



Biodegradació del polietilè per llevats: una aproximació inspirada en la natura

Gemma Buron-Moles 

Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA), Sostenibilitat en biosistemes, Torre Marimon, Caldes de Montbui, Catalunya, Espanya

Resum: Els plàstics com el polietilè de baixa densitat (LDPE) són pràcticament indestructibles a la natura. En aquest estudi, s'ha desenvolupat una estratègia inspirada en insectes degradadors de plàstic com la *Galleria mellonella*, que combina un tractament fisicoquímic previ amb l'acció del llevat *Yarrowia lipolytica*. Aquest llevat, habitual en dipòsits de carburants, és capaç d'adherir-se i créixer sobre superfícies de plàstic prèviament tractat, utilitzant-lo com a única font de carboni. Els resultats mostren una degradació inicial significativa, sense alliberament de substàncies tòxiques, i suggereixen una via prometedora per al tractament de residus plàstics persistents.

Summary: BIODEGRADATION OF POLYETHYLENE BY YEASTS: A NATURE-INSPIRED APPROACH. – Plastics such as low-density polyethylene are practically indestructible in nature. In this study, a strategy inspired by the plastic-degrading insects *Galleria mellonella* was developed, combining a preliminary physico-chemical treatment with the action of the yeast *Yarrowia lipolytica*. This yeast, commonly found in fuel storage tanks, is capable of adhering to and growing on pre-treated plastic surfaces, using them as its sole carbon source. The results show significant initial degradation without the release of toxic substances, suggesting a promising pathway for the treatment of persistent plastic waste.

De salvar elefants a ofegar els oceans

A mitjan segle XIX, el món estava a punt de perdre una de les seves matèries primeres més preuades: l'ivori. Aquest material, extret de les defenses dels elefants, s'utilitzava àmpliament per fabricar objectes de luxe, com boles de billar, botons i teclats de piano. La demanda creixent posava en perill les poblacions d'elefants africans i asiàtics.

L'any 1863, una empresa nord-americana va oferir un premi de 10.000 dòlars a qui pogués trobar una alternativa al marfil. L'inventor John Wesley Hyatt va presentar la cel·luloide, un derivat del cotó tractat amb nitrat i càmfora. Tot i ser inflamable, va marcar l'inici de l'era dels plàstics.

Aquella solució va començar com una història de sostenibilitat, però ben aviat es va convertir en un fenomen econòmic. Amb l'aparició de nous polímers sintètics com el polietilè (PE) i el polipropilè (PP) durant el segle XX, la indústria del plàstic va explotar. Avui dia, es calcula que aquest sector mou més de 365 mil milions d'euros a Europa i dona feina a més de 1,5 milions de persones.

Però aquest èxit industrial té un cost ambiental elevadíssim: només el 9% dels plàstics es reciclen, i la resta acaba en abocadors, incineradores o als oceans (<https://www.plasticseurope.org>).

Una nova proposta per a un vell problema

La contaminació per plàstics s'ha convertit en un dels grans reptes ambientals del nostre temps. Després de dècades de producció massiva i ús intensiu, la seva acumulació als ecosistemes marins i terrestres és alarmant. Un dels materials més problemàtics és el polietilè de baixa densitat (LDPE), àmpliament utilitzat per fabricar bosses, films d'embalatge i envasos d'un sol ús. Aquest plàstic destaca per la seva flexibilitat i durabilitat, però també per la seva resistència extrema a la degradació, fet que li atorga una persistència de centenars d'anys en el medi ambient (Krause et al., 2020; UNEP, 2022).

Davant d'aquest escenari, la investigadora Gemma Burón ha proposat una estratègia innovadora i alhora inspirada en la natura per fer front a aquest repte. En lloc d'intentar inventar des de zero un procés per degradar el plàstic, ha optat

per observar i imitar els mecanismes que la pròpia natura ja ha desenvolupat.

Un dels punts de partida clau d'aquesta recerca és el descobriment que certes larves d'insectes, com les de la *Galleria mellonella* (coneguda com el cuc de la cera), poden ingerir i degradar parcialment el plàstic. Aquest fet, documentat fa pocs anys, va generar un gran interès científic. L'anàlisi del sistema digestiu d'aquestes larves va revelar que la degradació del plàstic no es produïa per una única substància, sinó per la interacció complexa entre enzims produïts per l'animal i la microbiota intestinal associada (Bombelli *et al.*, 2017; Sanluis-Verdes *et al.*, 2020).

