



EBC 2030

ESTRATÈGIA
DE LA BIOECONOMIA
DE CATALUNYA 2030

Del residu al recurs: materials orgànics per al segrest de carboni al sòl a Catalunya

Maig 2026

GRUP DE TREBALL

**CARBONI
AL SÒL**



Generalitat
de Catalunya

El Govern de
Tothom!!!



Del residu al recurs: materials orgànics per al segrest de carboni al sòl a Catalunya

Maig 2026

Aquest document forma part dels resultats del projecte Carboni al sòl (2024-2025) finançat pel Fons Climàtic de la Generalitat de Catalunya. Els resultats complets del projecte estan disponibles a Ruralcat: <https://ruralcat.gencat.cat/web/guest/bioeconomia/carboni-al-sol>

© Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació.

© Imatges: imatges lliures de drets de Adobe Stock.

Avís legal

Aquesta obra està subjecta a una llicència Creative Commons del tipus reconeixement d'autoria i usos no comercials. La llicència es pot consultar a: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.ca>



Membres del Grup de treball Carboni al sòl



Generalitat
de Catalunya

El Govern de
Tot hom

Índex

1.	Introducció.....	2
2.	Tipologies de materials orgànics	3
3.	Inventaris de materials i paràmetres indicadors	7
3.1.	Inventari de materials orgànics a Catalunya.....	7
3.2.	Quantificació: obtenció de les dades	11
4.	Presa de mostres i mètodes analítics.....	11
4.1	Criteris tècnics per a la caracterització dels materials orgànics, lignocel·lulòsics i del biochar	11
4.2	Protocols analítics establerts per a la caracterització dels materials	13
4.3	Verificació i limitacions per a la caracterització dels materials	14
5.	Caracterització dels materials orgànics.....	15
5.1.	Tipologia dels materials orgànics caracteritzats	15
5.2.	Paràmetres analítics	16
5.3.	Tendències en el potencial de segrest de carboni.....	17
6.	Conclusions.....	19
7.	Referències	21

Paraules clau

Segrest de carboni al sòl; materials orgànics; bioeconomia circular; residus orgànics; compost; digestat; biocarbó; biochar; biomassa forestal; sòls agrícoles; canvi climàtic; Catalunya.

Autoria

Quer, Hongmei; Caceres, Rafaela; Domingo, Francesc; Prenafeta Boldú, Francesc – Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA)

Ibañez Raffaele, Mercedes; Raya i Moreno, Irene; Carabassa i Closa, Vicenç – Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF)

León i Quiñones, Noemí; Giro i Fontanals, Francesc; Pous i Alo, Meri – Agència de Residus de Catalunya (ARC)

Cuadrench i Tripiana, Anna; Puy i Marimon, Neus (coord) - Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)

Citació recomanada

Quer, H., Càceres, R., Domingo, F., Prenafeta Boldú, F., Ibañez Raffaele, M., Raya i Moreno, I., Carabassa i Closa, V., Cuadrench i Tripiana, A., León i Quiñones, N., Giro i Fontanals, F., Pous i Alo, M., Puy i Marimon, N. *Del residu al recurs: materials orgànics per al segrest de carboni al sòl a Catalunya*. 2026. Generalitat de Catalunya.

1. Introducció

El sòl és la capa superficial de la Terra constituïda per una mescla de partícules sòlides (minerals, matèria orgànica) de diferent mida, i organismes vius, que conformen una matriu porosa que es pot omplir d'aigua i/o aire en diferents proporcions. Es forma, normalment, a partir de la meteorització de la roca mare subjacent, i de l'activitat dels éssers vius, i és essencial perquè s'hi desenvolupin les plantes i molts altres organismes. Es considera un recurs natural no renovable ja que la seva taxa de formació mitjana és extremadament lenta, si bé varia molt en funció dels principals factors formadors.

El sòl és un recurs natural que és la base de múltiples funcions essencials per a la vida a la Terra: regula el clima, proporciona aliments i materials, serveix d'hàbitat per a organismes, absorbeix, filtra i emmagatzema aigua i, especialment, actua com a embornal de carboni. Aquesta funció és clau en la lluita contra el canvi climàtic. En els darrers anys, s'ha constatat una degradació progressiva dels sòls causada, entre d'altres motius, per factors antropogènics, pràctiques agrícoles inadequades i catàstrofes naturals. Davant d'aquesta situació, és urgent restaurar i millorar la salut dels sòls, fet que es posa de manifest en els diferents programes i actuacions que estableixen les línies de treball europees sobre aquesta matèria.

L'aplicació de matèria orgànica al sòl i consubstancialment el segrest de carboni al sòl contribueixen a la mitigació del canvi climàtic, a la millora de la fertilitat i l'estructura del sòl, afavorint la regulació climàtica, la retenció hídrica i la biodiversitat. La protecció i millora dels sòls és especialment important en les zones mediterrànies, i en particular a Catalunya, on els processos de mineralització de la matèria orgànica són més ràpids degut als règim tèrmics.

A Catalunya, es genera una gran quantitat i diversitat de materials i residus orgànics que, conforme a la jerarquia de gestió de residus, són gestionats en bona mesura i de forma directa o indirecta mitjançant la seva aplicació al sòl; aquesta valorització, d'un costat pot contribuir al segrest de carboni del sòl, i de l'altre afavoreix l'economia circular.

Els materials orgànics tenen un paper fonamental en la sostenibilitat dels sistemes agrícoles i en la lluita contra el canvi climàtic. La seva incorporació al sòl contribueix a millorar-ne la fertilitat i la capacitat productiva. Quan els residus orgànics es valoritzen adequadament —ja sigui després de sotmetre'ls a determinats processos de transformació o, en alguns casos, mitjançant la seva aplicació directa al sòl— deixen de ser un problema potencial associat a la seva generació i gestió, i esdevenen una oportunitat per regenerar els sòls, incrementar-ne el contingut de matèria orgànica i establir el carboni en formes més persistents.

Pel que fa als tractaments o processos de transformació, es poden distingir processos primaris, com la separació sòlid-líquid (en el cas de materials pastosos), el compostatge i la digestió anaeròbia; i processos secundaris o terciaris, com ara el tractament amb membranes, l'*stripping* amb absorció d'amoniac o la precipitació d'estruvita, entre d'altres. Entre els materials orgànics susceptibles de valorització per millorar el sòl i afavorir el segrest de carboni s'hi inclouen: el compost procedent de la fracció orgànica dels residus municipals; restes vegetals i determinats subproductes agroalimentaris; el digestat de plantes de biogàs; les dejeccions ramaderes (fems, gallinasses i purins); subproductes agroindustrials dels sectors dels cereals, la fruita i les hortalisses; així com la biomassa forestal triturada i altres residus lignocel·lulòsics.

Aquest enfocament s'alinea amb l'Estratègia de Bioeconomia de Catalunya 2021-2030 (EBC2030), que promou la producció de recursos biològics mitjançant processos locals i renovables per contribuir a l'objectiu d'eliminar les emissions netes de carboni al 2050. Entre les línies estratègiques amb major importància dels sòls destaquen: millorar la qualitat dels sòls agraris i forestals i potenciar el seu paper com a embornal de carboni mitjançant una fertilització orgànica i les pràctiques sostenibles. Aquestes línies es concreten en el Pla d'Acció 2022-2024 i 2025-2027, que inclou la creació d'un Grup de Treball del Carboni al Sòl (GTCS), integrat per unitats del Govern i centres de recerca com el CREAM, CTFC i IRTA.

En aquest context, l'1 de gener de 2022 es va promoure el GTCS, amb l'objectiu d'impulsar el coneixement i la innovació en la gestió dels materials orgànics per maximitzar el seu potencial com a eina de mitigació climàtica. Dins d'aquest marc, el paquet de treball 4 (WP4) ha tingut com a objectiu general avaluar l'aptitud potencial de diferents materials orgànics per contribuir al segrest de carboni al sòl en diversos contextos agronòmics i edafoclimàtics, considerant la seva aportació de matèria orgànica i els beneficis sobre la qualitat física, química i biològica del sòl. Els objectius específics del WP4 del GTCS són els següents:

- Recopilar informació sobre tipologies de materials orgànics disponibles.
- Inventariar els materials orgànics i definir els paràmetres indicadors associats al segrest de carboni.
- Quantificar la disponibilitat d'aquests materials al territori.
- Establir la presa de mostres i els mètodes analítics per caracteritzar els materials orgànics i avaluar la capacitat d'aquests materials per contribuir al segrest de carboni.
- Caracteritzar els diferents materials orgànics.

