenbait ikerketak mikroorganismo patogeno potentzialen eta antibiotikoekiko erresistentzia-geneen presentzia ere deskribatu dute [60].

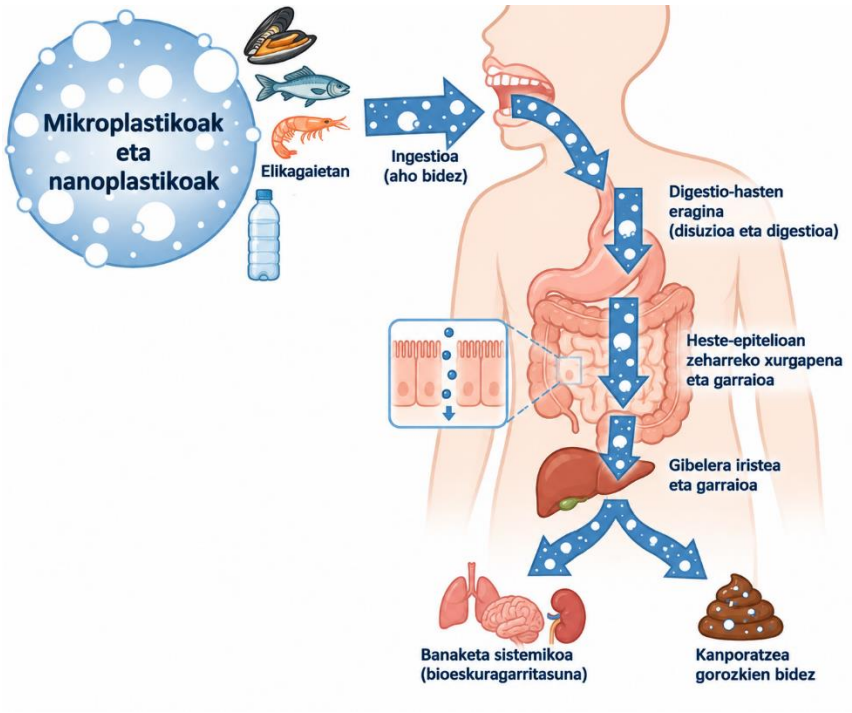
Plastisferak garrantzi berezia izan dezake MPen eta hesteetako mikrobiotaren arteko elkarreraginean. Izan ere, MPek beren gainazalean atxikitako mikroorganismoak digestio-aparatura garraiatzeko aukera dute, eta horrek hesteetako komunitate mikrobianoekin elkarreragin berriak sortu ditzake. Cheng et al.-ek (2023) anfioxoetan egindako ikerketa batean, MPen gainazalean garatutako plastisferaren eta ostalariaren hesteetako mikrobiotaren arteko elkarreraginak aztertu zituzten [61]. Hala ere, oraindik ez dago ebidentzia nahikorik mekanismo horrek giza hesteetako mikrobiotan duen benetako eragina zehazteko.

MPen ingurumen-banaketak giza esposizio kronikoa ia saihestezina bihurtu du. Atmosferan, lurzoruan eta uretako ekosistemetan duten presentziak elikadura-katean sartzea ahalbidetzen du, eta, ondorioz, hainbat elikagai eta edaritan detektatu dira, bereziki itsasoko produktuetan, ur edangarrian eta ontziratuan, gatzean nahiz elikagai prozesatuetan [19-22]. Elikagaien prozesamenduak eta ontziratze-materialek ere esposizio gehigarria eragin dezakete. Hala ere, elikagai bakoitzaren ekarpen erlatiboa zehaztea zaila da oraindik, laginketa-protokoloen, analisi-metodoen eta MPen detekziorako erabilitako tekniken artean dagoen estandarizazio faltagatik [10-12, 26, 27].

Egungo estimazioen arabera, gizaki batek urtean 39.000 eta 52.000 MP-partikula artean irents ditzake dieta bidez [10], eta beste kalkulu batzuek astean 0,1-5 g arteko ingestioa proposatzen dute, askotan "kreditu-txartel" baten pisuarekin alderatua [18]. Nahiz eta estimazio horiek ziurgabetasun handia izan, gizakien gorozkietan MPak detektatu izanak baieztatzen du ingestio dietetikoa benetakoa eta jarraitua dela [11, 28].

Ingestioaren ondoren, MPek traktu gastrointestinalean zehar bidaiatzen dute, eta hestea da haien jarduera biologikoaren gune nagusia. Digestio-fluidoek ez dituzte plastikoak degradatzen; ondorioz, partikulek beren ezaugarri fisikokimikoak mantentzen dituzte hesteetara iritsi arte [24, 27]. Partikula gehienak (>150 μm) muki-geruzan harrapatuta geratzen dira eta gorozkien bidez kanporatzen dira, nahiz eta prozesu horretan heste-epitelioarekin eta bertako mikrobiotarekin kontaktuan egon [28]. Aitzitik, tamaina txikiagoko MPek eta, bereziki, nanoplastikoek (<1 μm) heste-hesia zeharkatzeko gaitasun handiagoa dute, endozitosiaren,

garraio parazelularraren edo Peyerren plaketako M zelulen bidez [24, 28, 29]. Horri esker, sistema linfatiko edo odol-zirkulaziora irits daitezke eta gibel, giltzurrun edo bare bezalako organoetan metatu daitezkeela frogatu da animalia-ereduetan [15, 23, 30] (Ikusi 1. Irudia).



1. irudia. MPen eta nanoplastikoen ingestioa, digestio-aparatuko ibilbidea eta organismoan izan ditzaketen helmugak. Paul et al. [13] lanetik moldatua.

Bestalde, MPen toxikotasuna ez dago soilik haien presentzia fisikoari lotuta. Ebidentziak erakusten du estres oxidatiboa, erantzun inflamatorioa eta immunitate-sistemaren aktibazioa sustatzeko gai direla, eta, gainera, ingurunean xurgatutako konposatu toxikoak garraia ditzaketela, "Trojan Horse" efektua deritzon mekanismoaren bidez [18, 23]. Hori dela eta, Europako Elikagaien Segurtasunerako Agentziak (EFSA) adierazi zuen elikagaien bidezko MPen arriskua ebaluatzeko oraindik ez dagoela ebidentzia nahikorik, batez ere giza toxikozinetikari eta esposizio errealari buruzko datu sendoen gabeziagatik [17]. Azken urteotan argitaratutako ikerketek ezagutza hori zabaldu duten arren, eskuragarri dagoen informazio gehiena oraindik *in vitro* eta animalia-ereduetatik dator; beraz, giza osasunerako benetako arriskuaren ebaluazioak ziurgabetasun handia izaten jarraitzen du.

2.2. Heste-mikrobiota

Hesteetako mikrobiota giza traktu gastrointestinalean bizi diren mikroorganismoen ekosistema konplexua da, eta funtsezko eginkizuna betetzen du ostalariaren homeostasian. Bakterioek osatzen dute gehienbat, nahiz eta onddoak, birusak eta beste mikroorganismo batzuk ere bertan egon. Mikrobiotaren osaera pertsona bakoitzaren ezaugarri genetikoen, adinaren, dietaren, bizimoduaren eta ingurumen-faktoreen arabera aldatzen bada ere, oreka mikrobiano egokia ezinbestekoa da hesteetako zein organismo osoaren osasuna mantentzeko [16, 31, 32].