Aquest exemple natural va servir de base conceptual per al projecte liderat per la Dra. Burón, desenvolupat entre el 2019 i el 2022 al Toulouse Biotechnology Institute (TBI, França) amb finançament europeu d'una beca Marie Skłodowska-Curie Individual Fellowship (MSCA-IF). El projecte ha tingut continuïtat del 2023 al 2025 a l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA, Espanya) gràcies a una beca Beatriu de Pinós de l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR). Com a resultat d'aquest treball, s'ha publicat un article a la revista *Polymer Degradation and Stability* (Buron-Moles *et al.*, 2025). El seu enfocament consisteix a recrear artificialment aquest procés biològic en condicions de laboratori, utilitzant microorganismes coneguts per la seva capacitat de degradar hidrocarburs. Un dels més prometedors és el llevat *Yarrowia lipolytica*, un organisme robust, habitualment trobat en entorns contaminants com dipòsits de carburant o sòls contaminats amb petroli. Aquest llevat és capaç d'utilitzar cadenes de carboni llargues com a font d'energia, una característica essencial per atacar els polímers derivats del petroli, com el polietilè.

No obstant això, el LDPE no es pot biodegradar directament. Per això, l'estratègia de la Dra. Burón afegeix un pas previ: un tractament fisicoquímic suau que oxida la superfície del plàstic, introduint grups funcionals (com carbonils) que els enzims del llevat poden reconèixer i aprofitar. Així, es crea un "pont químic" entre un material sintètic inert i el món viu.

Aquesta proposta representa una nova manera d'abordar un problema antic: no com una lluita contra el plàstic, sinó com un diàleg amb la natura, que ens mostra, amb paciència evolutiva, camins per transformar el que avui és residu en matèria tractable, potser fins i tot útil.

Objectiu de l'estudi

L'objectiu principal del projecte ha estat reproduir, en condicions controlades de laboratori, un procés natural de biodegradació del plàstic, com el que es dona en les larves de *Galleria mellonella*, però prescindint de l'animal i enfocant-se en els microorganismes implicats.

Aquest procés natural es basa en la cooperació entre la química i la biologia: el plàstic s'oxida parcialment dins del sistema digestiu de la larva, i aquesta oxidació inicial facilita que els bacteris i enzims intestinals trenquin la cadena polimèrica del polietilè, degradant-lo progressivament.

La proposta d'aquest estudi ha estat simular artificialment aquest mateix procés mitjançant dues etapes combinades:

1. Un pretractament fisicoquímic suau, que consisteix a submergir el LDPE en una solució biodegradable (com l'estearat sòdic) per provocar una oxidació controlada de la seva superfície. Aquest pas introdueix grups carbonil i redueix el pes molecular del polímer, fent-lo més accessible per a l'atac microbià.

2. Una exposició a un microorganisme especialitzat, concretament el llevat *Yarrowia lipolytica*, conegut per la seva capacitat de metabolitzar hidrocarburs i àcids grassos. Aquest llevat actua com a agent biològic de degradació, aprofitant els nous grups funcionals oxidats del plàstic com a font de carboni i energia.

La combinació d'aquests dos passos, oxidació i atac microbià, busca accelerar artificialment un procés que en la natura és lent i limitat, amb l'objectiu de crear una plataforma biotecnològica replicable i escalable per al tractament de residus plàstics difícils de reciclar.

Aquest enfocament representa una nova línia dins de la biotecnologia ambiental, on es deixa enrere la simple eliminació de residus i s'opta per processos bioinspirats, sostenibles i adaptats a escenaris reals de contaminació.

Tractament fisicoquímic: obrir la porta a la biodegradació

Una de les principals dificultats per degradar el polietilè de baixa densitat (LDPE) és la seva pròpia estructura química. Es tracta d'un polímer format per llargues cadenes de carboni i hidrogen ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$) amb una massa molecular molt elevada, sovint al voltant de 40.000 daltons. Aquesta estructura no presenta cap grup funcional reconeixible pels enzims digestius de microorganismes o altres organismes vius.