Aquest document és un recopilatori del treball realitzat en el marc del WP4, amb l'objectiu de posar en valor els resultats obtinguts i establir les bases per a futures accions que consolidin la gestió sostenible dels materials orgànics com a eina per a la mitigació del canvi climàtic, en particular mitjançant la seva aplicació al sòl.

2. Tipologies de materials orgànics

Les esmenes o fertilitzants orgànics són materials rics en carboni (C) destinats a mantenir o augmentar la matèria orgànica del sòl, millorant-ne les propietats físiques, químiques i biològiques. Poden ser tant productes comercials i regulats pel Reial Decret 506/2013 sobre productes fertilitzants, com residus que, per les seves característiques, poden aplicar-se directament al sòl. El Catàleg de Residus de Catalunya inclou diversos residus orgànics aptes per a aplicacions agràries, de jardineria o de restauració de sòls (via de gestió R10), així com residus susceptibles de tractaments previs com el compostatge (R0301) o la digestió anaeròbia (R0302).

Estudis de llarga durada (recopilats en aquest mateix projecte GTCS) mostren que l'addició d'esmenes orgàniques al sòl, tant soles com combinades amb fertilitzants minerals, contribueix de manera significativa a incrementar el segrest de C en ecosistemes agrícoles (Ibañez et al., enviat). Igualment, les esmenes orgàniques han demostrat un alt potencial la restauració de sòls, on han estat essencials per augmentar el contingut de C i millorar funcions clau per a la productivitat i la fertilitat del sòl (Carabassa et al., 2020a, 2020b, 2018).

Cal tenir en compte, però, que l'eficàcia de les esmenes per incrementar l'emmagatzematge de C no depèn només de la quantitat de C aplicat, sinó també de l'equilibri entre C, nitrogen (N), fòsfor (P), i potassi (K) (Ibañez et al., enviat), a banda de factors ambientals (temperatura, humitat) i biològics. Aquestes relacions determinen si el C incorporat es fixa i s'estabilitza o bé es perd ràpidament per mineralització de la matèria orgànica. Les esmenes molt riques en C i pobres en N poden provocar la immobilització de nutrients al sòl (l'anomenada fam de N), mentre que les esmenes molt riques en nutrients poden causar la degradació del C que ja hi havia prèviament al sòl (fenomen d'encebament). Per aquesta raó, una gestió adequada de les esmenes, assegurant un balanç òptim entre C i nutrients, és essencial per a maximitzar el segrest de C, i reduir la dependència de fertilitzants minerals en el cas dels ecosistemes agraris.

A Catalunya disposem d'un ampli ventall de residus i materials orgànics que poden aplicar-se al sòl, ja sigui com a substituïts o com a complementos de la fertilització mineral. Les seves característiques són molt variables i, per tant, també ho són els efectes que poden exercir sobre el sòl. A continuació es presenten les tipologies d'esmenes més habituals, així com altres opcions més innovadores, les característiques principals de les quals es mostren a la Taula 1.

Dejeccions ramaderes

Les dejeccions ramaderes inclouen purins (líquids), fems o gallinassa (sòlids) i són residus amb un elevat potencial d'aplicació al sòl gràcies al seu alt contingut en nutrients com N i P i per la seva gran disponibilitat, amb un potencial de producció anual de dejeccions ramaderes a Catalunya de gairebé 17 Mt/any, essent especialment rellevants els purins amb uns 11 Mm³/any (Generalitat de Catalunya, 2025b).

Els purins tenen una baixa proporció de C, la qual cosa fa que la seva aplicació directa com a esmena orgànica no sigui òptima des del punt de vista del segrest de C. Per tal de millorar la seva aptitud com a esmena, és recomanable barrejar-los amb materials rics en C, com palla o residus forestals, per equilibrar la relació C/N i prevenir la pèrdua ràpida de matèria orgànica per causa del metabolisme microbià. Cal tenir en compte, però, que en el cas dels purins és habitual dur a terme una separació sòlid-líquid que permet obtenir dues fraccions amb característiques diferenciades. La fracció sòlida concentra la proporció més elevada de matèria orgànica i fòsfor, per tant, pot tenir interès com a esmena orgànica o com a material d'entrada per a processos de compostatge, co-compostatge o digestió anaeròbia. La fracció líquida, per la seva banda, sol presentar un contingut relativament més elevat de nitrogen mineral, bàsicament nitrogen amoniacal, i potassi, de manera que el seu ús s'orienta principalment a la fertilització o fertirrigació.

Pel que fa als fems, especialment els dels remugants, que ja són sòlids, presenten un contingut elevat de matèria orgànica ja estabilitzada i una concentració moderada de nutrients, la qual cosa els fa especialment útils per a la rehabilitació i millora de sòls, ja que tenen capacitat per millorar l'estructura del mateix sòl. En canvi, la gallinassa conté una proporció menor de matèria orgànica però amb nutrients més concentrats i disponibles, funcionant més com a fertilitzant que com a esmena.

Restes vegetals

Les restes vegetals (palla, restes de poda, escorça, etc.) són uns materials de naturalesa lignocel·lulòsica amb una relació C/N molt alta, fet que els confereix un elevat potencial com a font de C (Taula 1). Tanmateix, per evitar possibles processos d'immobilització de N, en determinats casos pot ser recomanable combinar-los amb materials rics en N, com ara purins, digestats o fems, o bé incorporar-los en processos de compostatge que en moderin la relació C/N. Per exemple, a Catalunya es generen aproximadament 742.057 tones/any de palla (Generalitat de Catalunya, 2025b), cosa que la converteix en un dels materials orgànics més abundants del sector agrícola.

Un avantatge important és que en general no requereixen cap pretractament abans de la seva aplicació, fet que en facilita notablement la gestió i el retorn al sòl. No obstant, en el cas de residus vegetals llenyosos (troncs, branques, soques) i especialment quan s'apliquen com a encoixinat és necessari triturar-los abans d'aplicar-los al sòl.

Compost

El compost és una esmena orgànica higienitzada i estabilitzada, obtinguda per tractament biològic aerobi, termòfil i controlat de residus orgànics. És àmpliament utilitzat en agricultura i jardineria per aportar matèria orgànica estable i nutrients essencials. Es pot elaborar a partir de residus com restes de poda, la fracció orgànica de residus municipals recollida selectivament (FORM), residus agroalimentaris, dejeccions ramaderes o fangs de depuradora.

Així mateix, els digestats provinents de la digestió anaeròbia de residus orgànics, en particular la fracció sòlida, també es poden transformar en compost. Un compost de qualitat ha de ser higienitzat, estable, sense impureses ni metalls pesants i amb un alt contingut en matèria orgànica estabilitzada. El procés de compostatge consta de dues fases principals:

- Descomposició aeròbia termòfila, on es transforma la matèria orgànica més fàcilment biodegradable per acció de microorganismes.
- La fase de maduració és el període durant el qual la matèria orgànica ja descomposta acaba de transformar-se en compost, un producte higienitzat, més estable i apte per a l'ús agronòmic o en restauració de sòls.

En la fase final es poden fer post tractaments com garbellat, eliminació d'impureses o addició de materials o substàncies complementaris. El compost pot comercialitzar-se com a producte fertilitzant segons el RD 506/2013 i el Reglament 2019/1009; si no compleix les prescripcions normatives, es pot gestionar com a residu aplicant-lo al sòl (via de gestió R1001 o R1002), d'acord amb la normativa vigent.

La quantitat de restes orgàniques susceptibles de ser compostades és enorme. Al voltant de 1,2 M de tones es composten anualment a Catalunya, incloent fangs EDAR, restes vegetals, FORM, i dejeccions ramaderes, entre d'altres, generant unes 300.000 tones de compost (ARC, 2023).

