

Usos de materials i d'energia en una Terra finita

Carles Riba Romeva, professor emèrit de la UPC, president de CMES

Carme Garcia Lorés, Llicenciada en història, Membre de la Junta de CMES

Laura Tudurí Sanchis, Gestora de Projectes Institucionals de la UPC, Membre de la Junta CMES

Joaquim Sempere Carreras, Professor emèrit de la UB, vicepresident de CMES

Joan Gaya Fuertes, Enginyer, Membre de la Junta de CMES

Resum:

L'objectiu central d'aquesta comunicació és posar de manifest que sense una nova relació dels humans amb els recursos materials, serà pràcticament impossible efectuar la transició energètica i mitigar els efectes del canvi climàtic. La Terra és un sistema obert pel que fa a l'energia: rep la radiació del Sol i emet la mateixa quantitat d'energia a l'espai; en canvi, pel que fa als recursos materials, la Terra és un sistema tancat. La naturalesa té la capacitat de regenerar en un temps breu els materials orgànics dels éssers vius però no els materials geològics. La gestió de l'enorme quantitat de materials de la civilització humana actual (100 Gt el 2022) requereix de l'ordre de 1/2 del sistema energètic humà i emet el 70% dels gasos amb efecte hivernacle (la meitat si s'exclou AFOLU), dels quals les 2/3 parts en les operacions d'extracció i obtenció. Amb la fi de l'era dels fòssils, la gestió dels materials passa a ser un dels reptes centrals que obligaran a capgirar dos punts essencials: la fi d'un desenvolupament basat en el creixement continu de materials i la substitució d'una economia lineal basada en extreure-usar-llançar per una economia de caràcter circular. La comunicació es tanca amb unes reflexions sobre les noves actituds i accions que caldrà adoptar en el marc d'un desenvolupament sostenible post fòssil, on es fa especial èmfasi en la necessitat d'educar.

Paraules claus: materials, energia, recursos, gestió de materials, economia circular, transició energètica, emissions de GEH, canvi climàtic.

Abstract:

The main objective of this communication is to emphasize that without a new relationship between humans and material resources, it will be practically impossible to achieve the energy transition and mitigate the effects of climate change. The Earth is an open system in terms of energy: it receives radiation from the Sun and emits the same amount of energy into space; however, in terms of material resources, the Earth is a closed system. Nature has the capacity to regenerate in a short time the organic matter of living beings, but not geological matter. The management of the enormous amount of materials of current human civilization (100 Gt in 2022) requires about half of the human energy system and emits 70% of greenhouse gases (half if we excluded AFOLU), of which 2/3 in extraction and obtaining operations. With the end of the fossil era, the management of materials becomes one of the central challenges that will force us to reverse two essential points: the end of a development based on the continuous growth of materials and the replacement of a linear economy based on extract-use-throw with a circular economy. The communication closes with some reflections on the new attitudes and actions that will have to be adopted within the framework of post-fossil sustainable development, where special emphasis is placed on the need to educate.

Keywords: materials, energy, resources, materials management, circular economy, energy transition, GHG emissions, climate change

1. Introducció

L'objectiu central d'aquesta comunicació és posar de manifest que sense una nova relació dels humans amb els *recursos materials*, serà pràcticament impossible tant efectuar la transició de forma efectiva i ordenada a les energies renovables, com mitigar els efectes del canvi climàtic. Aquesta afirmació ve avalada pel fet que de l'ordre del 45 % del sistema energètic humà i el 70 % de les emissions de gasos amb efecte hivernacle [Circle Economy-2023] estan relacionades amb la gestió dels materials.

Previ al desenvolupament de la comunicació, en aquesta introducció es precisa el concepte de material (o recurs material) usat en el text i s'analitza la diferent relació de la Terra amb els recursos energètics i els recursos materials.

Precisió sobre el concepte de material (o de recurs material)

Sovint, la primera idea que ens ve a la ment quan parlem de *materials* és el de les substàncies homogènies sòlides de què estan fets els objectes. Per exemple, acer, ciment, vidre o plàstics.

En aquesta comunicació utilitzem el terme *material* (o *recurs material*) en un sentit més ampli. El terme *material*, adjectiu, fa referència a la matèria, o sigui qualsevol substància que tingui massa i volum; i el terme *material*, substantiu, fa referència a qualsevol conjunt d'eines, matèries o objectes que s'han obtingut per cobrir una necessitat o per desenvolupar una tasca.

En el present text, s'usa el terme *material* incloent alhora els dos significats anteriors: substàncies homogènies fetes de matèria (massa, volum), obtingudes i transformades en diferents graus, destinades a cobrir necessitats o a intervenir en activitats humanes. Per tant, a més dels materials abans citats, també hi entren els aliments, els adobs, les pintures, els combustibles fòssils o la lleña.

Recursos energètics i recursos materials a la Terra

Hi ha una diferència essencial entre els *recursos energètics* i els *recursos materials* disponibles en el planeta Terra.

Pel que fa a l'energia, la Terra és un sistema obert que rep constantment la radiació del Sol (174.400 TW de potència mitjana, unes 10.000 vegades la de tot el sistema energètic humà), i emet constantment la mateixa energia, la major part com a radiació electromagnètica no visible. Lamentablement, el 85% del sistema energètic humà s'alimenta de recursos no renovables (combustibles fòssils i urani) i tan sols el 15% s'alimenta d'energies renovables relacionades amb la radiació solar. A més, la crema dels combustibles fòssils emet gasos amb efecte hivernacle a l'atmosfera que causen el desequilibri entre els dos fluxos energètics (del Sol a la Terra i de la Terra a l'espai), amb el conseqüent augment de la temperatura mitjana de la Terra i un canvi climàtic desfavorable a la vida humana.

Pel que fa als recursos materials, la Terra és un sistema tancat fora de la caiguda esporàdica, insignificant i alhora altament indesitjable, d'algun cos celeste. A més, fora dels materials biològics i els seus ecosistemes, els medis naturals tenen una baixíssima capacitat de regenerar els altres materials a l'escala de temps humana, fet que destaca la necessitat de gestionar-los de manera sostenible.

La transició energètica dels combustibles fòssils a les fonts renovables (derivades fonamentalment de la radiació solar) és perfectament factible i té tot el sentit tant per limitar els efectes del canvi climàtic com per establir la futura base energètica post-fòssil de la humanitat. El problema és que, per fer-la efectiva, a més de vèncer les resistències dels sectors afins a les indústries fòssils i nuclears, que intenten allargar el vell sistema per treure'n el màxim profit, i d'una ciutadania acomodada

a un model de civilització que sols és possible amb els combustibles fòssils i l'exhauriment dels recursos.

Les infraestructures dels parcs d'energies renovables són molt extenses i, aparentment, requereixen un volum de recursos materials més elevat que les tecnologies fòssils que substitueixen (segons Alicia Valero [Valero-2021], unes 25 vegades); tanmateix, quan s'avaluen les instal·lacions aigües amunt dels processos dels fòssils (o sigui mines, pous, refineries, dipòsits d'emmagatzematge i transport), el resultat d'aquesta comparació pràcticament s'equilibra. Tot i així, la massa de materials disponibles per a les instal·lacions del nou sistema elèctric renovable a escala mundial és suficient [Crownhart-2023] i el seu volum és poc rellevant (menys de l'1% anual durant 10 anys) si es compara amb l'ús i malbaratament de recursos materials (entre altres, els bèl·lics) on està instal·lada l'economia actual [Furró-2023]. A més, el tonatge de combustibles fòssils cremats anualment a escala mundial per obtenir electricitat supera el 6,5% de tots els recursos materials de l'economia actual.

Per tant, pel que fa als recursos materials, si bé la transició energètica és un dels reptes principals de l'economia del futur, és del tot indefugible i perfectament viable.

2. La preocupació pel l'ús dels recursos materials

El veritable desencadenant de la crisi sistèmica actual és la necessitat d'abandonar els combustibles fòssils a favor de les energies renovables per obtenir energia. I, això en el doble vessant del declivi d'aquests recursos finits en un futur proper (dintre d'unes poques dècades, de dues a tres al ritme de consum actual) i del fet que el seu ús és la causa principal de la generació de gasos amb efecte hivernacle que desequilibren el clima terrestre en un sentit desfavorable a la pròpia pervivència humana.