A més, el LDPE és altament hidrofòbic, cosa que impedeix la interacció amb aigua i amb els sistemes metabòlics basats en medis aquosos, com els que utilitzen bacteris i fongs. Finalment, no conté àtoms reactius (com oxigen, nitrogen o sofre) que facilitin l'atac químic o enzimàtic. Tot plegat fa que aquest plàstic sigui, a escala microbiana, invisible i inaccessible.

Per això, la primera etapa de la nostra estratègia consisteix a modificar lleugerament la seva superfície per fer-la identificable i atacable per part d'organismes vius. Aquesta modificació es fa mitjançant un pretractament fisicoquímic suau.

En concret, es van submergir grànuls de LDPE en una solució aquosa a l'1% d'estearat sòdic

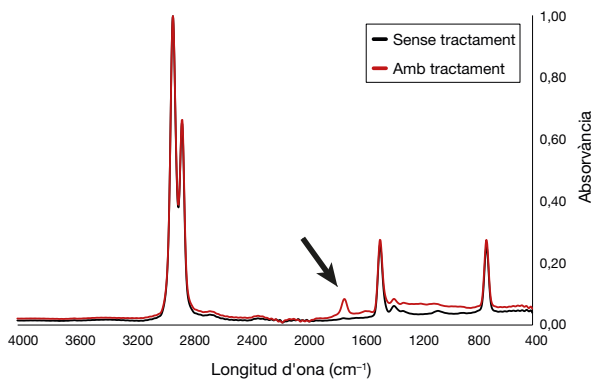


Figura 1. Exemple d'espectre FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) que mostra l'absorció d'infraroig a partir del nombre d'ona (cm^{-1}) per identificar grups funcionals en polietilè de baixa densitat (LDPE). La línia negra correspon a l'espectre del LDPE sense tractament, mentre que la línia vermella representa l'espectre després del tractament fisicoquímic. La fletxa assenjala l'aparició d'un nou pic a la regió corresponent als grups carbonil ($\text{C}=\text{O}$), al voltant de 1.700 cm^{-1} , que indica la formació d'aquests grups com a conseqüència del tractament. Aquesta nova banda suggereix que el material ha experimentat oxidació.

(SS), un tensioactiu biodegradable. La barreja es va incubar durant 60 dies a 60°C amb agitació contínua. Aquesta combinació de temperatura moderada i agitació va facilitar una oxidació parcial del plàstic. Com a resultat, es van formar grups carbonil ($\text{C}=\text{O}$) en la seva estructura, fet que altera la seva química superficial i la fa més vulnerable a la biodegradació (fig. 1).

Aquest procés no trenca completament les cadenes del polímer, però les debilita i hi afegeix punts d'atac potencial per als enzims dels microorganismes.

Per validar aquesta modificació, es va utilitzar espectroscòpia infraroja de transformada de Fourier (FTIR), que permet detectar canvis químics en el material. En particular, es va calcular l'índex carbonil (CI), una mesura de la presència de grups oxidats al polímer. Es va observar un augment significatiu del CI, especialment en mostres tractades amb estearat sòdic (SS), en comparació amb controls no tractats o tractats només tèrmicament. Els valors més alts de CI es van obtenir en condicions d'agitació, amb estearat sòdic al 1%, on el CI va assolir valors propers a 2,0, indicant una oxidació notable del LDPE. En canvi, les mostres no oxidades o només sotmeses a oxidació tèrmica presentaven valors de CI inferiors a 0,1, mostrant una oxidació molt limitada. També es va observar que l'augment de la concentració d'SS (del 1% al 10%) no incrementaven significativament el CI, i fins i tot en alguns casos el reduïen lleugerament.

Paral·lelament, es va analitzar la disminució del pes molecular mitjançant Gel Permeation Chromatography (GPC), una tècnica que mesura la mida mitjana de les cadenes polimèriques. Els resultats van indicar una reducció de fins a 8,6% en el pes

molecular, una dada molt rellevant que confirma que el polímer havia estat parcialment "trencat" o fragmentat, augmentant així la seva accessibilitat per a la fase microbiològica posterior.