Digestat

El digestat és el material líquid-pastós obtingut de la digestió anaeròbia de matèria orgànica, procés que també genera biogàs (barreja de CH₄, CO₂ i altres gasos en menor proporció). Si el digestat compleix la normativa UE 2019/1009, pot comercialitzar-se; si no, es gestiona com residu aplicant-lo al sòl (via de gestió R1001 o R1002), d'acord amb la normativa vigent i es pot compostar. Es pot produir a partir d'un ampli ventall de residus orgànics, des de fangs d'EDAR, residus agroalimentaris, dejeccions ramaderes o FORM, entre d'altres. Per exemple, actualment a Catalunya es produeixen 230.000 t/any de digestat de FORM (Generalitat de Catalunya, 2025b) i es tracten mitjançant la tecnologia de la digestió anaeròbia unes 389.000 t/any de dejeccions ramaderes (Generalitat de Catalunya, 2024), fet que implica que es genera una quantitat de digestat similar a partir d'aquesta font.

Els digestats tenen elevat potencial bioestimulant i fertilitzant, però en relació amb el segrest de carboni convé distingir clarament entre fracció líquida i sòlida, ja que sovint aquestes dues fraccions es separen. La fracció líquida sol tenir un valor fertilitzant elevat, però no necessàriament un gran potencial de segrest de C.

Bioestabilitzat

El bioestabilitzat prové del tractament mecànic-biològic (TMB) de la matèria orgànica de la fracció resta (MOR) de residus municipals no separats selectivament. El tractament biològic s'efectua en condicions aeròbies i termòfiles i seria equivalent a la fase termòfila del procés de compostatge. No obstant, d'acord amb la Llei 7/2022 de residus i sòls contaminats, el bioestabilitzat és considerat un residu. Habitualment la seva qualitat com a esmena orgànica és molta baixa i es disposa en abocadors o bé ha de ser incinerat. La seva aplicació al sòl és molt limitada, no és permesa en sòls agrícoles, però sí es podria emprar en la restauració de sòls en l'àmbit d'activitats extractives, abocadors o restauració de talussos. En aquests contextos la seva aplicació requereix d'autorització específica de l'ARC i únicament és aconsellable quan el material ha assolit un nivell estabilitat suficient i és lliure d'impropis.

La capacitat de segrest de C del bioestabilitzat és més limitada que la d'altres esmenes, però el benefici ambiental resideix en les emissions evitades pel fet de sotmetre aquest residu a un tractament mecànic-biològic en lloc de destinar-lo directament a l'abocador. En alguns casos l'aplicació de bioestabilitzat pot provocar fam de nitrogen, especialment quan incorpora fibres cel·lulòsiques de difícil degradació, de manera que és molt important fer una bona caracterització abans d'aplicar-lo al sòl.

Fangs d'estacions depuradores d'aigües residuals (EDAR)

Els fangs d'EDAR urbanes provenen de la depuració d'aigües residuals i contenen alts percentatges de matèria orgànica, N i P. Per a què puguin ser aplicats al sòl cal que estiguin tractats segons el RD 1310/1990, amb reducció de fermentació i eliminació de problemes sanitaris, i que compleixin els paràmetres analítics mínims establerts per l'Ordre AAA/1072/2013. També poden ser utilitzats en projectes de restauració de sòls amb permisos específics, i són especialment indicats quan es volen assolir cobertes vegetals ràpides que protegeixin el sòl de l'erosió, o per estimular el creixement de la comunitat bacteriana (Taula 1), que pot ajudar en la descontaminació de sòls afectats per hidrocarburs. Actualment es produeixen unes 500.000 t/any de fangs d'EDAR a Catalunya, dels quals aproximadament la meitat es destinen a compostatge.

Biocarbó (biochar)

El biocarbó és el producte de la piròlisi de biomassa a 300–600°C en atmosfera pobre en oxigen. La piròlisi genera tres productes: sòlid (biocarbó), líquid (bio-oli) i gas (gas de síntesi, syngas). El biocarbó és un material orgànic molt estable que perdura al sòl a llarg termini, contribuint al segrest de C. La seva elevada capacitat d'intercanvi catiònic i la gran superfície porosa li permeten retenir nutrients i reduir-ne la lixiviació, millorant així la fertilitat del sòl. A més, pot augmentar el pH en sòls àcids i equilibrar esmenes menys estables, com fangs o fems, fent-lo especialment útil com a esmena orgànica de llarga durada. El seu rati C/N és extremadament elevat, i és recomanable combinar-lo amb fonts de N i altres nutrients per evitar possibles desequilibris i optimitzar-ne els seus beneficis tant per a la fertilitat com per al segrest de C.

El biocarbó és l'esmena menys utilitzada entre les descrites en aquest document, ja que actualment es produeix en petites quantitats, però té un gran potencial en relació a la seva capacitat d'emmagatzematge de C, que la converteix en un recurs clau en estratègies de mitigació del canvi climàtic i mercats de C (Taula 1).

Taula 1. Tipus d'esmenes orgàniques en base als seus efectes predominants sobre el sòl: (+, valoració qualitativa dels efectes positius sobre els paràmetres en qüestió; -, valoració negativa. *en alguns casos l'aplicació de bioestabilitzat pot provocar fam de nitrogen, especialment quan incorpora fibres cel·lulòsiques de difícil degradació). Font: Adaptat de Carabassa et al., 2024.

Esmena	Origen principal	Segrest C	Bioestimulació	Poder fertilitzant	Estructurant del sòl	Retenció d'aigua
Compost	Vegetal	+++	+	+	+++	++
	FORM	+++	++	++	+++	++
	Agroalimentaris	+++	++	++	+++	++
	Fangs EDAR	+++	++	++	+++	++
	Fems	+++	++	++	+++	++
Digestat	Residus orgànics	++	+++	++	+	+
Fangs EDAR	Urbà	++	+++	++	+++	+
Bioestabilitzat	RESTA	++	+	+(-)*	+	+
Fems	Boví	++	+	+	+++	+
Purins	Porcí	+	++	++	+	+
Gallinassa	Avícola	+	++	++	+	+
Restes vegetals	Vegetal	+++	++	+	+++	+++
Biocarbó	Vegetal	+++	+	(indirecte)	++	++

3. Inventaris de materials i paràmetres indicadors

3.1. Inventari de materials orgànics a Catalunya

Una de les tasques del treball en l'àmbit del GTCS és inventariar els materials orgànics a Catalunya. En aquest sentit, s'ha realitzat arran d'un arxiu Excel que va desenvolupar l'ARC a l'any 2020. En ell, hi havia registrats una sèrie de materials, productes, residus i subproductes biogènics susceptibles de ser aprofitats en agricultura després de la seva transformació o sense aquests processos. S'ha elaborat un inventari en format Excel ampliat (amb un increment del registre de materials orgànics) i un document lliurable addicional (no previst inicialment en el projecte) que descriu el procés de construcció d'aquest inventari pel que fa a la quantificació de la generació dels materials orgànics.

La metodologia per a l'elaboració de l'inventari s'ha definit col·legiadament entre la major part dels membres que formaven part del grup de treball del WP4 que podien assistir a les reunions, i que es va iniciar al maig de 2024; es van establir reunions mensuals entre els diferents participants. Les primeres reunions van consistir en la fixació de **criteris** inicials que limitaven l'abast de l'inventari i la metodologia. Es van establir fonts d'informació; entre d'altres, s'ha treballat una base de dades de l'ARC de manera discrecional (per a extreure només la informació rellevant per a la construcció de l'inventari). Amb el desenvolupament dels treballs, també es va veure la necessitat d'elaborar la Guia de quantificació esmentada per tal que les dades de l'inventari pel que fa a la seva quantificació es poguessin actualitzar de manera referenciada. A més a més, les trobades van servir per a llistar el seguit de camps (columnes de l'Excel de l'inventari) que es veia oportú d'afegir al llistat inicial; per exemple, es va veure necessària la inclusió de taxes de creixement (o decreixement) en la generació del material orgànic.

Després del treball realitzat, s'ha ampliat el llistat fins a **55 tipologies de materials orgànics agrupats (88 en total si es consideren desagrupats)** amb informació tècnica i quantitativa, s'han detallat millor alguns productes genèrics i s'han desglossat categories (com els residus de vinificació o les clofolles de diferents fruits secs) per millorar la descripció de la informació recollida (Taula 2).

A més de la quantificació, a l'inventari s'ha classificat cada material orgànic segons el **sector** on s'origina, el seu **estat** (fresc o transformat per digestió anaeròbia o compostatge), el **codi** LER o el codi IRTA associat, entre d'altres i, finalment, el seu nom (o descripció) simplificat. Aquesta classificació és una simplificació d'un sistema també de classificació de l'IRTA establert per a un altre projecte amb l'ARC. Finalment, s'ha incorporat informació relacionada amb la transformació / el tractament finalista i/o ús, on s'ha resumit si es duen a terme transformacions (compostatge, digestió, valorització) dels materials i els usos relacionats amb l'aplicació al sòl.