La Revolució Industrial i l'ús creixent dels combustibles fòssils (primer el carbó ara farà uns 250 anys i, més tard, el petroli i el gas fòssil), han propiciat unes pautes de desenvolupament en relació a l'ús dels materials que ara sabem que hem d'abandonar: el *creixement econòmic continu* lligat a un augment continu de l'ús de recursos materials el qual reflecteix un comportament humà basat en consums incrementals com a resposta a millores d'eficiència (paradoxa de Jevons); i, l'*economia lineal*, basada en extreure recursos, utilitzar-los i llençar-los a la fi de la seva vida útil com a emissions, dispersions o residus.

La crisi energètica i climàtica dels fòssils ha de posar fi, també, a aquest tipus de desenvolupament. Davant dels primers avisos d'escassetat que han anat apareixent en les darreres dècades i, també, davant de la contaminació creixent dels medis terrestres, aquàtics i atmosfèrics, amb pèrdua de la base biològica i de la biodiversitat de la que formem part els humans, hem començat a prendre consciència de la finitud dels recursos materials i de la necessitat de transformar l'economia lineal actual en una economia tendent a la circularitat on els recursos materials tornin a entrar en l'economia fent possible les reutilitzacions.

Però avançar en la circularitat requereix establir eines de mesura dels recursos materials i mètriques per avaluar-la.

Els Informes de la Bretxa de Circularitat

La fundació Circle Economy, entitat sense ànim de lucre creada l'any 2011 amb seu a Amsterdam, reconeixia que fins l'any 2017 no hi havia cap mesura de referència sobre els itineraris dels recursos materials en el nostre món ni dades disponibles per entendre realment com avançar de manera efectiva vers la seva circularitat i de fer-ne el seguiment.

El gener de 2018, presentava al Fòrum Econòmic Mundial de Davos el primer *Informe sobre la bretxa de circularitat* a escala mundial, on establia que l'ús dels humans en relació als recursos materials només és circular en un 9,1 %, tot deixant una enorme bretxa de circularitat de 90,9 % de recursos materials no circulants. Alhora, aquest informe també proporcionava un marc conceptual i una base numèrica a partir de les quals mesurar i supervisar el progrés orientat a tancar la bretxa. Els treballs de la fundació van donar lloc a la iniciativa de publicar un informe anual sobre la bretxa de circularitat a escala mundial a la que s'hi ha afegit informes sobre països, ciutats i sectors.

L'Informe de la Bretxa de Circularitat de 2018 ja posa les bases sobre el canvi que cal operar.

Després de posar de manifest que “la tradició de l'economia lineal (extreure-usar-llançar) és un còctel tòxic de conseqüències negatives que van des de la desigualtat social fins a l'esgotament dels recursos naturals, la contaminació ambiental i l'empitjorament dels riscos i dels efectes del canvi climàtic”, perfila l'alternativa tot fent distinció entre economia de cicle tancat (on no es malbarataria res, cosa inabastable en les condicions reals) i una economia circular que posaria l'èmfasi “molt més en la minimització i l'eliminació dels residus que no pas en l'extracció de les matèries primeres”.

Així, doncs, l'economia circular, anant més enllà dels aspectes tècnics i de gestió, promou un nou model que “separa allò que desitgem del nostre sistema econòmic, com ara una prosperitat distribuïda i un futur brillant per a les properes generacions, d'allò que refusem, com el malbaratament de recursos naturals i els efectes adversos sobre el nostre entorn i la nostra societat”.

Els *Informes de la Bretxa de Circularitat* han continuat en anys posteriors (fins al 2024 en el moment d'escriure aquesta comunicació), junt amb estudis de països, ciutats o sectors, han anat introduint actualitzacions de les dades i analitzant altres aspectes com la relació entre els materials, les emissions i el valor econòmic, o les estratègies per avançar en la circularitat segons diferents tipologies de països. Lamentablement, l'informe de la bretxa de circularitat de l'any 2023 (sisè informe) mostra que la circularitat global ha caigut fins al 7,2%, i posa de manifest que l'economia global està encallada i que funciona cap enrere, disminuint la circularitat enlloc d'augmentar-la.

L'ambició de l'economia circular és abordar dos dels principals problemes de l'economia lineal: l'extracció excessiva de recursos primaris (especialment els no regenerables) i evitar la generació de residus. En l'informe de 2018 es fa una afirmació rellevant que es reitera en els informes posteriors: “atès que el 67 % (en informes posteriors parla del 70 %) de les emissions globals de gasos d'efecte hivernacle estan relacionades amb la gestió de materials, la mitigació del canvi climàtic requereix la implementació d'estratègies i solucions circulars per capgirar l'ús lineal tant dels materials com de l'energia”. Hi tornarem més endavant.

2. Evolució de l'extracció de recursos materials

Els *Informes de la Bretxa de Circularitat* de Circle Economy (de 2018 a 2024) contempen 4 categories de recursos materials, i proporcionen valors de l'ús mundial de recursos materials en cinc dates assenyalades: 1900 (canvi de segle); 1972 (any que el Club de Roma fa públic l'informe Meadows, *Els límits del creixement*); 2000 (inici del nou mil·lenni); 2015 (data de les dades del primer *Informe de la Bretxa de Circularitat*, de 2018); i 2021 (data de les dades de *Informe de la Bretxa de Circularitat*, de 2023).

La taula 1 mostra l'evolució dels usos de recursos materials agrupats en biomassa i resta de materials i els compara amb la població:

Taula 1. Evolució dels recursos materials usats per la societat humana								
Any	Població		Recursos materials					
			Totals			Biomassa ¹		Resta ²
	Mhab ³	1900=100	Gt ⁴	1900=100	kg/hab/a ⁵	Kg/hab/a ⁵	% total	Kg/hab/a ⁵
1900	1.645	100,0	7,0	100,0	4.260	2.320	54,5%	1.940
1972	3.820	232,5	28,6	408,6	7.480	3.320	44,4%	4.160
2000	6.100	370,8	54,9	784,3	9.000	3.990	44,3%	5.010
2015	7.320	445,0	92,6	1.322,9	12.650	3.920	31,0%	8.730
2021	7.890	485,1	100,6	1.437,1	12.750	3.110	24,4%	9.640
Font: Circle Economy, The Circularity-Gap Report (de 2018 a 2024). Elaboració pròpia.								
¹ Inclou l'alimentació humana								
² Inclou les restants categories de recursos materials: minerals, menes de metalls i combustibles fòssils								
³ Mhab = Milions d'habitants; ⁴ Gt = Giga tones = milers de milions de tones; ⁵ kg per habitant i any								

S'observa que, en el darrer segle i escaig, l'evolució dels recursos materials usats per la humanitat ha evolucionat molt més ràpidament que la població: s'ha passat de 7.000 milions de tones l'any 1900, quan més de la meitat eren recursos materials basats en la biomassa (alimentació, fusta llenya) a 100.600 milions de tones l'any 2021 quan tan sols el 24,4% són recursos de biomassa. En total, en aquests 121 anys els recursos materials s'han multiplicat per 14,5 mentre que la població humana ho ha fet per 4,85; o sigui, els recursos materials usats per càpita s'han multiplicat per quasi 3.

Però, en aquest període no tan sols s'ha produït el gran augment dels recursos materials utilitzats sinó que també hi ha hagut un canvi en la seva composició que ha repercutit negativament en la bretxa de circularitat. En efecte, els recursos materials per càpita en biomassa entre 1900 i 2000 han passat de 2.320 a 3.990 kg/habitant/any, o sigui han augmentat el 72,0 %, però disminueixen a partir de 2000 (probablement a causa de la substitució de biomassa per combustibles fòssils); en canvi, entre 1900 i 2021 la resta de recursos materials extrets (minerals, menes de metalls i combustibles fòssils) ha passat de 1.940 a 9.640 kg/habitant/any, el 497 % (quasi 5 vegades més), amb una tendència a un creixement molt ràpidament a partir de l'any 2000.

3. Balanç mundial dels recursos materials

La encara curta trajectòria dels *Informes de la Bretxa de Circularitat* de la fundació Circle Economy dibuixen un camí per establir els balanços mundials de recursos materials així com els balanços de materials en territoris (ciutats, països, regions) o en sectors econòmics. El novembre de 2022, publica *The Circularity Gap Report 2023. Methods* [CE-CGR-2022] on s'explicita la metodologia usada.