Mikrobiota osasuntsua batez ere *Firmicutes* eta *Bacteroidetes* filoek osatzen dute, eta neurri txikiagoan *Actinobacteria* eta *Proteobacteria* taldeek. Horien artean, *Lactobacillus* eta *Bifidobacterium* generoek zeregin garrantzitsua dute hesteetako homeostasia mantentzen, mantenugaien metabolismoan parte hartuz, patogenoen aurkako babesa eskainiz eta immunitate-sistemaren garapena zein erregulazioa sustatuz [32, 35, 36].

Funtzio metaboliko nagusien artean, mikrobiotak irentsitako mantenugaien hartziduran parte hartzen du, eta kate motzeko gantz-azidoak (SCFA, Short Chain Fatty Acids) ekoizten ditu, bereziki azetatoa, propionatoa eta butiratoa [16, 33]. Metabolito horiek energia-iturri garrantzitsuak dira kolonozitoentzat, heste-hesiaren osotasuna indartzen dute eta erantzun immunearen nahiz hantura-prozesuen erregulazioan parte hartzen dute. Horrenbestez, SCFAen ekoizpena hesteetako homeostasiaren adierazle nagusietako bat da.

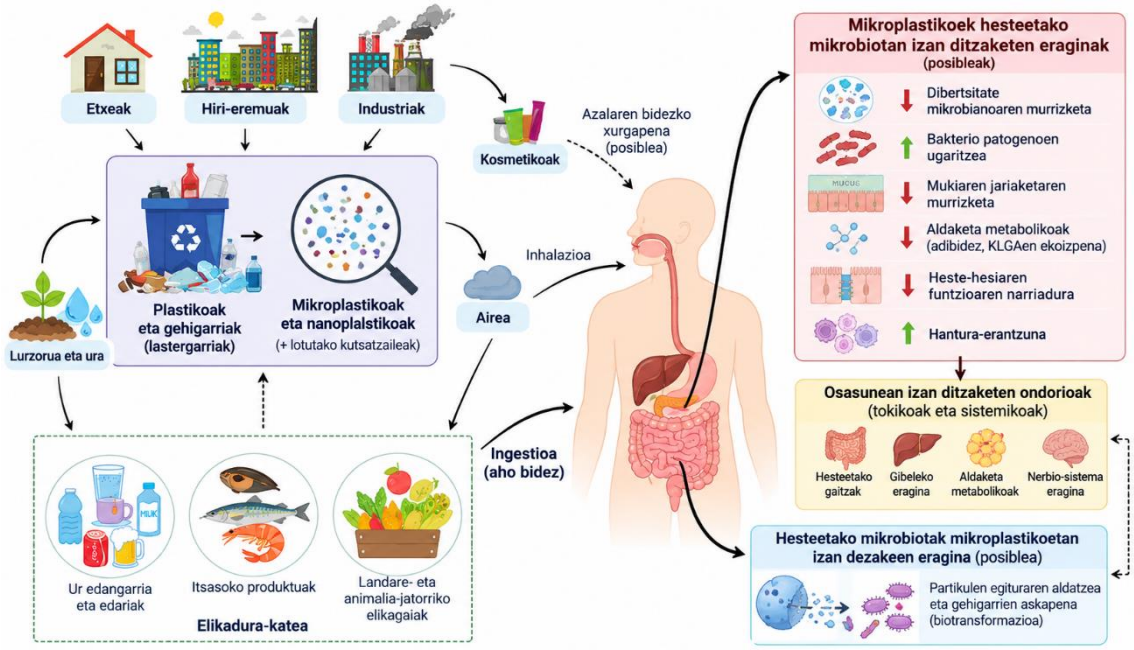
Hala ere, hesteetako mikrobiota sistema dinamikoa da, eta haren osaera nahiz jarduera etengabe aldatzen dira dieta, farmakoak, adina edo ingurumeneko kutsatzaileak bezalako faktoreen eraginez [34]. Oreka horren hausturari disbiosia deritzo, eta bakterio onuragarrien murrizketa nahiz mikroorganismo oportunisten ugaritzea ditu ezaugarri nagusi. Egoera horrek mantenugaien metabolismoa, heste-hesiaren funtzioa eta immunitate-erantzuna asalda ditzake, hainbat gaixotasun gastrointestinal eta sistemikoren garapenean lagunduz [16, 18, 35].

Azken urteotan, ingurumen-kutsatzaile emergenteek, bereziki MPek, arreta handia piztu dute disbiosiaren eragile posible gisa. Gero eta ebidentzia gehiagok iradokitzen du partikula horiek mikrobiotaren osaera eta jarduera metabolikoa alda ditzaketela, eta, ondorioz, hesteetako homeostasia arriskuan jar dezaketela. Hori dela eta, MPen eta heste-mikrobiotaren arteko elkarreragina gaur egungo ikerketa-arlo garrantzitsuenetako bat bihurtuz.

2.3. Mikroplastikoen eta heste-mikrobiotaren arteko elkarreragina

2.3.1. Egungo ebidentzia zientifikoa

Azken urteotan nabarmen handitu da MPek hesteetako mikrobiotan izan ditzaketen ondorioei buruzko ikerketa kopurua. Gaur egun eskuragarri dagoen ebidentzia zientifikoa, ordea, batez ere *in vitro* ereduetan, animalia-ereduetan eta neurri txikiagoan giza lagin biologikoetan oinarritzen da. Metodologia esperimentaletan, erabilitako polimero motetan, partikulen tamainan, esposizio-denboran eta dosietan desberdintasun handiak dauden arren, azterlan gehienek norabide bereko emaitzak erakusten dituzte: MPek hesteetako mikrobiotaren osaera eta jarduera metabolikoa alda ditzakete, heste-homeostasia arriskuan jarriz [14-16, 18, 24, 28, 37-45]. MPen eta nanoplastikoen esposizio-bide nagusiak, hesteetako mikrobiotan izan ditzaketen ondorioak eta mikrobiotaren eta partikula horien arteko elkarreraginak 2. irudian laburbiltzen dira.



2. irudia. MPen eta nanoplastikoen esposizio-bide nagusiak eta hesteetako mikrobiotarekin dituzten elkarreraginak. Partikula horiek mikrobiotaren dibertsitatean, bakterio patogenoen ugaritasunean, mukiaren jariaketan, metabolismoan, heste-hesiaren osotasunean eta hantura-prozesuetan izan ditzaketen ondorioak erakusten dira. Jiménez-Arroyo et al. [37] lanetik moldatua.

Interpretazio hori bereziki esanguratsua da, izan ere, ikerketa independente askok metodologia desberdinak erabili arren, antzeko alterazio biologikoak deskribatu dituzte. Horien artean nabarmentzen dira mikrobiotaren dibertsitatearen murrizketa, bakterio-komunitatearen osaeraren aldaketa, SCFA ekoizpenaren gutxitzea, heste-hesiaren disfuntzioa eta hantura-

erantzunaren aktibazioa [15, 16, 18, 28, 37, 41-50]. Ondorioz, gaur egun ez da hainbeste eztabaidatzen MPek alterazio biologikoak eragin ditzaketen ala ez, baizik eta alterazio horien benetako garrantzia, intentsitatea eta giza osasunean duten eragina.