Taula 2. Classificació dels 88 materials orgànics, categoritzats per **origen i sector** i segons l'**estat del producte** (si és fresc o ja ha estat transformat mitjançant digestió anaeròbia, compost, piròlisi, etc.).

Origen	Sector	Estat	Material orgànic	
Sector agroramader	Ramader - altres	Fresc	Producció de llana	1
	Ramader - dejeccions	Fresc	Fems	2
			Purins	3
			Gallinassa	4
		Transformat	Compost de fems	5
	Restes vegetals	Fresc	Clofolles de fruits secs	6
			Clofolles d'avellana	6a
			Clofolles d'ametlla	6b
			Clofolles de nou	6c
			Clofolles de festuc	6d
			Palla	7
			Pèrdues alimentàries	8
			Porro	8a
			Enciam	8b

Origen	Sector	Estat	Material orgànic	
			Col	8c
			Poda d'arbres agrícoles	9
			Restes de collita horticultura	10
			Tomàquet	10a
			Coliflor	10b
			Carxofa	10c
			Restes de collita d'altres extensius	11
			Restes arrencada fruiters	12
		Transformat	Compost de residus vegetals	13
			Biochar (agrícola)	14
Indústria agroalimentària		Fresc	Closques d'ou	15
			Marro de cafè	16
			Residus d'escorxador	17
			Bagàs de cervesa	18
			Subproductes de la producció d'oli d'oliva	19
			Oliasses	19a
			Pinyolada	19b
			SANSA de dues fases	19c
			Subproductes de la vinificació	20
			Vinasses	20a
			Brisa humida	20b
			Brisa seca	20c
			Rapa de raim	20d
			Mares de vi	20e
			Materials orgànics generats a la indústria	21
			Residus de l'agricultura, horticultura, aquicultura, silvicultura, caça i pesca	21a
			Residus de la preparació i elaboració de carn, peix i altres aliments d'origen animal	21b
			Residus de la preparació i elaboració de fruites, hortalisses, cereals, olis comestibles, cacau, cafè, te i tabac; producció de conserves; producció de llevat i extracte de llevat, preparació i fermentació de melasses	21c
			Residus de la indústria de productes lactis	21d
			Residus de la indústria de fleca i pastisseria	21e
			Residus de la producció de begudes alcohòliques i no alcohòliques (excepte cafè, te i cacau)	21f
			Fangs agroindustrials	22
			Llots del rentatge, neteja, pelat, centrifugació i separació	22a
			Residus de l'agricultura, horticultura, aquicultura, silvicultura, caça i pesca	22a1
			Residus de la preparació i elaboració de carn, peix i altres aliments d'origen animal	22a2
			Residus de la preparació i elaboració de fruites, hortalisses, cereals, olis comestibles, cacau, cafè, te i tabac; producció de conserves; producció de llevat i extracte de llevat, preparació i fermentació de melasses	22a3

Origen	Sector	Estat	Material orgànic	
		Transformat	Llots del tractament in situ d'efluents	22b
			Residus de la preparació i elaboració de carn, peix i altres aliments d'origen animal	22b1
			Residus de la preparació i elaboració de fruites, hortalisses, cereals, olis comestibles, cacau, cafè, te i tabac; producció de conserves; producció de llevat i extracte de llevat, preparació i fermentació de melasses	22b2
			Residus de l'elaboració de sucre	22b3
			Residus de la indústria de productes lactis	22b4
			Residus de la indústria de fleca i pastisseria	22b5
			Residus de la producció de begudes alcohòliques i no alcohòliques (excepte cafè, te i cacau)	22b6
			Fangs de tractament de subproductes vitivinícoles	23
			Compost de fangs agroindustrials	24
			Digest(at) de residus orgànics	25
Sector forestal i indústria de la fusta	Sector forestal	Fresc	Aprofitament biomassa de coníferes	26
			Aprofitament biomassa de planifolis	27
			Potencial de biomassa de matollar	28
			Producció industrial d'escorça	29
			Potencial de biomassa de branques sense fulles ni escorça	30
			Potencial biomassa aèria total	31
			Poda d'arbres municipals	32
	Indústria de la fusta	Fresc	Serradures industrials	33
			Suro	34
			ESTELLA (subproducte)	38
			FINS (subproducte del tamisat de l'estella industrial)	39
			Fusta de taulons d'arbres	40
			Producció de llenya	41
			Producció de pèl·let	42
		Transformat	Biochar (forestal)	43
Municipal	Fresc		Bioresidus (form)	44
			Malbaratament alimentari	44a
			Gespa	45
			Llots de dragatge	46
	Transformat		Fangs d'edar	47
			Compost de biorresidus	48
			Compost de fangs d'edar	49
			Digest(at) de bioresidus	50
Altres	Fresc		Algues	51
			Fangs de paperera	52
Mixtes	Transformat		Compost de residus orgànics (variats)	53
			Digestat de residus orgànics (variats)	54
			Compost + biochar (variats)	55

3.2. Quantificació: obtenció de les dades

La recopilació de dades s'ha realitzat amb la cooperació de les diferents institucions que han participat en el treball. Les metodologies de recopilació de la informació han inclòs: a) dades oficials del DARPA; el contacte amb especialistes i productors del sector; b) la realització d'estimacions basades en coeficients de generació; c) documents precedents rellevants d) l'aportació d'informació de declaracions anuals de residus —en format anònim pel que fa a les empreses productores d'aquests residus— per part de l'ARC, mentre que l'IRTA n'ha analitzat les dades per identificar els materials orgànics compatibles amb l'inventari.

Les estimacions de generació de materials orgànics s'apliquen quan les dades reals no són prou representatives o no es poden obtenir. Aquesta situació es dona, especialment, quan els materials són valoritzats per les indústries i no es declaren com a residus per que ja s'estan valoritzant d'una forma o altra (com ara les clofolles de fruits secs), o quan apareixen barrejats amb altres fluxos (com ara la FORM).

Per calcular les estimacions, s'empren coeficients de generació que indiquen la quantitat de subproducte per unitat de producció, per habitant o per la unitat corresponent (com ara la sansa per oli, la llana per ovella o les clofolles pels fruits secs). Les fonts per obtenir aquests coeficients procedeixen d'organismes i empreses —com el DARP o l'ARC— i de documentació tècnica i científica, incloent estudis, manuals i informes especialitzats.

La informació relativa a la quantificació de la generació de materials orgànics (quasi sempre residus de naturalesa orgànica) ha quedat recollida detalladament a l'annex “Guia per a la quantificació de materials orgànics a Catalunya” del “Lliurable 4.2: Inventari de materials orgànics de qualitat, basats en residus i productes d'origen orgànic, amb capacitat d'aportar i segrestar carboni al sòl i de mitigació de canvi climàtic.”

4. Presa de mostres i mètodes analítics

4.1 Criteris tècnics per a la caracterització dels materials orgànics, lignocel·lulòsics i del biochar

Per caracteritzar els materials orgànics, lignocel·lulòsics i el biochar, s'ha elaborat una base de dades. Els criteris utilitzats per a la caracterització dels materials estudiats s'han establert en diferents etapes.

En primer lloc, s'han identificat els mètodes analítics per a cadascun dels paràmetres seleccionats. En el cas dels materials orgànics, aquests s'han consensuat amb els diferents centres de recerca que han participat en el WP4. De manera general, s'han adoptat els mètodes desenvolupats per l'Escola d'Agricultura de Barcelona (ESAB-UPC; Huerta i col., 2010). Seguidament, s'ha seleccionat un mètode de presa de mostra específic per a cada paràmetre analític o, alternativament, un mètode general per a sòlids i/o líquids. Finalment, s'ha recopilat bibliografia especialitzada per a cada paràmetre i per a cadascun dels materials, amb l'objectiu de reforçar-ne l'elecció metodològica i permetre la consulta de la normativa de referència corresponent.