Tot i que els *Informes de la Bretxa de Circularitat* no els donen aquest nom, definim com a *balanç de recursos materials* l'itinerari i les transformacions que recorren els recursos materials usats pels humans durant un any des de la seva obtenció fins a la fi de vida. L'Informe de la Bretxa de Circularitat de 2022 proporciona un conjunt de dades coherent (algunes d'elles ja figuren en l'Informe del 2021) per establir el balanç de recursos materials de l'any 2020. La figura 1 en proporciona l'esquema:

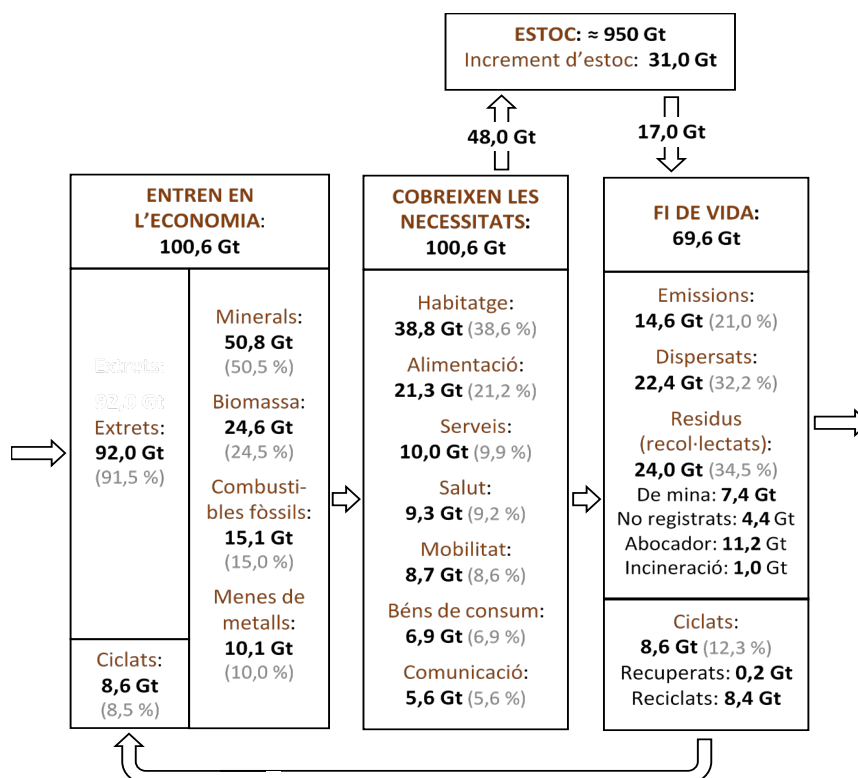


Figura 1. Balanç mundial de recursos materials basat en les dades de l'Informe de la Bretxa de Circularitat de 2022 [CE-CGR-2022]. Gt = milers de milions de tones.

Els valors de la figura 1 inviten a fer els següents comentaris:

1. Dimensió dels usos de recursos materials.

Vers l'any 2020, la humanitat arriba per primera vegada a uns usos globals de recursos materials superiors als 100 Gt (milers de milions de tones) que representen una massa de materials de 12.750 kg per habitant i any. Suposant que el pes mitjà d'un humà és de 55 kg (comptant criatures), això representa un ús anual de materials d'unes 230 vegades el propi pes.

La gran majoria d'aquests recursos materials, 92,0 Gt (91,5%), procedeix de l'extracció mentre que tan sols 8,6 Gt (el 8,5%) prové de materials recirculats.

2. Recursos que entren a l'economia.

Des del punt de vista del tipus de material, els Informes de la Bretxa de Circularitat els classifiquen en les quatre categories que, en l'Informe de 2022 tenen els següents valors:

- *Minerals no metàl·lics*. Inclou la major part de materials destinats a la construcció d'edificis i d'infraestructures; sumen més de la meitat del total de recursos materials, 50,8 Gt (50,5% del total).
- *Biomassa*, que inclou els aliments humans i altres materials de base biològica com la fusta, la llenya o les fibres. Són els segons en importància numèrica, 24,6 Gt (24,5% del total)
- *Combustibles fòssils*. Utilitzats fonamentalment per obtenir energia i, en proporció molt menor, per a materials de base polimèrica, com els plàstics; són el 15,1% de la massa de materials
- *Menes de metalls*. Són minerals que, després de processos normalment molt intensius en energia proporcionen els metalls; sumen 10,1 Gt (el 10,0% de la massa dels materials).

Un cop obtinguts, aquests materials passen per diverses etapes que aquí no es detallen (processament, producció, i proveïment) fins a cobrir les necessitats socials.

3. Distribució en necessitats socials.

Aquests materials primaris, convenientment transformats, s'apliquen a cobrir les necessitats humanes que els *Informes* citats agrupen en:

- *Habitatge*. Inclou la construcció i el manteniment d'edificis residencials; suma 38,8 Gt de recursos materials, el 38,6% del total
- *Alimentació*. Inclou els aliments procedents de l'agricultura, la ramaderia, la pesca, l'aqüicultura i la indústria associada; suma 21,3 Gt de recursos materials, el 21,1% del total
- *Serveis*. Inclou els serveis que es presten a la societat com ara l'educació, l'oci, els serveis públics, el comerç, la banca i les assegurances: suma 10.0 Gt, el 9,9% dels recursos materials.
- *Sistema de salut*. En augment amb l'envelliment de la població, inclou les infraestructures, els serveis, equips de salut i la farmàcia; sumen 9,3 Gt de recursos materials, el 9,2 % del total.
- *Mobilitat*. Inclou les activitats de transport, les infraestructures, els vehicles i els combustibles; sumen 8,7 Gt, el 8,6% dels recursos materials.
- *Béns de consum*. Grup divers i complex de productes que inclou, entre d'altres, la roba, el material de neteja i els electrodomèstics; sumen 6,9 Gt, el mateix percentatge del total.
- *Comunicació*. Inclou els serveis en augment de comunicació i interconnectivitat, amb les infraestructures de telecomunicacions, els centres de càlcul i les bases de dades; sumen 5,6 Gt.

4. *Estoc de materials*. Hi ha béns de llarga durada (més d'un any), com ara edificis, infraestructures, instal·lacions, maquinària i béns d'equip en general, per als quals la fi de vida arriba molt temps després de l'obtenció dels materials. Amb aquests béns, doncs, es genera un flux de materials vers l'*estoc* i, també, un flux de materials de l'*estoc* vers la *fi de vida*. En general, aquests dos fluxos són diferents (avui dia l'estoc augmenta) i, per tant, la quantitat anual de materials que entren en l'economia és diferent (avui, més gran) que els materials que arriben a la fi de vida.

5. *Fi de vida*. Aquesta és l'etapa en la que l'economia lineal predominant ha prestat menys atenció, on manquen més dades i estan menys estructurades. Basant-se en investigacions anteriors, els informes de Circle Economy han fet un gran esforç per conceptualitzar aquesta etapa crucial en una economia que vol ser circular. En l'Informe de la Bretxa de Circularitat de 2022 els materials que arriben a la fi de vida són 69,6 Gt de les que són: 14,6 Gt d'*emissions* a l'atmosfera (fruit fonamentalment de la crema de combustibles fòssils on, per fer coherent el balanç no es compta l'O₂ incorporat en la combustió [CE-CGR-2022]); 22,4 Gt de *materials dispersats* en els medis aeris, aquàtics i terrestres; 24,0 Gt de *residus* recollits que, al seu torn, es poden agrupar en: *de mines* (7,4 Gt), *no registrats* (4,4 Gt) *a abocadors* (11,2 Gt) i *incinerats* (1,0 Gt). Finalment, hi ha els *materials ciclats* (8,6 Gt), suma dels *recuperats* (0,2 Gt) i els *reciclats* (8,4 Gt).

4. Els recursos de l'aigua i de l'aire

Els informes de la Bretxa de Circularitat no inclouen ni l'aigua dolça, ni l'oxigen de l'aire (com a comburent), ni tampoc els recursos que s'extreuen dels sòls fèrtils. L'aigua dolça, depenent dels usos, requereix un cert tractament i manipulació (captació, emmagatzematge, potabilització, depuració) mentre que l'aire l'acostumem a usar sense tractaments previs.

Aquests dos recursos són utilitzats en quantitats molt superiors a la resta de recursos materials, com es veurà a continuació.