Ebidentziaren zati handiena giza hestea simulatzen duten *in vitro* ereduetatik dator. Hartzidura fekaleko sistemek, digestio gastrointestinal simulatuko plataformek eta Caco-2 edo HT-29 bezalako zelula-ereduek aukera eman dute MPek heste-ingurunean dituzten lehenengo efektuak aztertzeko [18, 24, 28, 37, 41, 42]. Eredu horietan, modu koherentean deskribatu dira alfa-dibertsitatearen murrizketa, bakterio onuragarrien beherakada eta genero oportunisten ugaritzea, bereziki *Proteobacteria* filoko mikroorganismoena [16, 37, 43]. Aldi berean, estres oxidatiboaren areagotzea, hanturaren aldeko metabolitoen ekoizpena eta heste-epitelioaren osotasunaren narriadura ere behatu dira [28, 37, 42, 44]. Hala ere, emaitza horien interpretazioan kontuan hartu behar da azterketa gehienek poliestirenozko MPak erabili dituztela eta esposizioak iraupen laburrekoak izan direla; beraz, oraindik ez dago argi efektu horiek epe luzeko giza esposizio kronikoa zenbateraino islatzen duten [16, 18, 43, 45].

Animalia-ereduek aurreko behaketak indartu dituzte eta MPen ondorio fisiologikoen ikuspegi integratuagoa eskaini dute. Karraskarietan eta zebra-arrainaren (Danio rerio) ereduan egindako ikerketek erakutsi dute MPen ingestio kronikoak mikrobiotaren osaera aldatzeaz gain, heste-hesiaren narriadura, estres oxidatiboa, hantura eta metabolismo lipidikoaren alterazioak ere eragin ditzakeela [14-16, 18, 28, 30, 37, 49, 40]. Gainera, zenbait lanek MPen tamainaren, polimero motaren eta administratutako dosiaren mendeko erantzunak deskribatu dituzte, eta horrek iradokitzen du efektu biologikoak ez direla uniformeak baldintza esperimental guztietan. Hala ere, animalia-ereduen muga nagusietako bat erabilitako dosietan datza; kasu askotan, gizakiek eguneroko bizitzan jasaten duten esposizio estimatua baino askoz handiagoak dira, eta horrek emaitzen estrapolazioa mugatzen du.

Gizakietan eskuragarri dagoen ebidentzia oraindik urria da. Azterketa gehienek gorozkietan, odolean edo bestelako lagin biologikoetan MPen presentzia baieztatu dute, eta horrek erakusten du dietaren bidezko esposizioa benetakoa eta jarraitua dela [11, 28, 38-39]. Hala ere, gaur egun ez dago MPen esposizioa eta hesteetako mikrobiotaren alterazioak zuzenean lotzen dituen azterketa kliniko sendo nahikorik. Ondorioz, giza osasunean izan dezaketen eraginari buruzko hipotesi fisiopatologiko gehienak oraindik ere *in vitro* eta animalia-ereduetan lortutako

emaitzen interpretazioan oinarritzen dira. Horrek ez du esan nahi ebidentzia ahula denik; aitzitik, ereduen arteko koherentziak hipotesi biologiko sendoa babesten du. Hala ere, beharrezkoa da etorkizunean esposizio errealetan oinarritutako kohorte-azterketak eta ikerketa kliniko prospektiboak garatzea, MPek hesteetako mikrobiotan eta giza osasunean duten benetako eragina zehaztasunez ebaluatu ahal izateko.

Azken batean, gaur egun eskuragarri dagoen ebidentziak joera bateratua erakusten du: MPek hesteetako mikrobiotaren oreka aldatzeko gaitasuna dute eta, ondorioz, heste-homeostasia mantentzen duten prozesu fisiologikoetan eragin dezakete. Hala ere, alterazio horiek azaltzen dituzten mekanismo biologikoak konplexuak dira eta elkarrekin estuki lotuta daude; horregatik, beharrezkoa da MPek disbiosia, metabolismo mikrobianoa, heste-hesiaren osotasuna eta hantura nola koordinatuki aldatzen dituzten ulertzea.

Mikroplastikoek hesteetako mikrobiotan eta heste-homeostasian dituzten ondorioak aztertu dituzten ikerketa nagusien ezaugarriak eta emaitzak 1. taulan laburbiltzen dira, erabilitako ikerketa-ereduen eta mikroplastiko moten arabera.

1.Taula. Mikroplastikoek hesteetako mikrobiotan eta heste-homeostasian dituzten ondorioei buruzko ikerketa nagusien laburpena

Ikerketa	Ikerketa-eredua	Mikroplastiko mota	Emaitza nagusiak
Tamargo et al. (2022) [41]	*In vitro*: giza digestio gastrointestinalaren simulazioa	PET	Koloneko mikrobiotaren osaeraren aldaketak eta PET partikulen egitura-aldaketak; biodegradazio posiblearen zantzuak.
Nissen et al. (2024) [43]	*In vitro:* giza koloneko mikrobiotaren eredua	PE eta PS	Bakterio oportunisten ugaritzea, bakterio onuragarrien murrizketa eta jarduera metabolikoaren alterazioak esposizio bakarraren ondoren.
Fournier et al. (2023) [46]	*In vitro:* M-ARCOL kolon-eredua eta heste-epitelioaren zelula-kokultiboa	PE	Mikrobiotaren eta heste-hesiaren erantzunak aztertu ziren; ondorioak emailearen araberakoak izan ziren.
Zhang et al. (2023) [14]	*In vivo:* sagu helduak	PS, mikroplastikoak eta nanoplastikoak	Mikrobiotaren osaeraren eta SCFAen alterazioak, heste-hesiaren kaltea, hantura eta immunitate-erantzunaren disfuntzioa.
Lu et al. (2018) [15]	*In vivo:* saguak	PS	Hesteetako mikrobiotaren disbiosia eta gibeleko lipido-metabolismoaren alterazioak.
Su et al. (2024) [48]	*In vivo:* saguak	PS	Heste-egituraren aldaketak, lotura estuko geneen adierazpenaren murrizketa eta

			mikrobiotaren osaeraren alterazioak.
Jia et al. (2023) [49]	*In vivo:* saguak	PP	Koloneko apoptosiaren areagotzea, heste-hesiaren kaltea, estres oxidatiboa eta TLR4/NF-κB bidearen aktibazioa.
Yan et al. (2022) [54]	Gizakiak: gorozki-laginen behaketa-azterketa	Hainbat polimero; batez ere PET eta PA	Hesteetako hanturazko gaixotasuna zuten pazienteetan MP kontzentrazio handiagoa; gaixotasunaren larritasunarekin asoziazioa.

Laburdurak: PET, polietileno tereftalatoa; PE, polietilenoa; PS, poliestirenoa; PP, polipropilenoa; PA, poliamida; SCFA, kate motzeko gantz-azidoak; MP, mikroplastikoak. *In vitro* eta animalia-ereduetako emaitzak ezin dira zuzenean gizakietara estrapolatu. Yan et al.-en behaketa-azterketak asoziazioa erakusten du, baina ez kausalitatea.