La base de dades, per a cada un dels materials i paràmetres, conté la següent informació: el número d'ordre (N), el nom del paràmetre, el mètode analític utilitzat, l'àmbit/matriu d'aplicació,

les referències de les normatives i l'enllaç per a consultar-la. A la Taula 3, es mostra el registre del pH per als materials orgànics. En aquest cas concret, el registre descriu que es determina mitjançant una dilució 1:5 en els sòls, fangs tractats, residus biològics, esmenes i substrats de cultiu, seguint les normes UNE-EN ISO 10390:2022 i UNE-EN 13037:2012.

Taula 3. Registre del pH que contempla el mètode analític per a determinar-lo en els materials orgànics.

N	Paràmetre	Mètode analític	Àmbit d'aplicació	Referències	Enllaços
1	pH	Dilució 1:5	Fangs, sòls i residus biològics tractats. Esmenes del sòl i substrats de cultiu	UNE-EN ISO 10390:2022. UNE-EN 13037:2012	https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0068663

Per al procediment de presa de mostra, s'ha considerat l'estat físic del material (sòlid o líquid), assumint que pels materials lignocel·lulòsics i el biochar, aquest estat sempre és sòlid. En primer lloc, es proposa seguir el protocol indicat a la normativa associada a cada mètode analític, tot i que en molts casos no s'hi hagi pogut accedir, especialment pel que fa als materials orgànics. Com a alternativa i pels materials orgànics, es proposa consultar els manuals *Sistemes de mostreig i mètodes analítics per a residus orgànics destinats a sòls agrícoles* i *Procés de compostatge: caracterització de mostres*, que inclouen la preparació i presa de mostres, així com la descripció del protocol a seguir per un gran nombre dels paràmetres analítics seleccionats. Quan aquestes vies no són viables, es recomanen les següents normatives generals de presa de mostres: UNE-EN 12579:2024 per a materials sòlids d'origen orgànic (esmenes i substrats de cultiu) i la UNE-EN ISO 5667-1:2022 per a mostres líquides (aigua).

A la Taula 4 es presenta el registre de presa de mostra pel paràmetre del pH de la base de dades dels materials orgànics.

Taula 4. Registre del pH que contempla l'estat de la mostra, la normativa de la presa de mostra, els comentaris i les referències per a determinar-lo, en els materials orgànics.

Paràmetre	Estat de la mostra	Normatives	Comentaris	Referències mostreig sòlid	Referències mostreig líquid	Referències preparació mostra	Referències preparació mostra
pH	Sòlida (1) Líquida (2)	(1)UNE-EN 12579:2024 (2)UNE-EN ISO 5667-1:2022	En mostres sòlides el que es mesura és una suspensió	https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0073707	https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0068663	Sistemes de mostreig i mètodes analítics per a residus orgànics destinats a sòls agrícoles	Procés de compostatge: caracterització de mostres

A continuació, a mode d'exemple, es presenta el registre del paràmetre del pH pel biochar. Aquest segueix la mateixa estructura i ordre que el dels materials lignocel·lulòsics. A la Taula 5 s'indica el número d'ordre (N), el paràmetre a determinar, el tipus de mostra, la normativa per a prendre-la, el mètode analític per a fer l'anàlisi, la normativa del mètode, l'àmbit d'aplicació de la normativa, les referències i els enllaços per a consultar informació addicional.

Taula 5. Registre del pH que contempla la presa de mostra i el mètode analític per a determinar-lo en el biochar.

N	Paràmetre	Tipus de Mostra	Normativa	Mètode analític	Normativa del mètode	Àmbit d'aplicació	Referències	Enllaços
1	pH	Sòlida	ISO 13909-4, DIN 51701-3	Dilució 1:5	DIN EN ISO 10390:2022-8	Sòls, residus biològics tractats i fangs	European Biochar Certificate (EBC) 2012-2024	https://www.european-biochar.org/en/ct/8-Analytical-Methods

En el procés d'identificació dels paràmetres i de la selecció dels mètodes analítics més adequats, s'han considerat tant els procediments que permeten avaluar la capacitat dels materials per contribuir al segrest de carboni al sòl com aquells procediments que en determinen altres propietats, com ara la conductivitat elèctrica, el carboni orgànic total, el nitrogen total, etc. També s'ha valorat la instrumentació necessària per cada cas, procurant incloure tant mètodes que necessiten equipament especialitzat i personal tècnic qualificat com aquells procediments més accessibles que poden ser aplicats a laboratoris amb més limitació de recursos. Pels materials orgànics, molts dels mètodes seleccionats estan contemplats, específicament, per ser aplicats en matrius concretes, com poden ser l'aigua, els fertilitzants, el sòl, el compost o bé productes alimentaris, entre altres.

4.2 Protocols analítics establerts per a la caracterització dels materials

Un cop recopilada i estructurada la informació disponible sobre els mètodes analítics aplicables als materials estudiats, s'han establert els paràmetres i procediments necessaris per a la seva caracterització. En el cas dels materials orgànics, s'han identificat 43 paràmetres i 75 mètodes analítics. Per als materials lignocel·lulòsics, els paràmetres s'han definit segons dues categories: els biocombustibles sòlids, amb 18 paràmetres seleccionats, i els combustibles sòlids recuperats, amb 12 paràmetres, tots ells específics per aquests tipus de materials. Finalment, per al biochar, s'han determinat 34 paràmetres que en permeten la caracterització conforme a les normatives tècniques vigents consultades.

Tot seguit es presenta la classificació i els paràmetres que s'han establert per a tots els materials estudiats. A la Taula 6 es mostren els paràmetres que corresponen als materials orgànics que són els que conformen el grup més nombrós.

Cal destacar que per a la determinació de molts dels paràmetres seleccionats, existeixen diferents mètodes analítics descrits. Per tal de proporcionar els més adequats, s'han considerat els següents criteris: en primer lloc, s'ha tingut en compte el tipus de mostra (líquida o sòlida) i la matriu on es troba (sòl, aigua, aliments, biomassa, fertilitzants, combustibles, biochar, etc.). En segon lloc, s'ha prioritzat l'ús de mètodes estandarditzats i/o reconeguts internacionalment així com mètodes descrits per Huerta i col., 2010. Finalment, s'ha valorat la disponibilitat d'equipament i de recursos dels laboratoris acreditats, així com el temps, fiabilitat i complexitat de l'anàlisi.

Taula 6. Classificació dels paràmetres, per als materials orgànics, segons la seva categoria.

Categoria	Paràmetres
1. Paràmetres fisicoquímics	pH; Conductivitat elèctrica (CE); Matèria seca / Sòlids totals (ST); Cendres totals; Contingut d'impureses o impropis
2. Paràmetres de nitrogen i carboni	Amoni; Nitrit/Nitrat; Nitrogen total; Carboni orgànic total (COT); Carboni orgànic oxidable; Carboni soluble oxidable; Carboni làbil (C actiu); Matèria orgànica làbil; Carboni recalcitrant; Matèria orgànica resistent; Matèria orgànica total per calcinació
3. Macronutrients	Calci total (Ca); Magnesi total (Mg); Sodi total (Na); Fòsfor (P) total i biodisponible; Potassi (K) total i biodisponible
4. Micronutrients	Ferro total (Fe)
5. Metalls pesants	Arsènic (As); Cadmi (Cd); Coure total (Cu); Crom (Cr total i Cr VI ⁺); Mercuri (Hg); Níquel (Ni); Plom (Pb); Zinc total (Zn)
6. Matèria orgànica i fraccions	Àcids húmics i fúlvics; Fibra crua (cel·lulosa, hemicel·lulosa, lignina)
7. Paràmetres biològics	Test de germinació de llavors; Autoescalfament; Respirometria; Test d'estabilitat; Test de creixement
8. Contaminants orgànics	Contaminants PAHs; Contaminants POPs; Contaminants PPCPs; Contingut en antibiòtics
9. Microbiologia: patògens	<i>Escherichia coli</i> ; <i>Salmonella</i> ; Diversitat alfa (microbioma); Coliformes totals i fecals

La caracterització dels materials estudiats s'ha definit mitjançant una combinació d'ús de mètodes tradicionals i/o de tècniques instrumentals més avançades. En el cas dels materials orgànics, els mètodes com el nitrogen Kjeldahl i els del carboni Dumas i Walkley-Black, es complementen amb la cromatografia de gasos amb espectrometria de masses (GC-MS) o l'ICP-OES.

Pel que fa als materials lignocel·lulòsics, a més de les tècniques instrumentals comentades, també s'han inclòs mètodes específics com el de Van Soest per a la determinació de fibres i l'espectrometria de fluorescència de raigs X (XRF) per poder-ne avaluar les característiques estructurals. En el cas del biochar, es combina el tamisat amb tècniques de caracterització estructural com la microscòpia electrònica (SEM).