L'aigua dolça

És un recurs essencial per a la vida i la civilització humanes i s'utilitza en quantitats molt més grans que la resta de recursos materials. En efecte, l'aigua dolça destinada a usos humans a escala mundial és uns 3.905 Gt (milers de milions de tones) [WB-2024a], una massa quasi 40 vegades superior a la de la resta de materials ressenyats en els informes de la Bretxa de Circularitat. Però, alhora, l'aigua dolça dels humans és una petítíssima part de l'aigua dolça de la hidrosfera (poc més d'1/10.000 de 34.700.000 Gt) i, encara una part molt més petita de l'aigua total (dolça i salada) present a la Terra (aproximadament 1/350.000 de 1.386.000.000 Gt).

Més enllà dels casquets polars, les reserves d'aigua dolça més importants són les aigües subterrànies (el 30% de l'aigua dolça i el 0,81% de la hidrosfera), tot i que en molts indrets s'extreu a ritmes més alts que la recàrrega dels aquífers; altres fonts importants d'aigua dolça són els llacs i mars interiors (0,25% de l'aigua dolça total) i els rius que aboquen al mar anualment el 0,12% de l'aigua dolça de la hidrosfera.

L'agricultura usa per a reg el 71% del consum mundial d'aigua dolça, la indústria utilitza el 16% i els usos domèstics absorbeixen el 13% restant. En terme d'usos per càpita, la mitjana mundial és de 505 m³ (o tones) per habitant i any, o 1.380 litres/hab/dia, dels quals 985 són per a l'agricultura, 220 per a la indústria i 175 per al sector domèstic. Recordem que l'ús de la resta de materials és d'uns 45 kg/hab/dia, i ja és molt.

Taula 2. Extracció mundial d'aigua dolça (2019)				
	Gt/any	m ³ /hab/any	litres/hab/dia	%
TOTAL	3.905	505	1.380	100,0%
Ús agrícola	2.785	360	985	71,3%
Ús Industrial	625	80	220	15,8%
Ús domèstic	495	65	175	12,9%
Font [WB-2024]; Elaboració pròpia https://datos.bancomundial.org/indicador/ER.H2O.FWTL.K3				

Avui dia, els principals problemes del subministrament d'aigua dolça són, per un costat, la necessitat de transportar una quantitat enorme d'aquest recurs als sòls fèrtils i als punts de consum cada cop més concentrats en grans metròpolis; i, per altre costat, la necessitat de preservar les aigües de la contaminació (i tractar-les, en cas necessari), tasca cada cop més difícil en el marc d'una economia lineal estretament associada a la generació de residus i de contaminants.

La captació de l'aigua s'ha fet tradicionalment a partir dels aquífers (pous) i dels rius (assuts, embassaments) i el transport a través de canalitzacions empesa per la pròpia gravetat (aigua rodada). L'energia necessària per a la captació i tractament de les aigües de rius i aquífers no contaminats se situa entre 0,35 a 0,50 kWh/m³; en el cas que calgui obtenir-la per dessalinització de l'aigua del mar i s'hagi d'eleva uns 250 m i traslladar fins als punts d'ús, la despesa energètica augmenta fins a uns 4 kWh/m³, unes 10 vegades més (3 en la dessalinització i 1 en el transport, al que encara cal afegir el cost energètic del tractament i evacuació sostenible de les salmorres residuals). Aplicant aquests valors a les aigües domèstiques i industrials, la despesa energètica anual de captació i potabilització seria d'uns 60 kWh/habitant/any mentre que, si cal recórrer a la dessalinització i elevació, serien de l'ordre de 560 kWh/hab/any. En un cas extrem que afegíssim la dessalinització de l'aigua de reg per a l'agricultura, la despesa energètica per càpita s'elevaria a prop de 2.000 kWh/hab/any, de l'ordre d'un 10% de la despesa energètica global..

L'oxigen de l'aire

Tota combustió comporta la utilització de l'oxigen de l'aire. De fet, tots els éssers vius, animals i plantes, obtenen l'energia gràcies a l'O₂ captat a través de la respiració que permet la combustió

de matèria orgànica amb l'expulsió d'anhidrid carbònic, CO_2 , i aigua, H_2O ; alhora, la funció clorofil·lica de les plantes restitueix l'equilibri a partir de l'energia de la llum solar en base a captar el carboni del CO_2 de l'aire per sintetitzar matèries orgàniques i alliberar l'oxigen. Tot i que en la història geològica de la Terra hi ha hagut canvis en la composició de l'atmosfera de la Terra, aquests s'han produït de forma lenta.

Tanmateix, avui dia hi ha processos de la civilització humana que tendeixen a desequilibrar de forma ràpida la composició de l'atmosfera. La principal alteració és la crema dels combustibles fòssils a un ritme 1 milió de vegades més ràpid de quan es van formar. Una altra alteració important són els canvis d'usos dels sòls, fonamentalment la desforestació per destinar els sòls a cultius o pastures.

La massa de l'atmosfera és aproximadament de 5.100.000 Gt (1 milionèsima part de la massa terrestre), i la seva composició (en volum i sense humitat) és de 78,08 % de nitrogen (N_2), 20,95 % oxigen (O_2), 0,93 % argó (Ar), 0,042 % d'anhidrid carbònic (CO_2) i traces d'altres gasos. Addicionalment, l'atmosfera també conté vapor d'aigua en proporcions que van de 0,5 al 3,5 %.

L'atmosfera té un gruix de més de 1.000 km però, a mesura que augmenta l'altura, la pressió i la densitat van disminuint de manera que el 50% de tota la massa es troba en els primers 6 km i, el 75%, en els 11 primers. Si la pressió es mantingués constant, l'altura de l'atmosfera seria de 8 km. A nivell del mar, la pressió és d'1 atmosfera (0,1013 MPa; 1 MPa = 10^6 N/m^2) i la densitat a nivell del mar és de $1,225 \text{ kg/m}^3$, essent el contingut d'oxigen de $0,233 \text{ kgO}_2/\text{m}^3$.

L'aire és alhora una font de recursos (O_2 per a les combustions i, en menor proporció, N_2 per als fertilitzants nitrogenats) i un embornal (CO_2 i altres gasos) que resulten fonamentalment de les reaccions de combustió. Els cicles naturals de l' O_2 i el N_2 són complexos i intervenen en funcions essencials de la vida.

La quantitat d'oxigen i d'aire utilitzat en les reaccions de combustió és enorme. Aquí només s'analitzen els recursos d'aire per la crema dels combustibles fòssils, que és l'acció més desequilibrant de l'ecosistema terrestre. Les emissions de CO_2 a l'atmosfera generades per la crema de combustibles fòssils (carbó, petroli, gas fòssil i crema de gas en torxes o *flaring*), les que més ens preocupen pel seu efecte hivernacle acumulatiu i persistent, van ser el 2021 d'unes 34,12 Gt (milers de milions de tones). Però, la crema de combustibles fòssils també genera vapor d'aigua (H_2O), i l'oxigen necessari per formar CO_2 i H_2O va ser l'any 2021 de 45,24 Gt de O_2 (una massa superior a la de CO_2).

Taula 3. Requeriments d'oxigen i d'aire per a la combustió dels fòssils (2021)

	Massa (Gt)	Emissions (Gt CO_2 /any)	O_2 Combustió (Gt O_2 /any)	Aire combustió (km^3 /any) ¹	Aire combustió (M tones/any) ²
TOTAL FÒSSILS	15,24	34,12	45,24	159.910	195.900
Carbó	7,74	14,84	18,75	66.270	81.180
Petroli	4,44	11,63	14,85	52.490	64.300
Gas fòssil	2,89	7,22	10,98	38.810	47.550
Crema gas en torxa	0,17	0,43	0,66	2.340	2.870
Volum atmosfera					
Gt = giga tones = 10^9 tones Fonts: Massa, [EI-2024]; Emissions [IEA-2023]; Oxigen de combustió, estimació pròpia en base a la composició dels combustibles i relacions estequiomètriques; Volum d'aire de combustió en base a la relació $0,283 \text{ kgO}_2/\text{m}^3$ aire; Massa d'aire de combustió en base a la densitat de l'aire, $1,225 \text{ kg/m}^3$.					