2.3.2. Mikroplastikoek eragindako alterazio-mekanismoak

Egungo ebidentziak adierazten du MPek hesteetako homeostasia ez dutela mekanismo bakar baten bidez asaldatzen. Aitzitik, elkarren artean estuki lotuta dauden hainbat prozesu biologiko aktibatzen dituzte, eta horiek elkar indartu eta mantentzen dira denboran zehar. Horren ondorioz, mikrobiotaren osaeran gertatzen diren lehenengo aldaketek alterazio metabolikoak eragiten dituzte; horiek, era berean, heste-hesiaren osotasuna ahultzen dute eta hanturazko zein oxidazio-estresaren erantzunak sustatzen dituzte. Beraz, gaur egungo ereduek iradokitzen dute MPen ondorio fisiopatologikoak ezin direla mekanismo isolatuen batura gisa ulertu, baizik eta heste-homeostasiaren galera progresibo baten adierazpen gisa [14-18, 28, 41].

2.3.2.1. Disbiosia: alterazio fisiopatologikoaren abiapuntua

Mikrobiotaren osaeraren aldaketa da MPen esposizioaren ondorio goiztiarrenetako eta koherenteenetako bat. Eredu esperimental gehienetan alfa-dibertsitatearen murrizketa deskribatu da, bakterio onuragarrien ugaritasuna gutxitzearekin eta mikroorganismo oportunisten hazkundearekin batera [16, 37, 41, 43]. Bereziki, *Firmicutes* eta *Bacteroidetes* filoen orekaren galera eta *Proteobacteria* taldearen ugaritzea behatu dira, disbiosiaren adierazle klasikotzat jotzen diren aldaketak [15, 16, 40, 41].

Aldaketa horiek ez dute soilik bakterio-populazioen osaera aldatzen. Mikrobiotaren dibertsitatea murrizteak haren gaitasun metabolikoa eta babes-funtzioa ere ahultzen ditu, eta, ondorioz, heste-ingurunea egoera proinflamatorioago baterantz eboluzionatzen du. Horregatik, gaur egun disbiosia ez da MPen esposizioaren ondorio hutsa bezala interpretatzen; aitzitik, ondorengo alterazio fisiopatologiko gehienen abiapuntu gisa hartzen da.

2.3.2.2. Mikrobio-metabolismoaren alterazioa eta SCFA ekoizpenaren murrizketa

Disbiosiak zuzenean eragiten dio mikrobiotaren jarduera metabolikoari. Bereziki, SCFA ekoizpena murrizten dela erakutsi dute hainbat ikerketek, batez ere butiratoarena, baina baita azetatoarena eta propionatoarena ere [15, 16, 33, 41, 46]. Metabolito horiek kolonozitoen energia-iturri nagusiak dira eta funtsezko eginkizuna dute heste-hesiaren egonkortasunean, immunitatearen modulazioan eta hanturaren kontrol fisiologikoan.

SCFAen murrizketa, neurri handi batean, metabolito horiek ekoizten dituzten bakterioen beherakadarekin lotzen da. Horren ondorioz, hesteak babes metabolikoaren zati bat galtzen du, eta epitelioaren mantentzea zein immunitate-erantzunaren erregulazioa ahuldu egiten dira. Aldi berean, zenbait ikerketak adierazi dute MPen esposizioak beste metabolito proinflamatorio batzuen ekoizpena ere susta dezakeela, eta horrek mikroingurune intestinalaren oreka are gehiago hausten du [37, 44, 47].

2.3.2.3. Heste-hesiaren disfuntzioa

Mikrobiotaren eta haren metabolismoaren alterazioek heste-hesiaren osotasunean eragin zuzena dute. Ebidentziaren arabera, MPek muki-geruza mehetzea, enterozitoen egitura aldatzea eta lotura estuko proteinak (tight junction proteins) kodetzen dituzten geneen adierazpena murriztea eragin dezakete [28, 48]. Ondorioz, heste-hesiaren iragazkortasuna handitu egiten da, eta "leaky gut" fenomenoa garatzeko aukera areagotzen da [49].

Hesiaren disfuntzio horrek mikroorganismoen osagaiak, toxinak eta MPen tamaina txikieneko frakzioa ehun sakonagoetara iristea erraztu dezake. Gainera, MPek ingurunean xurgatutako kutsatzaile kimikoak eta mikroorganismoak garraiatzeko duten gaitasunak ("Trojan Horse" efektua) prozesu hori are gehiago larriagotu dezake [18, 23, 41]. Horrela, heste-hesiaren alterazioa ez da soilik ondorio estruktural bat; immunitate-sistemaren aktibazio iraunkorrerako atea ere bihurtzen da.

2.3.2.4. Estres oxidatiboa eta hanturazko erantzunaren aktibazioa

Heste-hesiaren disfuntzioarekin batera, MPen esposizioak estres oxidatiboaren eta hanturazko seinaleztapenaren aktibazioa sustatzen du. Eredu esperimentaletan frogatu da oxigeno-espezie erreaktiboen (ROS) ekoizpena handitzen dela, eta horrek zelulen defentsa antioxidatzaileak gainditu ditzakeela [6, 28, 49, 61, 51]. Egoera horretan, kalte oxidatiboak epitelioaren osotasuna are gehiago ahultzen du, aurretik hasitako disfuntzio fisiologikoa indartuz.

Bestalde, ROSen metaketak eta heste-hesiaren narriadurak berezko immunitatearen seinaleztapen-bide nagusiak aktibatzen dituzte, bereziki TLR4/NF-κB eta NLRP3 inflamasomarekin lotutako bideak [28, 49, 50]. Horren ondorioz, IL-6, TNF-α eta IL-1β bezalako zitokina proinflamatorioen ekoizpena handitzen da, eta hantura lokal iraunkorra ezartzen da.

Azken batean, gaur egun proposatzen den ereduan mekanismo horiek ez dira modu independentean gertatzen. Disbiosiak metabolismo mikrobianoa aldatzen du; metabolismoaren alterazioak heste-hesia ahultzen du; hesiaren disfuntzioak estres oxidatiboa eta immunitatearen aktibazioa sustatzen ditu; eta hantura kronikoak, aldi berean, mikrobiotaren desoreka areagotzen du. Horrela, MPen esposizio kronikoak elkar elikatzen duten alterazioen ***gurpil zoro fisiopatologikoa*** sor dezake, heste-homeostasia pixkanaka galduz eta ondorengo osasun-ondorio gastrointestinal zein sistemikoen oinarriak ezarriz.

2.4. Osasun gastrointestinal eta sistemikorako inplikazioak

Aurreko atalean deskribatutako mekanismoek iradokitzen dute MPen esposizio kronikoak heste-homeostasia modu progresiboan asalda dezakeela. Gaur egun eskuragarri dagoen ebidentziaren arabera, mikrobiotaren disbiosiak, jarduera metabolikoaren alterazioak, heste-hesiaren disfuntzioak eta hanturazko erantzunaren aktibazio iraunkorrak elkar indartzen dute, eta horrek ondorio biologiko garrantzitsuak izan ditzake bai traktu gastrointestinalean bai organismo osoan [14-18, 28, 41].