4.3 Verificació i limitacions per a la caracterització dels materials

En aquest apartat es presenta, d'una banda, la verificació dels paràmetres vinculats a la caracterització fisicoquímica i funcional dels materials orgànics, lignocel·lulòsics i del biochar, a partir de les conclusions derivades de cadascuna de les tasques desenvolupades; i, d'altra banda, l'anàlisi de les limitacions identificades durant la seva execució.

La base de dades creada organitza la informació necessària per a caracteritzar-los, incloent-hi: el número de paràmetre, el tipus de mostra, normativa de mostreig, mètode analític, normativa associada, àmbit d'aplicació i referències complementàries. A partir d'aquesta base de dades, s'han definit 43 paràmetres i 75 mètodes per als materials orgànics; 18 paràmetres per als biocombustibles sòlids i 12 per als combustibles sòlids recuperats, fent un total de 30 mètodes per als materials lignocel·lulòsics i, finalment, 34 paràmetres per al biochar, determinats segons l'European Biochar Certificate i l'International Biochar Initiative.

Per a l'elecció dels mètodes analítics s'han tingut en compte diferents factors, com el tipus de mostra, la matriu on es troba (en el cas dels materials orgànics), la disponibilitat de mètodes

estandarditzats i els recursos dels laboratoris acreditats. En la majoria de casos, la metodologia utilitzada ha estat la de Huerta i al., 2010 i, també de normatives existents per a altres materials per suplir la manca de procediments específics per als materials seleccionats. Cal destacar també que moltes de les dades que s'ha utilitzat per la caracterització provenien d'estudis ja existents. La caracterització combina tant procediments clàssics com tècniques instrumentals, com ara ICP-OES per a metalls pesants i un analitzador elemental per a C, H i N. Addicionalment, s'ha definit un procediment de presa de mostres específic per a cada tipus de material, tenint en compte les normatives disponibles i les possibles restriccions d'accés a determinats mètodes.

Finalment, per a futurs estudis, s'han identificat 14 formes de carboni presents en els materials estudiats i al sòl, descrivint-ne la seva abreviació, les seves característiques químic-físiques i els procediments necessaris per a la seva determinació i quantificació.

Entre les principals limitacions identificades, destaquen les següents:

- 1) la manca de consens dins de la comunitat científica sobre els criteris que defineixen les diferents formes de carboni presents en els materials estudiats, fet que dificulta la selecció de mètodes analítics per a la seva determinació,
- 2) la necessitat d'homogeneïtzar els procediments de presa de mostra dels diferents materials orgànics, tenint en compte l'estat físic de la mostra, sòlid o líquid i
- 3) la conveniència d'ampliar la base de dades de materials i la seva caracterització analítica, ja sigui amb materials innovadors dels quals encara no hi ha informació analítica, com completant els paràmetres que falten en materials ja coneguts.

5. Caracterització dels materials orgànics

Aquesta secció resumeix la tasca de recollida i harmonització de la informació analítica de materials orgànics procedents de diferents fonts (aportades directament per les institucions participants, per projectes de recerca, i provinents guies tècniques) amb l'objectiu de donar suport a la seva generació, caracterització i valorització, particularment en relació amb l'aplicació al sòl i el potencial de segrest de carboni. Amb aquest propòsit, es fa una síntesi de la tipologia de materials recollits, la selecció de paràmetres analítics i cobertura de les dades, així com de les tendències més rellevants derivades dels indicadors directament relacionats amb el potencial de segrest de carboni.

5.1. Tipologia dels materials orgànics caracteritzats

La informació recollida s'estructura en una base de dades que inclou 146 registres en total, repartits en 86 registres individuals (valors associats a una mostra específica) i 60 registres agregats (valors mitjans, desviació estàndard d'un nombre determinat de mostres individuals). Considerant el nombre de mostres associat als registres agregats, el recull representa 3.293 mostres (Taula 7). Les tipologies de materials orgànics majoritaris corresponen a dejeccions ramaderes i fraccions derivades, i a composts i materials orgànics estabilitzats. També es recullen fluxos urbans (fangs i FORM), digestats i fraccions, restes vegetals/biomassa i biochar, cobrint un gradient de processament que va des de materials frescos fins a materials estabilitzats o carbonitzats.

Taula 7. Distribució per categories genèriques dels materials orgànics recollits, distingint entre registres individuals (valors analítics corresponents a una única mostra) i registres agregats (mitjana aritmètica i desviació estàndard d'un conjunt de mostres). El camp "Mostres totals" expressa el nombre total de mostres reals representades.

Categoria genèrica	Registres individuals	Registres agregats	Registres totals	Mostres totals
Dejeccions ramaderes i fraccions derivades	12	20	32	2.288
Composts i materials bioestabilitzats	18	9	27	676
Fangs i residus urbans/mixtos	3	3	6	175
Restes vegetals i biomassa	23	16	39	67
Digestats i fraccions derivades	4	2	6	60
Subproductes i residus agroindustrials/agroalimentaris	13	7	20	33
Biochar i materials carbonitzats	11	0	11	11
Altres	2	3	5	13
Total	86	60	146	3.293

5.2. Paràmetres analítics

La base de dades recull un conjunt ampli de paràmetres analítics primaris, 55 en total, per caracteritzar materials orgànics des d'una perspectiva agronòmica i ambiental, agrupats operativament en blocs com paràmetres generals (p. ex. matèria seca, matèria orgànica, pH, conductivitat), nutrients i macroatoms (N, P, K i formes específiques quan estan disponibles), i metalls/elements traça (clau per criteris de qualitat i risc), amb altres blocs específics segons tipologia i font (p. ex. impureses, microplàstics, indicadors biològics i paràmetres addicionals d'estabilitat).

La cobertura analítica és heterogènia entre tipologies i fonts. Alguns registres disposen de paquets analítics relativament complets (sobretot en paràmetres generals i alguns nutrients/metalls), mentre que d'altres només inclouen un subconjunt reduït de variables, fet que limita comparacions quantitatives directes i obliga a interpretar moltes anàlisis en clau de tendència. Aquesta situació es fa evident en els indicadors directament vinculats al potencial de segrest de carboni, i posa de manifest la necessitat de definir un paquet analític mínim harmonitzat, normalitzar unitats i bases d'expressió, i reforçar metadades i traçabilitat metodològica per incrementar la robustesa i comparabilitat de la base de dades en fases futures.

Dins d'aquest marc, a l'hora de fer una anàlisi comparativa preliminar entre materials, s'han prioritzat la MOT (matèria orgànica total) i la MOR (matèria orgànica resistent) (Huerta et al, 2020) com a indicadors del potencial de segrest del carboni al sòl perquè són, alhora, directament interpretables en termes d'entrada i persistència del carboni. La MOT aproxima la quantitat de matèria orgànica potencialment aplicable al sòl per unitat de material, mentre que la MOR aproxima la fracció de la matèria orgànica més resistent o recalcitrant amb més probabilitat de contribuir a estocs de carboni a mig i llarg termini. A més, en el conjunt de dades disponibles, MOT i MOR són els indicadors de quantitat i estabilitat del carboni en termes de matèria seca, respectivament, amb més cobertura per permetre una comparació entre tipologies (amb valors simultanis en 12/86 registres individuals, 14,0%, i 28/60 registres agregats, 46,7%), fent-los especialment adequats com a eix analític inicial.