Atès que el contingut d'oxigen en l'aire a pressió a nivell de mar és de $0,283 \text{ kgO}_2/\text{m}^3$ aire, el volum anual d'aire implicat en la crema dels combustibles fòssils és de 159.910 km^3 (l'aire que cobreix

Espanya amb una alçada de 320 metres); i, essent la densitat de l'aire $1,225 \text{ kg/m}^3$, la massa d'aire utilitzat és de 195,90 Gt (unes 2 vegades la massa de tots els recursos materials, excepte l'aigua i l'aire). Tanmateix, aquesta enorme quantitat d'oxigen és tan sols 1/25.000 del que conté l'atmosfera i, fins i tot amb la crema de totes les reserves dels fòssils, la variació del contingut d'O₂ a l'atmosfera seria quasi imperceptible.

En canvi, la crema accelerada dels combustibles fòssils per a obtenir energia produeix un desequilibri de l'atmosfera com a embornal a causa de les emissions de CO₂ i, en menor mesura, d'altres gasos amb efecte hivernacle: metà, òxids nitrosos. Tot i ser de dimensions massives molt menors a les de l'O₂ de la combustió, les conseqüències són catastròfiques per a la civilització humana en generar el canvi climàtic. Localment, la crema de combustibles fòssils també té conseqüències en la contaminació de l'aire, especialment en les grans concentracions urbanes.

6. Materials, energia i emissions

Els Informes de la Bretxa de Circularitat de Circle Economy afirmen reiteradament que la major part de les emissions antròpiques estan relacionades amb la manipulació i l'ús dels recursos materials (67% en l'informe de 2018 [CE-CGR-2018] i 70% a partir de l'informe de 2021 [CE-CGR-2021]), entesos aquests en el seu sentit ample: minerals, menes de metalls, combustibles fòssils i materials de la biomassa (inclosos els aliments). Alhora, aquestes elevades emissions es relacionen també amb un elevat consum d'energia. Tal com s'afirma a l'inici d'aquesta comunicació, això avala el fet que sense una nova relació dels humans amb els recursos materials, no serà possible efectuar la transició energètica de manera efectiva ni mitigar els efectes del canvi climàtic.

A continuació s'analitzen aquestes qüestions.

La gestió dels materials, origen del 70% de les emissions

El gas que més incideix en l'efecte hivernacle és l'anhídrid carbònic (CO₂) amb efecte acumulatiu. Sabem, per l'anàlisi de l'aire retintut en el gel àrtic, que durant els darrers 800.000 anys el contingut de CO₂ a l'atmosfera, ha oscil·lat entre 200 ppm (parts per milió) en les èpoques glacial i 300 ppm en les èpoques de desgel; la crema de combustibles fòssils (i altres accions antròpiques) han elevat el CO₂ atmosfèric des de 270 ppm a l'inici de la Revolució Industrial a 420 ppm en l'actualitat.

Hi ha altres gasos més escassos a l'atmosfera que també incideixen en el canvi climàtic: el metà (CH₄), amb efecte hivernacle 27 vegades superior al del CO₂ però de vida relativament curta (7 a 12 anys), l'òxid nítrics (N₂O), 270 vegades superior i de vida més llarga (superior a 100 anys), i els gasos fluorats amb efectes hivernacles encara més elevats. Aquests efectes (corregits) se sumen al del CO₂ i proporcionen el contingut de CO₂ equivalent, CO_{2eq}. El vapor d'aigua també incideix en l'efecte hivernacle però s'autoregula amb l'evaporació i les precipitacions.

El Panell Intergovernamental per al Canvi Climàtic proporciona una visió completa de les emissions mundials de CO_{2eq} [IPCC-AR6-2022] que, per a l'any 2019, totalitzaven 59,6 GtCO_{2eq}. D'elles, 35,6 (59,7% del total) procedien de la crema de combustibles fòssils, 2,3 (3,9%) de processos industrials (ciment i altres), i 21,7 (36,4%) de la gestió de l'agricultura (i ramaderia), de la silvicultura i d'altres usos dels sòls (AFOLU, *Agriculture, Forestry and Other Land Uses*). Per gasos, el CO₂ hi contribueix amb el 76%, el metà (CH₄) amb el 18%, l'òxid nítrics amb el 4% i els gasos fluorats amb el 2%, aquests darrers gasos majoritàriament generats per les activitats AFOLU.

Per establir la part de les emissions totals que corresponen a la gestió de materials s'ha recorregut al desglossament de l'energia per sectors energètics que ofereixen els balanços energètics de l'Agència Internacional de l'Energia [IEA-2023], i que permeten estimar les emissions corresponents. S'han considerat associades a la gestió de materials les emissions dels sectors primaris, del

sector industrial, dels usos no energètics dels fòssils (com a materials) i del 15% del transport que s'estima lligat a l'extracció i transformació dels materials (sumen 17,8 GtCO_{2eq}/any). A aquests valors cal afegir les *emissions de procés* de certes produccions industrials com la fabricació de ciment (2,3 GtCO_{2eq}/any) i les emissions de les activitats AFOLU (21,7 GtCO_{2eq}/any), relacionades amb la gestió dels materials de la biomassa. Total, 41,8 GtCO_{2eq}/any.

La resta d'emissions es relacionen amb les activitats domèstiques i els serveis (climatització, il·luminació, preparació dels aliments, comunicació, serveis públics, comerç, restauració, oci, banca, etc.) i el 85% del transport restant que sumen 17,8 GtCO_{2eq}/any.

Per tant, les emissions associades a la gestió de materials (41,8 GtCO_{2eq}/any), són el 70,1% de les emissions totals, d'acord amb les manifestacions de l'Informe de la Bretxa de Circularitat de l'any 2021 [CE-CGR-2021] i dels anys següents (taula 4).

Si de les emissions globals es descompten les emissions d'AFOLU, la suma de les emissions dels fòssils i dels processos industrials és de 37,9 GtCO_{2eq}/any de les quals 20,1 GtCO_{2eq} (el 53,0%) s'associen a la gestió dels materials i, les restants 17,8 GtCO_{2eq}/any (el 47,0%), a les activitats domèstiques, als serveis i al gruix del transport (taula 4).

L'obtenció dels materials, destí del 45% de l'energia

El llibre *Energia, una immersió ràpida* [Riba-2024], taula 10, exposa que les indústries bàsiques d'extracció i obtenció dels 20 materials més importants a escala mundial (entre ells acer, ciment, plàstics, alumini, ceràmica, fertilitzants) generen unes emissions de gasos amb efecte hivernacle d'11,47 GtCO_{2eq}/any. És versemblant que, amb una llista més extensa de materials, aquesta xifra augmenti un 10% fins a 12,6 GtCO_{2eq}/any, que representen el 62,8% de les emissions de la gestió de materials, davant de 7,5 GtCO_{2eq}/any (37,2%) de les emissions originades per les indústries transformadores d'aquests materials en productes i béns d'equip i construccions.

El 2019, l'energia primària total (renovable i no renovable) subministrada pel sistema energètic humà era de 168.500 TWh/any. En base al desglossament per sectors d'IEA i seguint els mateixos criteris que per a les emissions, s'estima que l'energia destinada a la gestió de materials és de 76.000 TWh/any (45,1% de l'energia total); la resta, 92.500 TWh/any (el 54,9%) es destina a les activitats domèstiques, als serveis i al gruix del transport.

La mateixa taula 10 del llibre citat [Riba-2024] mostra que les indústries bàsiques d'extracció i d'obtenció dels 20 materials més importants requereixen una energia de 47.110 TWh/any. Augmentant un 10% aquesta valor per a una llista més extensa de materials, aquesta xifra s'eleva a 51.800 TWh/any, que és el 68,2% de l'energia de gestió dels materials mentre que la indústria transformadora utilitza l'energia restant de la gestió de materials, 24.200 TWh/any (31,8%).

La taula 4 resumeix les dades anteriors:

Taula 4. Incidència de la indústria bàsica en la gestió dels materials								
Energia				Emissions				
	TWh/ any	% total	% GM		GtCO _{2eq} /any	% total	% total ²	% GM
Total	168.500	100,0%		Total (amb AFOLU ¹)	59,6	100,0%		
				Gestió de materials	48,1	70,1%		
				Gestió de serveis	17,8	29,9%		
100,0%				Total (sense AFOLU)	37,9	63,6%	100,0%	
Gestió de materials	76.000	45,1%		Gestió materials	20,1		53,0%	
Gestió de serveis	92.500	54,9%		Gestió de serveis	17,8		47,0%	
Gestió de materials	76.000	45,1%	100,0%	Gestió de materials	20,1		53,0%	100,0%
Obtenció materials	51.700		68,0%	Obtenció materials	12,6			62,8%
Transf. materials	25.000		32,0%	Transf. materials	7,6			37,2%

¹ AFOLU, Emissions agrícoles (i ramaderes), forestals, de residus i altres usos del sòl; ² Total sense AFOLU
 Fonts: Energia [IEA-2024]; Emissions, [IPCC-ARS-2022]; Energia i emissions de l'obtenció dels principals materials [Riba-2024]. Elaboració pròpia.