Aquest tractament fisicoquímic és, doncs, una mena de «clau d'entrada» que obre el camí perquè els microorganismes puguin interactuar amb un material que, d'altra manera, és completament inert per a la vida.

Tractament biològic: un llevat al servei de la degradació

Després del pretractament fisicoquímic del LDPE, el següent pas va consistir a introduir vida en el sistema: microorganismes amb el potencial de reconèixer i metabolitzar els fragments del plàstic oxidat. Però no qualsevol organisme és capaç de dur a terme aquesta tasca. Calia identificar soques resistents, amb un metabolisme versàtil i amb capacitat d'aprofitar substrats poc convencionals.

Per això, es va dur a terme un cribratge microbià en què es van avaluar 24 microorganismes diferents, pertanyents a tres grans grups: bacteris, fongs filamentosos i llevats. L'objectiu era determinar quins d'ells podien créixer en presència de derivats del LDPE oxidat, utilitzant-los com a font única de carboni.

En aquesta fase, es van dissenyar cultius amb àcids grassos com a substrat, ja que aquests compostos són similars als que s'alliberen quan el LDPE es degrada químicament. El creixement microbià es va mesurar mitjançant la densitat òptica (OD) a 600 nm, una tècnica habitual per estimar la biomassa cel·lular en suspensió.

Entre tots els candidats, un va destacar per sobre dels altres: el llevat *Yarrowia lipolytica*, i en particular la soca DSM 3286. Aquest microorganisme, àmpliament estudiat en processos industrials i ambientals, és conegut per la seva capacitat d'utilitzar hidrocarburs, àcids grassos i altres compostos hidrofòbics com a fonts d'energia.

Un cop identificada la soca prometedora, es va procedir a incubar-la durant 30 dies amb grànuls de LDPE prèviament pretractats fisicoquímicament, en un medi sintètic on el plàstic era l'única font de carboni disponible.

Els resultats van ser clars i prometedors:

1. Augment de la densitat òptica: la soca DSM 3286 va mostrar un increment progressiu de biomassa al llarg dels dies, indicant que podia créixer en presència de plàstic pretractat.

2. Reducció del pes del plàstic: després de 30 dies, es va mesurar una pèrdua mitjana de massa de fins a 0,2%, petita, però significativa, tenint en compte la naturalesa inerta del material.

3. Disminució de l'índex de carbonil (CI): aquest descens, detectat mitjançant FTIR, indica que els grups oxidats introduïts en el plàstic durant el tractament químic havien estat parcialment consumits pel llevat.

4. Absència de subproductes tòxics: mitjançant cromatografia de gasos amb espectrometria de masses (GC-MS), es va analitzar el medi de cultiu i es va comprovar que no s'havien generat compostos perjudicials pel medi ambient.

Aquestes observacions confirmen que *Yarrowia lipolytica* no només és capaç d'adherir-se a la superfície del plàstic, sinó que pot interactuar activament amb els seus components oxidats i utilitzar-los com a substrat de creixement, convertint-se així en una peça clau per a una futura tecnologia de biodegradació dirigida de plàstics persistents.

Resultats: què hem observat i què vol dir

L'estudi es va centrar a comprovar si, després d'un tractament fisicoquímic suau, un microorganisme com el llevat *Yarrowia lipolytica* podia degradar parcialment un plàstic tan resistent com el polietilè de baixa densitat (LDPE).

Tot i que els processos de degradació de plàstic són molt lents, els resultats obtinguts en només 30 dies ja mostren canvis clars i esperançadors.

1. El plàstic es transforma després del tractament fisicoquímic.

L'exposició del LDPE a una solució calenta d'estearat sòdic va induir una oxidació controlada a la seva superfície. Aquesta modificació es va evidenciar amb espectroscòpia FTIR, que va mostrar un augment clar en l'índex de carbonil (CI), indicador de la presència de grups funcionals que els microorganismes poden reconèixer. Aquest canvi químic va convertir una superfície inicialment inerta en un substrat potencialment biodegradable.

2. El llevat va créixer sobre plàstic oxidat.

Entre els microorganismes provats, la soca *Yarrowia lipolytica* DSM 3286 va mostrar la millor resposta. El seu creixement, mesurat per densitat òptica, es va incrementar progressivament en cultius on el plàstic pretractat era l'única font de carboni disponible. En canvi, no es va observar cap proliferació quan el plàstic no havia estat oxidat o en absència total de fonts de carboni, reforçant la hipòtesi que el llevat pot aprofitar compostos derivats del plàstic oxidat.