Heste-mailan, lehenengo ondorioetako bat mikrobiotaren babes-funtzioaren galera da. Mikrobio-komunitatearen oreka aldatzeak mantenugaien metabolismoa, bitamina batzuen sintesia eta SCFAen ekoizpena murrizten ditu; horren ondorioz, epitelio intestinalaren mantentzea eta heste-hesiaren osotasuna ahuldu egiten dira [16, 33, 41, 46]. Aldi berean, hesteetako hiperiragazkortasuna areagotzeak mikroorganismoen osagaiak, toxinak eta bestelako molekulak mukosaren azpiko ehunetara iristea errazten du, eta horrek berezko immunitatearen aktibazio jarraitua susta dezake [14, 28, 49].

Testuinguru horretan, MPen esposizioa hesteetako hantura iraunkorrarekin lotu dute hainbat ikerketak. Eredu esperimentaletan zitokina proinflamatorioen ekoizpena handitu dela, estres oxidatiboa areagotu dela eta mukosaren egitura histologikoan alterazioak gertatu direla deskribatu da [14, 28, 49-51]. Ondorio horiek ez dira MPen presentzia fisikoaren ondorio

hutsak; aitzitik, mikrobiotaren alterazioek eta immunitate-erantzunaren aktibazioak elkar indartzen dituzten prozesu dinamiko baten emaitza direla uste da.

Horren ondorioz, hainbat autorek proposatu dute MPek hesteetako zenbait gaixotasunen garapena edo progresioa erraztu dezaketela, bereziki hesteetako hanturazko gaixotasunen (Inflammatory Bowel Disease, IBD) testuinguruan [6, 54, 55]. Hala ere, gaur egun ez dago kausalitate hori baieztatzeko giza-ebidentzia nahikorik. Beraz, egungo datuek aukera biologiko sinesgarri bat iradokitzen duten arren, ezin da ondorioztatu MPak gaixotasun horien eragile zuzenak direnik [16, 38].

Bestalde, heste-mailako alterazioek organismo osora hedatu daitezkeen ondorioak ere izan ditzakete. Heste-hesiaren iragazkortasuna handitzeak eta gradu baxuko hantura kronikoa ezartzeak hanturazko bitartekariak zirkulazio sistemikora iristea ahalbidetu dezakete, eta horrek beste organo batzuen funtzionamenduan eragina izan dezake. Animalia-ereduetan MPen metaketa gibelean, giltzurrunetan eta barean deskribatu da, eta organo horietan metabolismo lipidikoaren alterazioak, estres oxidatiboa eta disfuntzio metabolikoa behatu dira [15, 18, 23, 30].

Era berean, azken urteotan argitaratutako lan batzuek MPen esposizioaren eta alterazio metaboliko sistemikoen arteko lotura posiblea proposatu dute. Bereziki, hantura kronikoak eta immunitate-sistemaren desregulazioak intsulinaren seinaleztapena eta energia-metabolismoa alda ditzaketela iradoki da, nahiz eta mekanismo horiek oraindik ez dauden guztiz argituta [18, 52, 57]. Horregatik, gaur egun ez da posible MPen esposizioa gaixotasun metaboliko edo kroniko jakinekin zuzenean erlazionatzea; hala ere, mikrobiotaren bidezko mekanismo fisiopatologikoek hipotesi biologiko sendoa eskaintzen dute etorkizuneko ikerketetarako.

Azken batean, gaur egungo ebidentziak adierazten du MPen ondorioak ez direla heste-mailara mugatzen. Hesteetako homeostasiaren galerak tokiko alterazio fisiologikoak eragin ditzake, eta, aldi berean, organismo osora heda daitezkeen prozesu inflamatorio eta metabolikoak sustatu. Hala ere, ondorio horien benetako garrantzia klinikoa oraindik ez dago zehaztuta, eta giza populazioan egindako ikerketa prospektiboek bakarrik ahalbidetuko dute MPen esposizio kronikoaren arrisku erreala ebaluatzea.

2.5. Egungo ezagutza-hutsuneak eta etorkizuneko ikerketa-ildoak

Azken urteotan MPen eta hesteetako mikrobiotaren arteko elkarreraginari buruzko ezagutza nabarmen handitu bada ere, gaur egun oraindik ezin da zehaztasunez baloratu MPen esposizio dietetikoak giza osasunean duen benetako arriskua. Ezagutza-hutsune hori ez da soilik datu kopuru eskasaren ondorio; aitzitik, eskuragarri dagoen ebidentziaren heterogeneotasun metodologikoak eta giza ikerketen urritasunak baldintzatzen dute.

Lehenik eta behin, azterketa esperimental gehienak *in vitro* ereduetan edo animalia-ereduetan oinarritzen dira. Eredu horiek ezinbestekoak izan dira MPen toxikotasunaren mekanismo biologikoak ulertzeko, baina askotan erabilitako polimero motak, partikulen tamainak, esposizio-denborak eta administratutako dosiak ez datoz bat gizakiek eguneroko bizitzan jasaten duten esposizioarekin [14-18, 28, 37]. Ondorioz, emaitzen norabidea koherentea bada ere, efektuen intentsitatea eta haien garrantzi klinikoa ezin dira zuzenean estrapolatu giza populaziora.

Bestalde, MPen detekzio eta kuantifikazioan oraindik ez dago nazioartean onartutako metodologia estandarizaturik. Analisi-tekniken, laginketa-protokoloen eta tamaina-detektagarriaren arteko desberdintasunek zaildu egiten dute ikerketen arteko konparazioa eta esposizio errealaren estimazioa [10-12, 26, 27]. Egoera horrek arriskuaren ebaluazio kuantitatiboa mugatzen du, eta erakunde arautzaileek, hala nola EFSAk, behin eta berriz azpimarratu dute ebidentzia sendoagoa behar dela gomendio sanitarioak ezarri aurretik [17].

Beste erronka garrantzitsu bat kausalitatea frogatzea da. Gaur egun MPak giza gorozkietan, odolean eta beste hainbat lagin biologikotan detektatu izanak esposizioaren existentzia berresten du; hala ere, oraindik ez dago esposizio-mailaren, mikrobiotaren alterazioen eta ondorio klinikoen arteko lotura zuzena ezartzen duen azterketa prospektibo nahikorik [11, 28, 38-39]. Horregatik, gaur egungo hipotesi fisiopatologiko gehienak bateragarriak eta biologikoki sinesgarriak diren arren, oraindik ezin dute kausalitatea frogatu.

Etorkizuneko ikerketek, beraz, hainbat lehentasun izan beharko lituzkete. Alde batetik, beharrezkoa izango da giza kohorte handietan oinarritutako azterketa longitudinalak garatzea, benetako esposizio kronikoa eta haren ondorio biologikoak ebaluatzeko. Bestetik, MP mota desberdinen, partikulen tamainaren eta esposizio-mailaren eragina modu estandarizatuan aztertzea ezinbestekoa izango da emaitzak alderagarriak izan daitezen. Era berean, komenigarria izango litzateke mikrobiotaren osaera ez ezik, haren jarduera metabolikoa,

metabolomika eta ostalariaren erantzun immunologikoa modu integratuan aztertzea, MPek heste-homeostasian duten eragina hobeto ulertzeko.