Resumint, la gestió dels materials (o sigui, les activitats globals involucrades en l'obtenció i la transformació dels materials) absorbeix el 45,1 % de l'energia del sistema energètic humà i genera el 70,1% de les emissions de gasos d'efecte hivernacle si s'inclouen les emissions (AFOLU) i el 53,0 % si s'exclouen. I, en el si de les activitats globals de gestió dels materials, les activitats d'extracció i obtenció absorbeixen el 68,0 % de l'energia i generen el 62,8 % de les emissions mentre que la resta correspon a la transformació d'aquests materials en productes, béns d'equip i construccions.

La gestió de materials, doncs, té uns impactes de l'ordre d'1/2 sobre l'energia i les emissions globals i la primera etapa d'extracció i d'obtenció dels materials té uns impactes de l'ordre de 2/3 sobre la gestió de materials i d'1/3 sobre l'energia i emissions totals (incloent AFOLU).

7. Altres punts de vista sobre el materials

Com s'ha dit a l'inici d'aquesta comunicació, la Terra és un sistema tancat pel que fa als materials, no intercanvia materials amb l'exterior. I, tot que la quantitat de materials a l'escorça terrestre és enorme, la civilització humana fa ús cada vegada de més elements molts dels quals són escassos o requereixen quantitats ingents d'energia per a obtenir-los.

S'han donat molts punts de vista sobre els materials que ajuden a comprendre situacions o a proporcionar vies de com establir la seva gestió en una futura economia sostenible. En aquesta secció abans de les conclusions, voldríem recollir quatre d'aquests punts de vista.

El primer, de caràcter geoestràtegic, es basa en la preocupació dels governs dels països i les regions més desenvolupades sobre els materials anomenats "crítics". És una visió a curt termini que, si bé posa sobre la taula el problema dels materials escassos, es fonamenta en un model de creixement i d'economia lineal i el seu objectiu és mantenir (o no perdre) posicions econòmiques hegemòniques.

El segon punt de vista, que compara el metabolisme natural (o biològic) i el de l'espècie humana, és la que manifesten membres de CREAM, de la Universitat Autònoma de Barcelona i del CSIC [Peñuelas-2022] sobre la tendència a partir de la Revolució Industrial a l'increment del nombre d'elements usats per la civilització humana en relació als usats per la biologia, i les seves conseqüències.

[Un tercer punt de vista, basat en la consideració termodinàmica i entròpica dels materials, és la que proporcionen els enginyers Antonio Valero i Alicia Valero, del centre de recerca tecnològic CIRCE de la Universitat de Saragossa, sobre la raresa dels materials a partir de la seva teoria sobre *thanatia* [Valero-2014] [Valero-2021], amb un important antecedent [Naredo-1999].

Finalment, un darrer punt de vista, més operatiu de cara al futur, incideix sobre la recerca i innovació en els materials i les seves aplicacions. Hi ha materials que generen emissions de procés (com el ciment) per als quals cal trobar alternatives i altres materials que són embornals de CO₂ (com la fusta) dels quals cal potenciar l'ús. Per a fer-ho efectiu, és recomanable desplegar programes de recerca tant bàsica com aplicada

Els materials crítics

En els apartats anteriors s'ha centrat l'atenció en el gruix dels materials associats al metabolisme humà (acer, ciment, plàstics, alumini, fertilitzants, combustibles fòssils, aliments etc.), molts dels quals comporten tant uns usos energètics adaptats a les característiques de potència i de disponibilitat temporal dels combustibles fòssils, com la generació d'emissions de gasos amb efecte hivernacle molt importants que cal eliminar; per tant, caldrà reconsiderar la seva obtenció i ús en funció de les característiques de les fonts renovables

Tanmateix, les societats riques i tecnològicament més avançades donen per descomptada la disponibilitat a dojo d'aquests materials, com si fossin inesgotables i no comportessin grans consums energètics ni d'emissions de GEH i, en canvi, centren l'atenció en els materials necessaris per a la quarta revolució industrial (molts d'ells nous) com el coure, cobalt, liti, níquel, platí i on destaquen les terres rares (17 elements). Algunes de les aplicacions es relacionen amb les tecnologies per a la transició energètica (aerogeneradors, panells fotovoltaics, emmagatzematge d'energia, vehicles elèctrics) però d'altres són el suport necessari d'una societat d'alta tecnologia (telèfons mòbils, pantalles i leds, robòtica, tecnologies aeroespacials) on lamentablement destaquen les aplicacions militars.

Alguns d'aquests materials (per exemple, les terres rares) no són escassos, però se solen trobar en concentracions molt baixes i requereixen tecnologies intermèdies d'obtenció i separació complexes amb costos energètics i impactes ambientals elevats. Per tant, no tan sols és important la localització de les mines sinó també les capacitats de processament intermedi; en aquest sentit, la Xina s'ha situat en una posició hegemònica amb el processament, entre d'altres, del 35% del níquel mundial, el 42 % del coure, el 72 % del cobalt, el 87 % de les terres rares, i el 92% del gal·li.

La consideració de materials crítics depèn del país o de la regió en funció dels recursos disponibles, dels objectius econòmics i de les estratègies dels països. Pels Estats Units d'Amèrica, a curt termini són crítics el disprosi, cobalt, gal·li, grafit, iridi, neodimi i terbi i, a mitjà termini, també s'hi afegeixen el liti, níquel, praseodimi, platí, magnesi i carbur de silici. La llista de la Comissió Europea és més llarga i el 2023 abastava 34 materials.

La preocupació pels materials crítics dels governs i de les indústries capdavanteres de la quarta revolució industrial, en no abastar el conjunt de materials, difícilment pot impulsar un gir vers una economia circular orientada a un desenvolupament sostenible, i té més a veure amb una visió geoestratègica a curt termini de les principals potències econòmiques destinada a mantenir les actuals quotes de control i poder sobre l'economia mundial sobre la base errònia de voler perpetuar fins a l'infinit l'ús de recursos finits.

L'elementoma (o nombre d'elements utilitzats) i la ciclabilitat

Un grup de professors i investigadors de CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals), de la Universitat Autònoma de Barcelona i del CSIC ha publicat recentment un article [Peñue-

las-2022] on alerten que l'elementoma humà (o sigui, el nombre d'elements i la seva quantitat utilitzats pels humans) ha divergit cada cop més de l'elementoma biològic que caracteritza els elements utilitzats pels organismes vius no humans. Aquesta divergència creixent deguda a l'evolució tecnològica humana té enormes conseqüències ecològiques, evolutives, ambientals i geopolítiques.

Argumenten que, des de fa milions d'anys, la naturalesa construeix gairebé totes les formes de vida del planeta (troncs, fulles, òrgans, pèls, dents) amb uns 10 elements de la taula periòdica (carboni, calci, oxigen, hidrogen, nitrogen, fòsfor, silici, sofre, magnesi i potassi); en canvi, la construcció del món dels humans (urbs, productes sanitaris, vies fèrries, avions, ordinadors o telèfons mòbils intel·ligents) requereix un nombre creixent d'elements: el 1900, el 80 % provenien de la biomassa (fusta, llenya, aliments), el 2005 aquest percentatge era només del 32 % i tot fa pensar que ens dirigim a una societat on el 80% dels elements procedirà de fonts no biològiques. Els humans, doncs, hem passat de l'ús de materials biològics construïts per elements que permeten un reciclatge ràpid, a metalls, oligoelements i terres rares, alguns d'ells escassos i sense processos naturals de regeneració ni de reciclatge.

Els elements no biològics (metalls, terres rares) s'obtenen de fonts geològiques en base a l'extracció i de complexes tecnologies d'obtenció. Sovint són materials rars i, en molts casos, les seves reserves estan localitzades en uns pocs països, fet que origina conflictes socials, econòmics, geopolítics i ambientals. Els autors recalquen que cal posar fi a l'obsolescència programada i desenvolupar noves tecnologies que afavoreixin un ús més rendible d'aquests materials escassos i que en permetin el reciclatge i la reutilització generalitzada i eficient.