3. El plàstic va perdre una petita part del seu pes.

Després de 30 dies d'incubació amb el llevat, es va detectar una pèrdua mitjana de massa dels grànuls de plàstic oxidat de fins a un 0,2%. Encara que pugui semblar poc, és un gran avanç: la

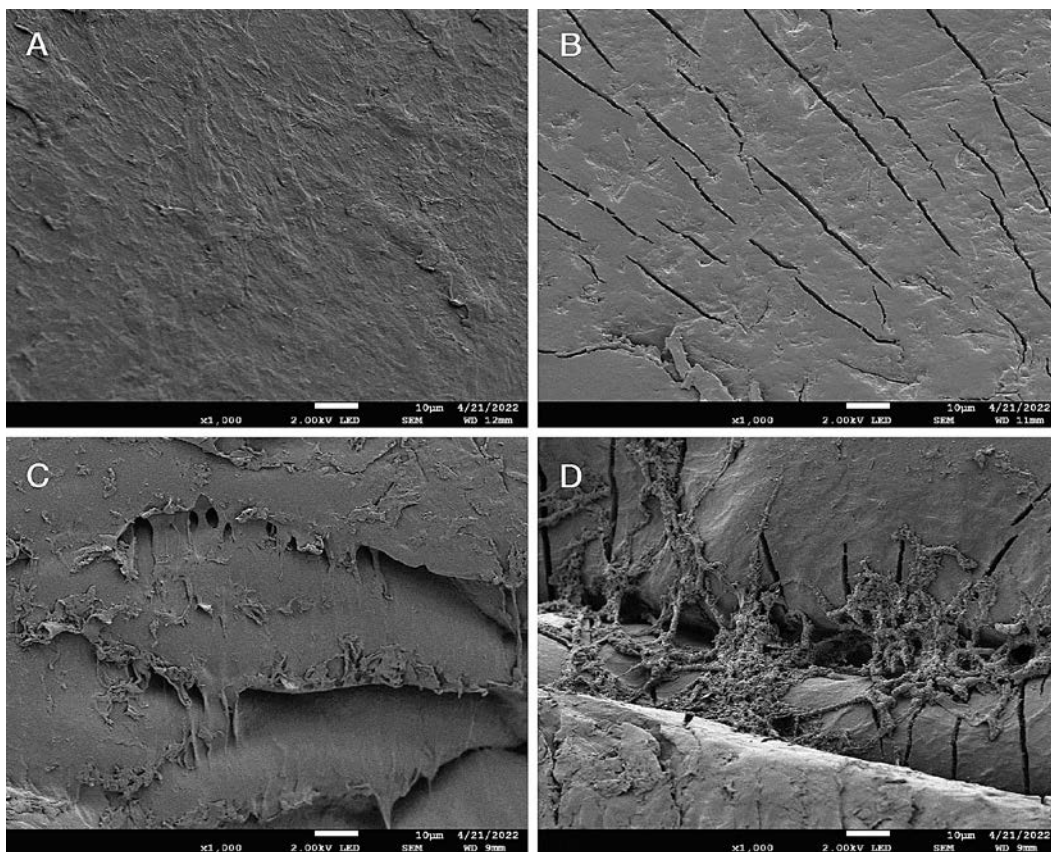


Figura 2. Imatges de microscòpia electrònica de rastreig (SEM) de grànuls de LDPE després de 60 dies amb agitació: A, sense tractar, incubats a 25°C; B, tractats amb 1% d'estearat sòdic (SS) a 60°C; C, sense tractar, però incubats durant 30 dies amb *Yarrowia lipolytica* DSM 3286; i D, tractats i incubats durant 30 dies amb *Y. lipolytica* DSM 3286. Les imatges es van obtenir amb un microscopi electrònic de rastreig operant a 2 kV i amb un augment de $\times 1000$.

majoria de plàstics no es degraden gens en condicions normals, ni en anys.