Azkenik, azken urteotan prebentzio-estrategia posibleek ere interesa piztu dute. Probiotikoek, prebiotikoek eta dieta bidezko beste esku-hartze batzuek mikrobiotaren oreka berreskuratzeko eta hanturazko erantzuna arintzeko duten gaitasuna aztertzen hasi da, eta lehen emaitzek iradokitzen dute etorkizunean esposizio kronikoaren ondorioak arintzeko estrategia osagarri gisa erabilgarriak izan daitezkeela [71-59]. Hala ere, ebidentzia hori oraindik hasierako fasean dago, eta ezin da gaur egun gomendio klinikorik egin.

Laburbilduz, MPen eta hesteetako mikrobiotaren arteko erlazioa ingurumen-osasunaren eta nutrizioaren arloko ikerketa-ildo estrategikoenetako bat bihurtu da. Egungo ebidentziak mekanismo biologiko koherenteak proposatzen ditu eta arrisku potentzial baten oinarri fisiopatologikoa eskaintzen du; hala ere, ezagutza-hutsune garrantzitsuak daude oraindik. Horregatik, etorkizuneko ikerketen helburua ez litzateke soilik MPen presentzia dokumentatzea izan behar, baizik eta haien esposizio kronikoaren benetako garrantzia biologikoa eta klinikoa zehaztea, ebidentzia sendoan oinarritutako prebentzio- eta osasun publikoaren estrategiak garatu ahal izateko.

3. ONDORIOAK

MPen esposizio dietetikoa ingurumen- eta osasun-arloan gero eta interes handiagoa pizten duen gaia da, elikadura-katean duten presentzia zabalaren eta giza esposizio kronikoaren ondorioz. Berrikuspen honetan aztertutako ebidentziak erakusten du MPek hesteetako mikrobiotaren osaera eta jarduera metabolikoa alda ditzaketela, disbiosia, SCFA ekoizpenaren murrizketa, heste-hesiaren disfuntzioa eta hanturazko erantzunaren aktibazioa sustatuz. Mekanismo horiek modu koordinatuan jarduten dute, eta heste-homeostasiaren galera eragin dezakete.

Hala ere, gaur egun eskuragarri dagoen ezagutza nagusiki *in vitro* eta animalia-ereduetan oinarritzen da. Eredu esperimental desberdinen artean koherentzia handia dagoen arren, giza ikerketa prospektiboen urritasunak eta metodologia estandarizatuen faltak mugatu egiten dute MPen benetako garrantzi biologikoa eta klinikoa ebaluatzeko aukera. Ondorioz, gaur egun ezin da kausalitate zuzena ezarri MPen esposizioaren eta gaixotasun gastrointestinal edo sistemikoen garapenaren artean.

Etorkizuneko ikerketek giza esposizio errealetan oinarritutako azterketa longitudinalak, analisi-metodologia estandarizatuak eta mikrobiotaren ikuspegi funtzionala uztartu beharko dituzte, MPek heste-homeostasian duten benetako eragina argitzeko. Ezagutza hori funtsezkoa izango da ebidentzia zientifiko sendoan oinarritutako prebentzio-, nutrizio- eta osasun publikoko estrategiak garatzeko.

ESKER ONAK

Egileek, Zientzia eta Berrikuntza Ministerioaren (PID2022-138266NB-I00) eta Eusko Jaurlaritzaren (IT1873-26) dirulaguntzak jaso dituzte.

4. BIBLIOGRAFIA

[1] ZIANI K, IONIȚĂ-MÎNDRICAN CB, MITITELU M, NEACȘU SM, NEGREI C, MOROȘAN E et al. 2023. <<Microplastics: A Real Global Threat for Environment and Food Safety: A State of the Art Review>>. Nutrients. 15, 617. DOI: 10.3390/nu15030617.

[2] ALLEN S, ALLEN D, MOSS K, LE ROUX G, PHOENIX VR, SONKE JE. 2020. <<Examination of the Ocean as a Source for Atmospheric Microplastics>>. PLoS ONE. 15, e0232746. DOI: 10.1371/journal.pone.0232746.

[3] GEYER R. 2020. <<Production, Use, and Fate of Synthetic Polymers>>. In: Plastic Waste and Recycling. Elsevier. 13-32. DOI: 10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5.

[4] OECD. 2022. <<Global Plastics Outlook>>. OECD Publishing. DOI: 10.1787/de747aef-en.

[5] EUROPEAN COMMISSION. 2024. <<The Circular Economy for Plastics: A European Analysis>>.

[6] ZHANG X, YU C, WANG P, YANG C. 2025. <<Microplastics and Human Health: Unraveling the Toxicological Pathways and Implications for Public Health>>. Frontiers in Public Health. 13. DOI: 10.3389/fpubh.2025.1567200.

[7] LÓPEZ DE LAS HAZAS MC, BOUGHANEM H, DÁVALOS A. 2024. <<Untoward Effects of Micro- and Nanoplastics: An Expert Review of Their Biological Impact and Epigenetic Effects>>. Advances in Nutrition. 15, 1310-1323. DOI: 10.1093/advances/nmab154.

[8] DUDA A, PETKA K. 2025. <<The Presence of Micro- and Nanoplastics in Food and the Estimation of the Amount Consumed Depending on Dietary Patterns>>. Molecules. 30, 3666. DOI: 10.3390/molecules30183666.

[9] BORRIELLO L, SCIVICCO M, CACCIOLA NA, ESPOSITO F, SEVERINO L, CIRILLO T. 2023. <<Microplastics, a Global Issue: Human Exposure through Environmental and Dietary Sources>>. Foods. 12, 3396. DOI: 10.3390/foods12183396.

[10] COX KD, COVERTON GA, DAVIES HL, DOWER JF, JUANES F, DUDAS SE. 2019. <<Human Consumption of Microplastics>>. Environmental Science & Technology. 53, 7068-7074. DOI: 10.1021/acs.est.9b01517.

[11] REFOSCO A, DIERKES J, KÖGEL T, DANKEL SN, LAUPSA-BORGE J, GOMIERO A et al. 2025. <<Microplastics in Human Feces: A Pilot Study Exploring Links with Dietary Habits>>. Microplastics and Nanoplastics. 5, 22. DOI: 10.1186/s43591-025-00129-6.

[12] RANDHAWA JS. 2023. <<Advanced Analytical Techniques for Microplastics in the Environment: A Review>>. Bulletin of the National Research Centre. 47, 174. DOI: 10.1186/s42269-023-01148-0.

[13] PAUL MB, STOCK V, CARA-CARMONA J, LISICKI E, SHOPOVA S, FESSARD V et al. 2020. <<Micro- and Nanoplastics: Current State of Knowledge with the Focus on Oral Uptake and Toxicity>>. Nanoscale Advances. 2, 4350-4367. DOI: 10.1039/D0NA00539H.

[14] ZHANG Z, XU M, WANG L, GU W, LI X, HAN Z et al. 2023. <<Continuous Oral Exposure to Micro- and Nanoplastics Induced Gut Microbiota Dysbiosis, Intestinal Barrier and Immune Dysfunction in Adult Mice>>. Environment International. 182, 108353. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108353.