El model de thanatia i l'economia espiral

Partint de la idea que les mines són indrets amb roques especialment riques amb un mineral o un compost útil per a les necessitats humanes, els enginyers Antonio Valero i Alicia Valero, professors de la Universitat de Saragossa, plantegen el model de thanatia.

El model de thanatia

Thanatia és una referència hipotètica (morta o degradada) per a tots els sistemes biogeoquímics de la Terra. Per a l'escorça terrestre, thanatia és una roca comuna, amb una composició mineralògica mitjana que consta d'uns 300 minerals en concentracions molt petites. Amb energia suficient, a partir de thanatia es podrien reconstruir totes les mines del món simplement concentrant de nou els minerals dispersos. Per a l'atmosfera suposa un estat en què tots els combustibles fòssils presents en l'escorça terrestre s'haguessin cremat i transformat en CO₂ i per a la hidrosfera es pren com estat de referència l'aigua de mar que es pot considerar el medi aquàtic de major entropia (si es volgués obtenir aigua dolça, caldria usar energia per dessalar-la).

En una mina, com més rica és la roca (o mena) en l'element que es vol obtenir, menys energia cal per extreure'l i processar-lo. En general s'exploten les mines amb les roques més accessibles i riques ja que comporten menys despeses d'energia i menys moviment de materials; però a mesura que la mina s'explota, les concentracions de l'element van baixant i els costos energètics van creixent.

El cost exergètic de reposició (o evitat) és l'exergia (o treball útil) que caldria invertir per concentrar un mineral des de la roca comuna de thanatia fins a la concentració real de la mina; és una mesura del capital mineral de la mina. Per exemple, la concentració del coure a thanatia seria de 0,0000664% mentre que la concentració de les mines de calcopirita d'on s'extreu, és de 0,5% (quasi 10.000 vegades superior). El cost exergètic d'extracció i refinat és l'exergia per passar de la calcopirita de la mina al coure pur. La suma del cost energètic de reposició (hipotètic) i del cost energètic d'extracció i refinat (real) es manté bàsicament constant i es defineix com la raresa. Les dispersions i les mesclades de materials que resulten del seu ús ens acosten a thanatia.

Per exemple, en tot el planeta no existeix una mina de terres rares amb una concentració superior a 0,001%: és un exemple perfecte de raresa que no es relaciona amb l'escassetat sinó amb la concentració minera; a més, diferents elements de terres rares que se solen trobar en un mateix mineral, tenen propietats químiques molt semblants i són molt difícils de separar (el cost exergètic de reposició no és massa gran ja que es troben en situacions properes a les de thanatia).

L'economia espiral

El model de thanatia mostra que el tipus d'aposta tecnològica actual és incompatible amb un projecte d'estricta economia circular. La mateixa idea d'economia circular és un oxímoron ja que l'entropia sempre juga a favor de la dispersió i de les irreversibilitats; per tant, no existeixen cercles perfectes (obtenció de la mateixa qualitat i quantitat el material del que es parteix) sinó espirals convergents en què hi ha una certa pèrdua de qualitat i/o de quantitat en cada nou cicle.

En la nostra economia el concepte de circularitat ja no és una realitat ni per al primer cicle, però en canvi actua com a element tranquil·litzador de les consciències. En canvi, pare i filla Valero proposen acceptar que l'ús dels materials té un caràcter d'espiral descendent. Partint de reforçar l'ecodisseny, el concepte d'economia espiral condueix a optimitzar l'ús quantitatiu i qualitatiu dels materials, tot ampliant la vida dels productes, eliminant l'obsolescència, evitant la generació de residus i maximitzant el seu aprofitament en successius cicles d'utilització, molt més enllà de l'estricta preocupació per com reciclar els materials. L'entrevista publicada que Adrián Almazán va fer a Antonio i Alicia Valero [Valero-2021] acaba amb unes propostes en forma de lleis de l'economia espiral.

Recerca i experimentació sobre materials

L'elecció dels materials i la seva aplicació també té una incidència molt gran en els consums d'energia i en les emissions de gasos d'efecte hivernacle. Fins recentment, la preocupació sobre l'energia i les emissions grises (energia invertida i gasos amb efecte hivernacle emesos durant la seva obtenció i extracció) havia estat relativament petita a menys que no es traduïssin de forma significativa en els costos, però en l'actual circumstància de crisi energètica i ambiental, aquesta preocupació passa a ser una qüestió central.

Hi ha materials que generen les anomenades *emissions de procés*; per exemple, la fabricació de ciment, independentment del tipus d'energia usada, comporta la descomposició de roca calcària amb emissió de CO₂ a l'atmosfera; o la primera obtenció del ferro en els alts forns per fabricar acer es fa reduint l'òxid de ferro amb carboni (carbó de coc). Entre els dos generen el 18% de les emissions mundials de CO₂ [Riba-2024]. En el cas del ciment, cal trobar materials alternatius lliures d'emissions o, en tot cas, minimitzar-ne el seu ús; en el cas del ferro de primera obtenció s'està plantejant la reducció dels òxids en base a hidrogen.

Per altre costat, alguns materials o medis de base biològica actuen com a embornals de CO₂ (fusta, boscos en creixement, sòls vius). Caldria recuperar l'ús de la fusta com a substitut en estructures i construccions. La proposta SOLARFUSTA [Riba-2023] mostra que si les estructures de suport dels parcs fotovoltaics es fan de fusta (enlloc d'acer, alumini i formigó), aquestes construccions passarien de generar importants emissions a ser un embornal de CO₂ de la mateixa importància. També és interessant ressenyar la construcció a Suècia d'una torre d'aerogenerador de gran alçada fabricada en fusta laminada [BBC-2023].

Per tant, la transició energètica requereix una important tasca de recerca i d'experimentació en materials sostenibles que els poders públics han de finançar i les universitats i els centres de recerca han de prioritzar en els seus programes.

8. Conclusions

El propòsit d'aquesta comunicació es, després d'exposar les xifres del metabolisme mundial dels materials, reflexionar sobre algunes de les noves actituds i accions que caldrà adoptar en el marc econòmic d'un desenvolupament sostenible.

Les principals conclusions de la present comunicació són:

1. La disponibilitat d'energia abundant i concentrada dels combustibles fòssils ha permès un creixement de l'ús de materials (minerals, metalls, combustibles fòssils i materials biològics) per sobre del creixement de la població, des de 7 Gt/any el 1900 fins a 100 Gt/any el 2022 i uns 12.750 kg/hab/any. A aquests valors s'hi afegeixen unes 3.900 Gt/any d'aigua dolça i l'oxigen d'unes 195 Gt/any d'atmosfera
2. A més d'aquest creixement desmesurat, s'ha passat d'un ús majoritari de materials de base biològica el 1900, basats en pocs elements i fàcilment reciclables pels sistemes vius de la pròpia naturalesa, a usar a l'actualitat materials procedents majoritàriament de minerals, basats en molts més elements de la taula periòdica, alguns d'ells rars i molt costosos d'obtenir, que a la fi de vida originen residus de molt difícil reciclabilitat.
3. La gestió dels materials (excloses les activitats AFOLU) requereix el 45% del sistema energètic humà i causa el 53% de les emissions de gasos d'efecte hivernacle; la resta correspon a les activitats domèstiques, els serveis i el transport. En el marc de la gestió de materials, cal destacar que les activitats bàsiques d'extracció i d'obtenció dels materials requereixen el 68% del sistema energètic humà i generen el 63% de les emissions de gasos amb efecte hivernacle, mentre que la resta correspon a les activitats transformadores dels materials en productes i béns materials.
4. La crisi energètica i climàtica actual, que assenjala la fi de l'era dels fòssils, comporta canvis en tots els ordres de la vida humana, tant de tipus tecnològic com de comportaments i de formes d'organització de la societat. Sense una nova gestió dels materials que limiti les extraccions i redueixi els residus no serà possible una transició energètica efectiva ni la mitigació dels efectes del canvi climàtic. Lamentablement, els Informes de la Bretxa de Circularitat detecten una disminució recent de la Taxa de Reciclabilitat en els darrers 5 anys de 9,1 [CE-CGR-2018] a 7,2 [CE-CGR-2023].