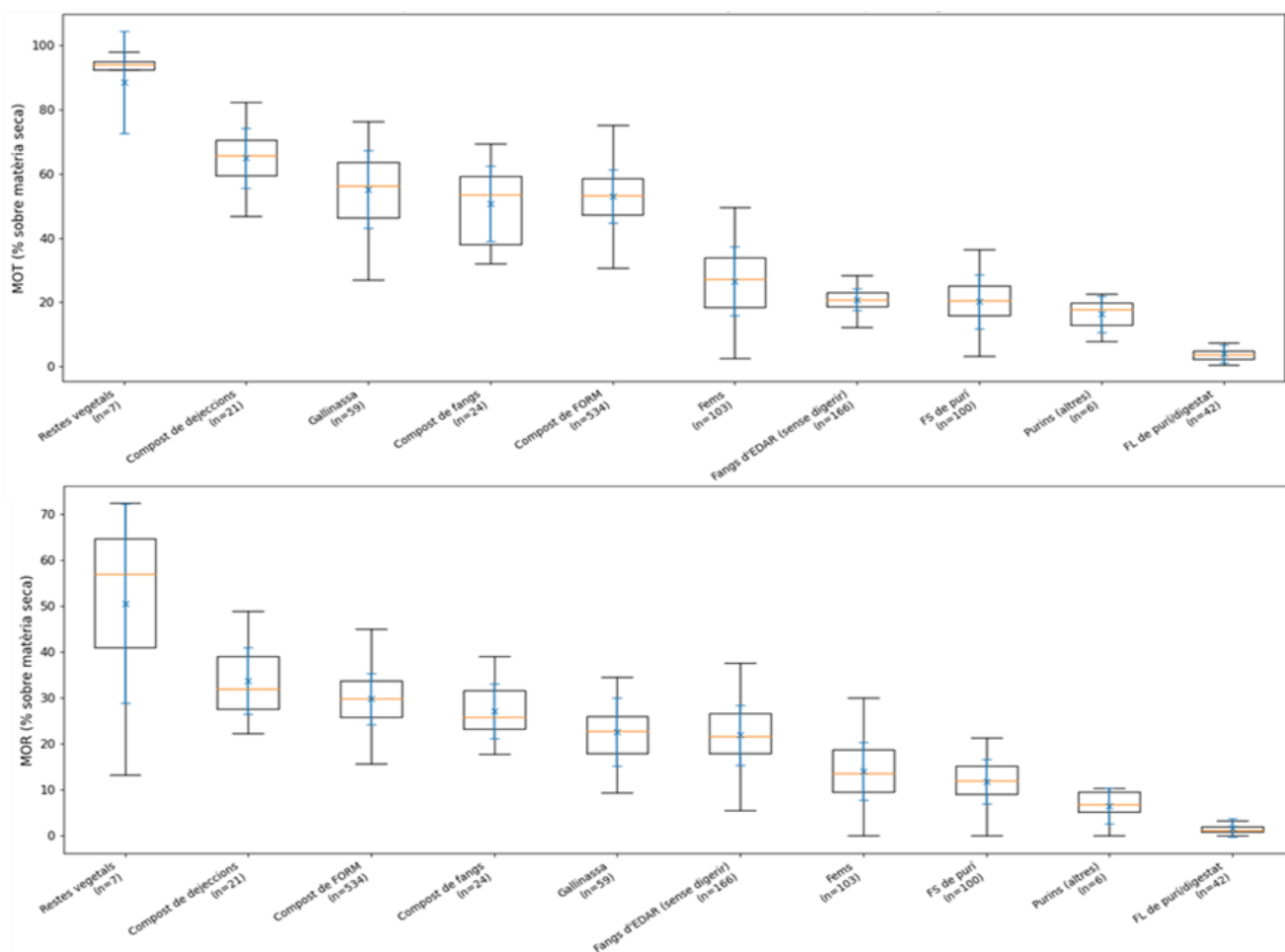
Alhora d'expressar aquests resultats en termes d'equivalents de carboni, de manera genèrica, s'assumeix sovint que la matèria orgànica (MO) conté aproximadament 58% de carboni (C) en massa. Això és la base del factor de Van Bemmelen, que expressa la relació:

$$MO \approx 1,724 \cdot C \text{ orgànic}$$

5.3. Tendències en el potencial de segrest de carboni

Les distribucions per categories mostren un gradient coherent amb el grau de processament. Les restes vegetals (closques, oliasses, sansa, bagàs i biomassa lignocel·lulòsica) tendeixen a presentar valors elevats de MOT i MOR, indicant un potencial rellevant d'aportació de carboni i una fracció persistent (Figura 5.1). En canvi, els materials líquids (fraccions líquides de purins i digestat) presenten valors molt baixos, coherents amb una aportació orgànica limitada i principalment làbil. D'altra banda, el compost (FORM, fangs i dejeccions) mostren valors intermedis de MOT però amb MOR relativament consistent, reflectint l'efecte d'estabilització associat al processament. Les dejeccions i derivats (fems, gallinasses, fraccions sòlides) poden aportar quantitats rellevants de carboni, però amb variabilitat condicionada per origen, mescles, maneig i separació de fases.

Figura 5.1. Distribució en forma de boxplot dels valors de matèria orgànica total (MOT; gràfica superior) i matèria orgànica resistent (MOR; gràfica inferior) per tipologies generals de materials orgànics. Per integrar conjuntament registres individuals i registres agregats, cada registre agregat s'ha descompost sintèticament en un conjunt de valors equivalent al nombre de mostres de l'agregació, preservant la mitjana i la desviació estàndard originals. Posteriorment, aquests valors sintètics s'han combinat amb els registres individuals i s'han recalculat els estadístics descriptius per a cada categoria. Les distribucions es corresponen a un nombre de mostres total n (individuals + agregades), a partir del qual es representa la mediana (línia taronja), la mitjana aritmètica ($\bar{x}$), el rang interquartílic (calaix), la desviació estàndard (línies de dispersió blaves), i el rang de valors (línies de dispersió negres). Les categories s'han ordenat de major a menor segons la mediana del paràmetre representat.



Tot i que la matèria orgànica total (MOT) i, especialment, la matèria orgànica resistent (MOR) són indicadors útils per fer una primera aproximació comparativa al potencial dels materials orgànics per contribuir al segrest de carboni al sòl, presenten diverses limitacions. La MOR pot aproximar la fracció més recalcitrant de la MOT, però no equival necessàriament al carboni que quedarà efectivament estabilitzat al sòl a mitjà o llarg termini. El segrest real de carboni depèn també de factors externs al material, com les característiques del sòl receptor, el clima, el maneig agronòmic, la dosi i freqüència d'aplicació, la relació C/N i l'activitat microbiana. A més, la variabilitat de la presa de mostra, dels mètodes analítics, les unitats d'expressió i la disponibilitat desigual de dades entre tipologies limiten la comparabilitat directa entre materials. Per tant, els resultats de la Figura 5.1 s'han d'interpretar com a indicadors orientatius del potencial d'aportació i persistència del carboni, però no com una mesura directa del segrest efectiu de carboni al sòl.

6. Conclusions

Les principals conclusions d'aquest paquet de treball es presenten a continuació:

Disponibilitat i diversitat de materials

- Catalunya disposa d'una àmplia varietat de materials orgànics amb potencial per fomentar el segrest de carboni al sòl. Concretament, s'han identificat 55 tipologies i 88 materials diferenciats en l'inventari desenvolupat en aquest projecte.
- Aquesta heterogeneïtat explica els efectes contrastats que els materials poden tenir sobre el sòl: s'observen grans diferències en matèria orgànica total (MOT), estabilitat, recalcitrància i contingut en nutrients, que condicionen la seva aplicabilitat.
- Considerant aquesta diversitat de materials i els efectes particulars de cadascun, és imprescindible avaluar-ne l'aptitud i la idoneïtat en funció de l'ús previst.
- Els materials es presenten en formats diversos: líquids, sòlids i pastosos, fet que condiciona la seva gestió i aplicació.

Potencial i sectors estratègics

- S'ha quantificat la generació de materials orgànics a Catalunya l'any 2023. La diversitat d'orígens, gestions i barreja de materials ha dificultat l'obtenció de les dades. Davant aquesta situació, en alguns casos s'han efectuat estimacions. La metodologia no ha estat homogènia entre els diferents materials orgànics, però s'ha descrit en un document per tal que la quantificació es pugui tornar a realitzar en un futur.
- Les dades actuals indiquen que la major part dels materials orgànics generats provenen de les dejeccions ramaderes (purins i fems), tal com també s'ha descrit en d'altres estudis (DARPA, 2025). El sector forestal també genera un volum important de materials orgànics potencialment aplicables en sòls per afavorir el segrest de C, atès el seu elevat contingut de carboni orgànic recalcitrant. Els materials d'origen municipal i agroalimentari inclouen fraccions produïdes en grans quantitats com la FORM i els fangs d'EDAR.
- Els materials amb major capacitat de segrest de carboni, segons el contingut de carboni orgànic i la seva recalcitrància, inclouen el biochar i altres fraccions específiques de carboni orgànic estabilitzat, com les humines i els àcids húmics, o els compostos lignocel·lulòsics recalcitrants.