[15] LU L, WAN Z, LUO T, FU Z, JIN Y. 2018. <<Polystyrene Microplastics Induce Gut Microbiota Dysbiosis and Hepatic Lipid Metabolism Disorder in Mice>>. Science of the Total Environment. 631-632, 449-458. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.051.

[16] THIN ZS, CHEW J, ONG TYY, RAJA ALI RA, GEW LT. 2025. <<Impact of Microplastics on the Human Gut Microbiome: A Systematic Review of Microbial Composition, Diversity, and Metabolic Disruptions>>. BMC Gastroenterology. 25, 583. DOI: 10.1186/s12876-025-04140-2.

[17] EFSA PANEL ON CONTAMINANTS IN THE FOOD CHAIN (CONTAM). 2016. <<Presence of Microplastics and Nanoplastics in Food, with Particular Focus on Seafood>>. EFSA Journal. 14. DOI: 10.2903/j.efsa.2016.4501.

[18] BORA SS, GOGOI R, SHARMA MR, ANSHU, BORAH MP, DEKA P et al. 2024. <<Microplastics and Human Health: Unveiling the Gut Microbiome Disruption and Chronic Disease Risks>>. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology. 14. DOI: 10.3389/fcimb.2024.1492759.

[19] RUBIO-ARMENDÁRIZ C, ALEJANDRO-VEGA S, PAZ-MONTELONGO S, GUTIÉRREZ-FERNÁNDEZ ÁJ, CARRASCOSA-IRUZUBIETA CJ, HARDISSON-DE LA TORRE A. 2022. <<Microplastics as Emerging Food Contaminants: A Challenge for Food Safety>>. International Journal of Environmental Research and Public Health. 19, 1174. DOI: 10.3390/ijerph19031174.

[20] ZURI G, KARANASIOU A, LACORTE S. 2023. <<Microplastics: Human Exposure Assessment through Air, Water, and Food>>. Environment International. 179, 108150. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108150.

[21] KADAC-CZAPSKA K, KNEZ E, GREMBECKA M. 2024. <<Food and Human Safety: The Impact of Microplastics>>. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 64, 3502-3521. DOI: 10.1080/10408398.2022.2132212.

[22] SEWWANDI M, WIJESEKARA H, RAJAPAKSHA AU, SOYSA S, VITHANAGE M. 2023. <<Microplastics and Plastics-Associated Contaminants in Food and Beverages: Global Trends, Concentrations, and Human Exposure>>. Environmental Pollution. 317, 120747. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120747.

[23] WANG YF, WANG XY, CHEN BJ, YANG YP, LI H, WANG F. 2025. <<Impact of Microplastics on the Human Digestive System: From Basic to Clinical>>. World Journal of Gastroenterology. 31. DOI: 10.3748/wjg.v31.i4.100470.

[24] STOCK V, BÖHMERT L, LISICKI E, BLOCK R, CARA-CARMONA J, PACK LK et al. 2019. <<Uptake and Effects of Orally Ingested Polystyrene Microplastic Particles *In Vitro* and *In Vivo*>>. Archives of Toxicology. 93, 1817-1833. DOI: 10.1007/s00204-019-02478-7.

[25] IBRAHIM YS, TUAN ANUAR S, AZMI AA, WAN MOHD KHALIK WMA, LEHATA S, HAMZAH SR et al. 2021. <<Detection of Microplastics in Human Colectomy Specimens>>. JGH Open. 5, 116-121. DOI: 10.1002/jgh3.12457.

[26] SCHWABL P, KÖPPEL S, KÖNIGSHOFER P, BUCSICS T, TRAUNER M, REIBERGER T et al. 2019. <<Detection of Various Microplastics in Human Stool>>. Annals of Internal Medicine. 171, 453-457. DOI: 10.7326/M19-0618.

[27] STOCK V, FAHRENSON C, THUENEMANN A, DÖNMEZ MH, VOSS L, BÖHMERT L et al. 2020. <<Impact of Artificial Digestion on the Sizes and Shapes of Microplastic Particles>>. Food and Chemical Toxicology. 135, 111010. DOI: 10.1016/j.fct.2019.111010.

[28] HIRT N, BODY-MALAPEL M. 2020. <<Immunotoxicity and Intestinal Effects of Nano- and Microplastics: A Review of the Literature>>. Particle and Fibre Toxicology. 17, 57. DOI: 10.1186/s12989-020-00387-7.

[29] YANG Z, WANG M, FENG Z, WANG Z, LV M, CHANG J et al. 2023. <<Human Microplastics Exposure and Potential Health Risks to Target Organs by Different Routes: A Review>>. Current Pollution Reports. 9, 468-485. DOI: 10.1007/s40726-023-00273-8.

[30] DENG Y, ZHANG Y, LEMOS B, REN H. 2017. <<Tissue Accumulation of Microplastics in Mice and Biomarker Responses Suggest Widespread Health Risks of Exposure>>. Scientific Reports. 7, 46687. DOI: 10.1038/srep46687.

[31] BIBBÒ S, IANIRO G, GIORGIO V, SCALDAFERRI F, MASUCCI L, GASBARRINI A et al. 2016. <<The Role of Diet on Gut Microbiota Composition>>. European Review for Medical and Pharmacological Sciences. 20, 4742-4749.

[32] COVELLO C, DI VINCENZO F, CAMMAROTA G, PIZZOFERRATO M. 2024. <<Micro(nano)plastics and Their Potential Impact on Human Gut Health: A Narrative Review>>. Current Issues in Molecular Biology. 46, 2658-2677. DOI: 10.3390/cimb46030168.

[33] MARTIN-GALLAUSIAUX C, MARINELLI L, BLOTTIÈRE HM, LARRAUFIE P, LAPAQUE N. 2021. <<SCFA: Mechanisms and Functional Importance in the Gut>>. Proceedings of the Nutrition Society. 80, 37-49. DOI: 10.1017/S0029665120006916.

[34] HASAN N, YANG H. 2019. <<Factors Affecting the Composition of the Gut Microbiota, and Its Modulation>>. PeerJ. 7, e7502. DOI: 10.7717/peerj.7502.

[35] DEMARQUOY J. 2024. <<Microplastics and Microbiota: Unraveling the Hidden Environmental Challenge>>. World Journal of Gastroenterology. 30, 2191-2194. DOI: 10.3748/wjg.v30.i16.2191.

[36] LLOYD-PRICE J, ABU-ALI G, HUTTENHOWER C. 2016. <<The Healthy Human Microbiome>>. Genome Medicine. 8, 51. DOI: 10.1186/s13073-016-0307-y.

[37] JIMÉNEZ-ARROYO C, TAMARGO A, MOLINERO N, MORENO-ARRIBAS MV. 2023. <<The Gut Microbiota, a Key to Understanding the Health Implications of Micro(nano)plastics and Their Biodegradation>>. Microbial Biotechnology. 16, 34-53. DOI: 10.1111/1751-7915.14182.

[38] BLACKBURN K, GREEN D. 2022. <<The Potential Effects of Microplastics on Human Health: What Is Known and What Is Unknown>>. Ambio. 51, 518-530. DOI: 10.1007/s13280-021-01589-9.