Entre els canvis que cal operar en l'economia amb incidència en la gestió dels materials destaquen:

- A. **Abandonar el creixement continu lligat a un augment constant de recursos materials** i adoptar un desenvolupament econòmic proporcionat als recursos materials disponibles en cada circumstància i en cada indret
- B. **Passar d'una economia lineal a una economia tendent a la circularitat.** Cal abandonar les pràctiques d'extreure, utilitzar i llençar els productes a la seva fi de vida com a residus, materials dispersats i emissions. Aquesta nova tendència actua fomentant l'estalvi i reciclant els materials.
- C. **Fer un ús eficient de materials i energia;** junt amb la circularitat obliga a relocalitzar progressivament les activitats i, en cada situació, cercar l'equilibri òptim entre producció i usos i la disponibilitat de recursos de proximitat a fi de facilitar el reaprofitament i el reciclatge.
- D. **Rebaixar la fiscalitat del treball i augmentar la que grava l'ús de recursos materials, d'energia i d'emissions de CO₂.** Aquest canvi dona el doble senyal de fomentar l'estalvi de recursos materials i, alhora, de promoure el repartiment de la riquesa a través del treball humà. Això no treu la prohibició de l'ús de determinats materials, productes i tecnologies nocives o contaminants.

E. **Recercar, innovar i experimentar amb materials ciclables.** La societat actual s'ha configurat sobre l'existència i les característiques dels combustibles fòssils, i ens dirigim vers una nova societat molt diferent basada en energies renovables i materials sostenible que requereix la impulsio de la recerca i la innovació (universitats, centres tecnològics) així com l'experimentació social.

En concordança amb els punts anteriors, es proposa impulsar les següents actituds en relació a la gestió dels materials:

- a) **ESTRÈNYER.** Reconfigurar el desenvolupament econòmic en base a utilitzar menys i minimitzar en el possible les aportacions de materials; evitar en el possible les tecnologies basades en materials d'elevada raresa; eliminar allò inútil, alleugerir els sistemes, fer els sistemes multifuncionals, compartir els béns i serveis, introduir elements de resiliència.
- b) **MODERAR.** Conservar en el possible els béns disponibles i allargar la seva vida i el seu ús; adoptar materials més duradors, impulsar el disseny modular per facilitar el desmuntatge, la reparació, la reutilització i el reciclatge; impulsar les activitats de retrofit, especialment en els vehicles.
- c) **PRESERVAR.** Cuidar la qualitat i la bona salut dels recursos bàsics: aire, aigües i sòls fèrtils; evitar la dispersió de materials en els medis (atmosfera, aigües, sòls); fomentar l'ús de materials de proximitat a fi de minimitzar el transport i l'impacte energètic.
- d) **REGENERAR.** Fer neteja tot utilitzant recursos regeneratius, especialment els de base biològica; eliminar els combustibles fòssils i, en el possible, els materials no reciclables i substituir-los per energies renovables i materials reutilitzables; desenvolupar nous processos sostenibles (acer) o materials alternatius sostenibles (al ciment). Fomentar i prioritzar l'agricultura regenerativa.

Davant d'un concepte no possible d'economia circular estricta, és pertinent la idea d'una economia espiral que, tot acceptant l'existència de dispersió i degradació, centri l'atenció en optimitzar l'ús dels materials a llarg termini tot evitant la generació de residus.

Hi afegiríem dues darreres accions fonamentals:

- e) **CONSCENCIAR.** Entre tots cal dur a terme una gran acció educadora per copsar la situació post-fòssil a la que ens dirigim. Sense comprendre les arrels i les conseqüències d'aquest canvi de paradigma, serà molt difícil que tant la població com els responsables polítics i econòmics modifiquin les pautes de comportament abans que no sigui massa tard. Cal reforçar aquests coneixements i aquestes pautes de comportament a tots els nivells del sistema educatiu, des de les escoles de primària fins a la formació universitària (incloses les escoles de negocis). Alhora, també cal traslladar-los a tots els àmbits d'actuació de les nostres vides i, en especial, en les pràctiques dels consumidors i els fabricants; també és especialment rellevant alinear els continguts i les programacions dels mitjans de comunicació i de les xarxes socials a les pautes descrites.
- f) **REGULAR.** Calen estratègies d'implementació de regulacions i de polítiques que fomentin les pràctiques sostenibles descrites en el document i que, alhora, evitin les desigualtats tot garantint una gestió equitativa i efectiva dels recursos. La implementació d'una nova societat sostenible basada en fonts d'energia renovable requereix un volum important d'inversions que difícilment serà possible sense el concurs de les administracions públiques.

Bibliografia

- BBC [BBC-2018], *World's tallest wooden wind turbine starts turning*, BBC, Jonah Fisher, 28 December 2023 <https://www.bbc.com/news/science-environment-67718719><https://www.bbc.com/news/science-environment-67718719>
- CIRCLE ECONOMY [CE-CGR-2018], *The Circularity-Gap Report. An analysis of the circular state of the global economy*. Circle Economy Foundation, Amsterdam, gener de 2018. <https://circularity-gap.world/2018> (consulta, juliol 2024).
- CIRCLE ECONOMY [CE-CGR-2021], *The Circularity-Gap Report. Solutions for a linear world that consumes over 100 billion tonnes of materials and has warmed by 1-degree*, Circle Economy Foundation, Amsterdam, gener de 2021. <https://circularity-gap.world/2021> (consulta, juliol 2024).
- CIRCLE ECONOMY [CE-CGR-2022], *The Circularity-Gap Report 2023. Method*, Circle Economy Foundation, Amsterdam, novembre de 2022. https://assets.website-files.com/5e185aa4d27bcf348400ed82/63d4468c9a1c6ea04138f206_Global%20CGR%202023%20-Methodology%20Document.pdf (consulta, juliol 2024).
- CIRCLE ECONOMY [Circle Economy-2023], *The Circularity-Gap Report. A circular economy to live within the safe limits of the planet*, Circle Economy Foundation, Amsterdam, gener de 2023. <https://circularity-gap.world/2023> (consulta, juliol 2024).
- CROWNHART, C. [Crownhart-2023], *Yes, we have enough materials to power the world with renewable energy*, Global Insights Panel, MIT Technology Review, 31 de gener de 2023. <https://www.technologyreview.com/2023/01/31/1067444/we-have-enough-materials-to-power-world-with-renewables/>
- ENERGY INSTITUTE [EI-2024], *Statistical Review of World Energy*. Energy Institute. <https://www.energyinst.org/statistical-review> [consulta, 2024].
- FURRÓ ESTANY, E.; FURRÓ VIDAL, MARIA DEL MAR [Furró-2016], *Custodiar la Terra. La voluntat d'un canvi*, Editorial Octaedro, Barcelona desembre de 2016.
- IEA (IEA-2024), *Energy Balances*. Agència internacional de l'Energia, París [consulta 2024]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances#overview>
- IPCC [IPCC-AR6-2022]. *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Emissions Trends and Drives (Chapter 2)*. Working Group III (WGIII) Contribution to the Sixth Assessment Report (AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- NAREDO, J.M.; VALERO, A. (directors) [Naredo-1999]. *Desarrollo económico y deterioro ecológico*. Fundación Argentaria, distribución Editorial Visor, Madrid 1999.
- PEÑUELAS, J., SARDANS, J., & TERRADAS, J. [Peñuelas-2022]. *Increasing divergence between human and biological elementomes*. Trends in Ecology & Evolution 37(11): p. 935-938, novembre de 2022.
- RIBA ROMEVA, C. [Riba-2023], *Projecte SOLARFUSTA. Ús de la fusta en instal·lacions solars*. CMES, gener 2023.
- RIBA ROMEVA, C. [Riba-2024], *Energia, Una immersió ràpida*. Tibidabo Edicions, Barcelona, gener 2024.
- VALERO, ANTONIO; VALERO, ALICIA [Valero-2014], *Thanatia: The Destiny of the Earth's Mineral Resources. A Thermodynamic Cradle-to-Cradle Assessment*. World Scientific, octubre 2014. <https://doi.org/10.1142/7323>.
- VALERO, ANTONIO; VALERO, ALICIA; ALMAZÁN, ADRIÁN [Valero-2021], *Thanatia. Los límites minerales del planeta*. Editorial Icaria S.A., abril de 2021.

WORLD BANK [WB-2024a], *Annual freshwater withdrawals, total (billion cubic meters)*.
<https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWTL.ZS> [consulta, agost de 2024].