En síntesi, la quantificació efectuada indica que alguns sectors concentren la major part del potencial d'aportació i segrest de carboni:

- Sector ramader: pot generar prop de 17 milions de tones anuals de dejeccions, incloent 11 Mm³ de purins. És, amb diferència, la font més abundant de materials orgànics. D'aquest pes, solament estan sotmeses a digestió anaeròbica 389.000 tones anuals de dejeccions ramaderes.
- Sector forestal: aporta un volum molt significatiu de biomassa lignocel·lulòsica (branques, estella, serradura), corresponent a una generació mínima de 1.032.618 tones anuals de materials forestals potencialment valoritzables (incloent biomassa de coníferes i planifolis, escorça i poda municipal), reafirmant el seu paper com a font clau de carboni orgànic recalcitrant i d'alt interès per a estratègies de segrest de carboni al sòl.
- Sector municipal i urbà:
 - 1,2 milions de tones de residus orgànics tractats anualment en plantes de compostatge, que generen 300.000 t/any de compost
 - Digestió anaeròbica de 230.000 t/any de FORM.
 - 500.000 t/any de fangs d'EDAR, amb la meitat destinats a compostatge.

Caracterització analítica i criteris tècnics

- El grup de treball del WP4 ha recopilat un marc analític robust i ampli: s'han definit 43 paràmetres i 75 mètodes analítics per caracteritzar els materials orgànics. Per als materials lignocel·lulòsics, s'han definit 30 mètodes addicionals, i per al biochar, 34 paràmetres.
- Una primera aproximació basada en la determinació de la matèria orgànica total (MOT) i resistent (MOR), indica que les restes vegetals destaquen com la tipologia amb més potencial de segrest de carboni. Tanmateix, és un grup amb gran variabilitat, coherent amb la seva heterogeneïtat. En un rang intermedi apareix el compost, reflectint l'efecte d'estabilització biològica. Les dejeccions sòlides sense estabilitzar se situen generalment en valors intermedis i, finalment, els materials pastosos i líquids (purins, digestat, i les seves fraccions líquides) presenten els nivells de MOT i MOR més baixos.
- Existeix una elevada heterogeneïtat en les dades disponibles i persistents buits d'informació que requereixen un treball addicional per tal de disposar d'una caracterització completa i fiable dels materials estudiats. Es recomana definir un catàleg d'analítiques específic, adaptat al tipus de material i al seu ús potencial, tot i que ja existeixen algunes recomanacions específiques per alguns sectors (per ex. Manual d'aplicació d'esmenes orgàniques en restauració de sòls).
- A nivell de caracterització analítica dels materials orgànics destinats a l'aplicació al sòl per afavorir el segrest de carboni, és fonamental considerar, a més de la MOT i la MOR, els paràmetres següents: carboni fix; carboni recalcitrant; carboni làbil; carboni soluble oxidable; carboni orgànic fàcilment oxidable; carboni orgànic total (COT); carbonats; àcids húmics i fúlvics; test d'estabilitat; test de maduresa; fibra crua (cel·lulosa, hemicel·lulosa, lignina).

Gestió, aplicació i processos

- Cal considerar els processos de conversió i tractament necessaris per transformar els materials en formes més recalcitrants, més fàcils d'aplicar al sòl i que n'optimitzin el transport.
- Cal promoure que l'aplicació al sòl es faci propera als llocs de generació dels materials i tenir en compte la seva Anàlisi de Cicle de Vida (ACV) per minimitzar impactes ambientals.
- El maneig dels materials orgànics és un factor clau que influeix en la seva heterogeneïtat i en el resultat final, tant en la fase inicial com en l'aplicació al sòl.

Inventaris i base de dades

- Els inventaris elaborats constitueixen la base per crear una base de dades global de Catalunya, que servirà com a punt de partida per a futures actualitzacions.

Estratègia, continuïtat i col·laboració

- Donades les conclusions anteriors, cal fer èmfasi en la necessitat de donar continuïtat al projecte per tal d'omplir els buits identificats durant aquests dos anys.
- Cal completar les dades, establir criteris i definir una estratègia per maximitzar l'ús dels materials i definir el seu potencial d'aplicació al sòl, tenint en compte possibles conflictes/competències amb altres usos (p. ex. demanda de carboni per a plantes de digestió anaeròbia).
- Cal destacar el valor de la col·laboració entre institucions, que ha estat un element clau en el desenvolupament del treball i que caldria preservar en un futur.

7. Referències

- ARC, 2023. Situació del compost a Catalunya: matèries primeres, producció i comercialització. https://residus.gencat.cat/web/.content/home/agencia/publicacions/jornades/2023_05_12_guia_comp_ostatge/ponencia_01.pdf
- Cáceres, R., Cunill, C., Marfà, O. 2015. Composts que es produeixen a Catalunya: caracterització i viabilitat del seu ús com a substrat. Quaderns Agraris del ICEA. 39:7-34. 00000020.pdf (iec.cat). Data de consulta: 9 de juny de 2022.
- Cáceres, R; Viana, G., Puerta, A. 2021. Caracterización de materiales estructurantes y fracción sólida de purín de porcino para su compostaje. Informe-deliverable Projecte LIFE AGRICLOSE.
- Caceres, R. i Parera, J. 2022. Guia per al compostatge en granja de dejeccions ramaderes. Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural (DACC), Barcelona, 108 pàgines.
- Carabassa, V., Domene, X., Alcañiz, J.M., 2020a. Soil restoration using compost-like-outputs and digestates from non-source-separated urban waste as organic amendments: Limitations and opportunities. J Environ Manage 255, 109909. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109909>
- Carabassa, V., Domene, X., Díaz, E., Alcañiz, J.M., 2020b. Mid-term effects on ecosystem services of quarry restoration with Technosols under Mediterranean conditions: 10-year impacts on soil organic carbon and vegetation development. Restor Ecol 28, 960–970. <https://doi.org/10.1111/rec.13072>
- Carabassa, V., Ortiz, O., Alcañiz, J.M., 2018. Sewage sludge as an organic amendment for quarry restoration: Effects on soil and vegetation. Land Degrad Dev 29, 2568–2574. <https://doi.org/10.1002/ldr.3071>
- Carabassa, V.; Pous, M, González, R.; Domene, X.; Vidal, A.; Raya, I.; Batlló, G.; Alcañiz, JM. (2024) Manual d'aplicació d'esmenes orgàniques en rehabilitació de sòls. Agència de Residus de Catalunya. https://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/tipus_de_residu/residus_organics/restauracio_sols/manual_apli_desmenes_org_rehabilitacio_sols.pdf
- DARPA, 2025. II Pla d'acció 2025 de l'Estratègia de la Bioeconomia de Catalunya 2030. 64 pp.
- Generalitat de Catalunya, 2025a. Resultats de la gestió dels residus municipals a Catalunya 2024. <https://estadistiques.arc.cat/ARC/estadistiques/Geti%C3%B3%20de%20residus%20municipals.%20Any%202024.pdf>
- Generalitat de Catalunya, 2025b. Inventari de materials orgànics de qualitat, basats en residus i productes d'origen orgànic, amb gran capacitat d'aportar i segrestar carboni al sòl i de mitigació de canvi climàtic. E_4.2_informe_inventari.docx
- Generalitat de Catalunya, 2024. Estratègia Catalana del Biogàs i Pla d'Acció 2024-2030. Gener de 2024 https://icaen.gencat.cat/web/.content/30_Plans_programes/40_Estrategia-Catalana-biogas-2030/Estrategia-Catalana-Biogas-2030_AdG.pdf
- Huerta, O., López, M., Soliva, M. 2010. Procés de compostatge: caracterització de les mostres. Diputació de Barcelona. ISBN: 978-84-9803-451-6
- Ibañez, M., Raya, I., Giro, F., León, N., Pous, M., Cáceres, R., Solé, P., Prenafeta, F., Domingo, F., Quer, H., Puy, N., Maris, S., Cuadrench, A., Ortiz, C., Parera, J., Martínez, M., Carabassa, V. Soil Carbon Sequestration through Nutrient Inputs in Croplands: A Global Meta-Analysis of Organic, Mineral, and Combined Fertilization Strategies. Biology and Fertility of Soils, submitted.



GRUP DE TREBALL
**CARBONI
AL SÒL**



Generalitat
de Catalunya

tot hom El Govern de