[39] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). 2022. <<Dietary and Inhalation Exposure to Nano- and Microplastic Particles and Potential Implications for Human Health>>. Geneva: World Health Organization.

[40] GAŁĘCKA I, RYCHLIK A, CAŁKA J. 2025. <<Influence of Selected Dosages of Plastic Microparticles on the Porcine Fecal Microbiome>>. Scientific Reports. 15, 1269. DOI: 10.1038/s41598-024-80337-x.

[41] TAMARGO A, MOLINERO N, REINOSA JJ, ALCOLEA-RODRÍGUEZ V, PORTELA R, BAÑARES MA et al. 2022. <<PET Microplastics Affect Human Gut Microbiota Communities during Simulated Gastrointestinal Digestion, First Evidence of Plausible Polymer Biodegradation during Human Digestion>>. Scientific Reports. 12, 528. DOI: 10.1038/s41598-021-04489-w.

[42] DOMENECH J, HERNÁNDEZ A, RUBIO L, MARCOS R, CORTÉS C. 2020. <<Interactions of Polystyrene Nanoplastics with *In Vitro* Models of the Human Intestinal Barrier>>. Archives of Toxicology. 94, 2997-3012. DOI: 10.1007/s00204-020-02805-3.

[43] NISSEN L, SPISNI E, SPIGARELLI R, CASCIANO F, VALERII MC, FABBRI E et al. 2024. <<Single Exposure of Food-Derived Polyethylene and Polystyrene Microplastics Profoundly Affects Gut Microbiome in an *In Vitro* Colon Model>>. Environment International. 190, 108884. DOI: 10.1016/j.envint.2024.108884.

[44] HUANG X, LU B, LIU H, WU X, LIU Y. 2025. <<Ecotoxicological Impacts of Microplastics on Gut Microbiota: Response Mechanisms, Challenges and Environmental Sustainability - A Review>>. Ecotoxicology and Environmental Safety. 302, 118748. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2025.118748.

[45] WINIARSKA E, JUTEL M, ZEMELKA-WIĄCEK M. 2024. <<The Potential Impact of Nano- and Microplastics on Human Health: Understanding Human Health Risks>>. Environmental Research. 251, 118535. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118535.

[46] FOURNIER E, LEVEQUE M, RUIZ P, RATEL J, DURIF C, CHALANCON S et al. 2023. <<Microplastics: What Happens in the Human Digestive Tract? First Evidences in Adults Using *In Vitro* Gut Models>>. Journal of Hazardous Materials. 442, 130010. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130010.

[47] SOUZA-SILVA TG DE, OLIVEIRA IA, SILVA GG DA, GIUSTI FCV, NOVAES RD, PAULA HA DE A. 2022. <<Impact of Microplastics on the Intestinal Microbiota: A Systematic Review of Preclinical Evidence>>. Life Sciences. 294, 120366. DOI: 10.1016/j.lfs.2022.120366.

[48] SU QL, WU J, TAN SW, GUO XY, ZOU DZ, KANG K. 2024. <<The Impact of Polystyrene Microplastics on the Microscopic Structure of Mouse Intestine, Tight Junction Genes and Gut Microbiota>>. PLoS ONE. 19, e0304686. DOI: 10.1371/journal.pone.0304686.

[49] JIA R, HAN J, LIU X, LI K, LAI W, BIAN L et al. 2023. <<Exposure to Polypropylene Microplastics via Oral Ingestion Induces Colonic Apoptosis and Intestinal Barrier Damage through Oxidative Stress and Inflammation in Mice>>. Toxics. 11, 127. DOI: 10.3390/toxics11020127.

[50] HU M, PALIĆ D. 2020. <<Micro- and Nano-Plastics Activation of Oxidative and Inflammatory Adverse Outcome Pathways>>. Redox Biology. 37, 101620. DOI: 10.1016/j.redox.2020.101620.

[51] KADAC-CZAPSKA K, OŚKO J, KNEZ E, GREMBECKA M. 2024. <<Microplastics and Oxidative Stress—Current Problems and Prospects>>. Antioxidants. 13, 579. DOI: 10.3390/antiox13050579.

[52] CHEN X, ZHUANG J, CHEN Q, XU L, YUE X, QIAO D. 2022. <<Polyvinyl Chloride Microplastics Induced Gut Barrier Dysfunction, Microbiota Dysbiosis and Metabolism

Disorder in Adult Mice>>. Ecotoxicology and Environmental Safety. 241, 113809. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.113809.

[53] JIN Y, LU L, TU W, LUO T, FU Z. 2019. <<Impacts of Polystyrene Microplastic on the Gut Barrier, Microbiota and Metabolism of Mice>>. Science of the Total Environment. 649, 308-317. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.353.

[54] YAN Z, LIU Y, ZHANG T, ZHANG F, REN H, ZHANG Y. 2022. <<Analysis of Microplastics in Human Feces Reveals a Correlation between Fecal Microplastics and Inflammatory Bowel Disease Status>>. Environmental Science & Technology. 56, 414-421. DOI: 10.1021/acs.est.1c03924.

[55] GHOSAL S, BAG S, RAO SR, BHOWMIK S. 2024. <<Exposure to Polyethylene Microplastics Exacerbates Inflammatory Bowel Disease Tightly Associated with Intestinal Gut Microflora>>. RSC Advances. 14, 25130-25148. DOI: 10.1039/D4RA04544K.

[56] PRÜST M, MEIJER J, WESTERINK RHS. 2020. <<The Plastic Brain: Neurotoxicity of Micro- and Nanoplastics>>. Particle and Fibre Toxicology. 17, 24. DOI: 10.1186/s12989-020-00358-y.

[57] ROHM TV, MEIER DT, OLEFSKY JM, DONATH MY. 2022. <<Inflammation in Obesity, Diabetes, and Related Disorders>>. Immunity. 55, 31-55. DOI: 10.1016/j.immuni.2021.12.013.

[58] BOCK PM, MARTINS AF, SCHAAN BD. 2024. <<Understanding How Pre- and Probiotics Affect the Gut Microbiome and Metabolic Health>>. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism. 327, E89-E102. DOI: 10.1152/ajpendo.00054.2024.

[59] BAZELI J, BANIKAZEMI Z, HAMBLIN MR, SHARAFATI CHALESHTORI R. 2023. <<Could Probiotics Protect against Human Toxicity Caused by Polystyrene Nanoplastics and Microplastics?>>. Frontiers in Nutrition. 10. DOI: 10.3389/fnut.2023.1186724.

[60] SUN Y, WU M, ZANG J, DU L, HUANG M, CHEN C, WANG J. 2023. «Plastisphere Microbiome: Methodology, Diversity, and Functionality». iMeta. 2(2), e101. DOI: 10.1002/imt2.101.

[61] CHENG J, MEISTERTZHEIM AL, LEISTENSCHNEIDER D, PHILIP L, JACQUIN J, ESCANDE ML et al. 2023. «Impacts of Microplastics and the Associated Plastisphere on

Physiological, Biochemical, Genetic Expression and Gut Microbiota of the Filter-Feeder Amphioxus». Environment International. 172, 107750. DOI: 10.1016/j.envint.2023.107750.