4. El plàstic es veu diferent al microscopi.

La microscòpia electrònica de rastreig (SEM) va revelar diferències clares entre les mostres: els grànuls sense tractar mostraven superfícies llises i uniformes, mentre que els tractats i exposats al llevat presentaven rugositats, fissures i estructures compatibles amb biofilms, indicant una interacció activa entre el microorganisme i el material (fig. 2).

5. No es van generar compostos tòxics.

L'anàlisi del medi de cultiu mitjançant cromatografia de gasos amb espectrometria de masses (GC-MS) no va detectar la presència de compostos volàtils tòxics, confirmant que el procés de biodegradació no genera subproductes contaminants i pot considerar-se segur des del punt de vista ambiental.

Conclusions

Aquest estudi representa una aportació significativa a la recerca de solucions sostenibles per al tractament dels residus plàstics persistents, com el polietilè de baixa densitat (LDPE). Mitjançant una aproximació bioinspirada, s'ha demostrat que el LDPE pot ser parcialment degradat si prèviament se sotmet a un pretractament fisicoquímic suau que n'altera la superfície i la fa més accessible als microorganismes. En aquest context, el llevat *Yarrowia lipolytica* DSM 3286, ha destacat com un agent biològic eficaç per a la biodegradació controlada de LDPE oxidat. A més, les anàlisis de compostos volàtils han confirmat que aquest procés no genera subproductes tòxics, fet que el consolida com una alternativa segura i respectuosa amb el medi ambient.

Encara que la velocitat de degradació observada és baixa (una estimació lineal indicaria fins a 12 anys per degradar completament un grànul de LDPE de 26 mg), aquest enfocament marca un canvi de paradigma important: en lloc de confiar únicament en el reciclatge mecànic o químic, s'obren noves vies a través de la biotecnologia ambiental i l'ecologia microbiana.

La integració d'aquest tipus de solucions en entorns reals (com la gestió de residus agrícoles o l'aplicació en bioreactors) requerirà més investi-

gació i optimització, però aquest estudi estableix una base sòlida per a convertir un residu indestructible en una matèria tractable per a la vida.

Agraïments

Aquest projecte ha rebut finançament del programa de recerca i innovació Horizon 2020 de la Unió Europea en el marc de l'acord de subvenció Marie Skłodowska-Curie núm. 840038 (Buron-Moles, Gemma). També ha estat finançat pel Programa Beatriu de Pinós de l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR) del Govern de Catalunya, amb la referència BP-2021-00069 (Buron-Moles, Gemma). Els experiments de GPC han estat finançats pel Programa per a Institucions Acadèmiques i de Recerca de Polymer Char, S.A.

Referències

- Bombelli, P., Howe, C.J., Bertocchini, F. 2017. Polyethylene bio-degradation by caterpillars of the wax moth *Galleria mellonella*. *Current Biology*, 27: R292–R293. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.060>
- Buron-Moles, G., Vandenbossche, V., Gorret, N., Santonja-Blasco, L., González-Aranda, T., Cameleyre, X., Guillouet, S. 2025. Biodegradation of pre-treated low-density polyethylene (LDPE) by *Yarrowia lipolytica* determined by oxidation and molecular weight reduction, *Polym. Degrad. Stab.* 236: 111292. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111292>
- Krause, S., Molari, M., Gorb, E.V., Gorb, S.N., Kossel, E., Haeckel, M. 2020. Persistence of plastic debris and its colonization by bacterial communities after two decades on the abyssal seafloor. *Scientific Reports* 10: 9484. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66361-7>
- Sanluis-Verdes, A., Colomer-Vidal, P., Rodríguez-Ventura, F., Bello-Villarino, M., Spinola-Amilibia, M., Ruiz-Lopez, E., Illanes-Vicioso, R., Castroviejo, P., Aiese Cigliano, R., Montoya, M., Falabella, P., Pesquera, C., González-Legarreta, L., Arias-Palomo, E., Solà, M., Torroba, T., Arias, C.F., Bertocchini, F. 2022. Wax worm saliva and the enzymes therein are the key to polyethylene degradation by *Galleria mellonella*. *Nature Communications*, 13: 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33127-w>
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2022. Plastics in Agriculture – An Environmental Challenge. *Foresight Brief* 029. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/emerging-issues/plastics-agriculture-environmental-challenge>