



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

INFORME FINAL

Abril 2016

Anàlisi de la incidència dels impropis de la FORM sobre la qualitat del compost de les plantes de compostatge de Catalunya



Aquest informe és un encàrrec efectuat per l'**Agència de Residus de Catalunya**.

Autors:

ENT Environment and Management

Luís Miguel Campos Rodrigues (ENT)

Dr. Ignasi Puig Ventosa (ENT) (Coord.)

Dept. Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia, Escola Superior d'Agricultura de Barcelona (ESAB), Universitat Politècnica de Catalunya

Grup de Recerca ASQUAS

Dra. Marga López (ESAB)

Dr. Xavier Martínez (ESAB)

info@ent.cat

www.ent.cat

Empresa amb la certificació ISO 9001 i ISO 14001



ENT environment & management

És una marca registrada de:

Serveis de Suport a la Gestió, S.L.

CIF: B62795372

C/ Sant Joan, 39, primer pis

08800 Vilanova i la Geltrú



@ENTmediambient



ENTmediambient



ENT Environment & Management



Grup de Recerca ASQUAS

Universitat Politècnica de Catalunya

Campus del Baix Llobregat

c/ Esteve Terradas 8 Ed. D4

08860 Castelldefels

Índex

ÍNDEX	3
TAULES	4
FIGURES	5
RESUM	6
1. Introducció	10
2. Metodologia	12
2.1. Base de dades original i transformació de dades	12
2.2. Selecció de variables dependents i independents.....	13
2.3. Anàlisi univariant i bivariant.....	14
2.4. Anàlisi de regressió.....	15
2.5. Desenvolupament d'escenaris i projeccions de qualitat del compost...16	
3. Anàlisi univariant	17
4. Anàlisi bivariant	27
4.1. Matriu de correlació.....	28
4.2. Relacions causals entre dues variables	31
5. Models de regressió	65
5.1. Metalls pesants	66
5.2. Conductivitat elèctrica.....	74
5.3. Test d'autoescalfament (temperatura màxima)	76
6. Determinació d'escenaris i projeccions de qualitat	79
6.1. Relació entre la variació d'impropis totals i el Zinc	79
6.2. Relació entre la variació d'impropis totals i el coure.....	80
6.3. Relació entre la variació d'impropis totals i el Plom.....	81
6.4. Relació entre l'increment d'impropis especials i la conductivitat elèctrica 82	
6.5. Relació entre l'increment d'impropis de bosses i la temperatura màxima del test d'autoescalfament.....	83
7. Propostes	85
7.1. Possibilitats de millora en la base de dades.....	85
7.2. Possibilitats de millora en la gestió de la FORM.....	86
7.3. Possibilitats de recerca futures.....	86
8. Resum i Conclusions	89
9. Annexos	93
10. Referències	96

Taules

TAULA 1. PLANTES DE COMPOSTATGE ANALITZADES.....	12
TAULA 2. LLISTA DE VARIABLES DEPENDENTS I INDEPENDENTS CONSIDERADES EN L'ANÀLISI.....	14
TAULA 3. ANÀLISI ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE VARIABLES CATEGÒRIQUES CONSTANTS.....	17
TAULA 4. ANÀLISI ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LES VARIABLES NUMÈRIQUES CONSTANTS.....	18
TAULA 5. ANÀLISI ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE VARIABLES REFERENTS A LA FORM, REBUIG, COMPOST I IMPROPIS.....	20
TAULA 6. ANÀLISI ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE VARIABLES REFERENTS AL CONTINGUT EN IMPROPIS DE LA FORM.....	21
TAULA 7. ANÀLISI ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE VARIABLES DEPENDENTS	24
TAULA 8. MATRIU DE CORRELACIÓ DE VARIABLES DEPENDENTS I EL CONJUNT DE VARIABLES DEL ESTUDI.....	29
TAULA 9. RELACIONS CAUSALS ENTRE VARIABLES DEPENDENTS I EL CONJUNT DE VARIABLES DEL ESTUDI.....	32
TAULA 10. VARIABLES INTEGRADES EN ELS MODELS DE REGRESSIÓ FINALS	65
TAULA 11. PARÀMETRES ESTIMATS EN EL MODEL ECONOMÈTRIC 1.....	67
TAULA 12. PARÀMETRES ESTIMATS EN EL MODEL ECONOMÈTRIC 2.....	68
TAULA 13. PARÀMETRES ESTIMATS EN EL MODEL ECONOMÈTRIC 3.....	69
TAULA 14. PARÀMETRES ESTIMATS EN EL MODEL ECONOMÈTRIC 4.....	71
TAULA 15. PARÀMETRES ESTIMATS EN EL MODEL ECONOMÈTRIC 5.....	72
TAULA 16. PARÀMETRES ESTIMATS EN EL MODEL ECONOMÈTRIC 6.....	73
TAULA 17. PARÀMETRES ESTIMATS EN EL MODEL ECONOMÈTRIC 7.....	75
TAULA 18. PARÀMETRES ESTIMATS EN EL MODEL ECONOMÈTRIC 8.....	76
TAULA 19. PARÀMETRES ESTIMATS EN EL MODEL ECONOMÈTRIC 9.....	77
TAULA 20. EXEMPLE D'UNA TARGETA D'ELECCIÓ DEL TIPUS DE COMPOST PREFERIT.....	88

Figures

FIGURA 1. MITJANA, MEDIANA I VARIACIÓ DELS IMPROPIS (%)	22
FIGURA 2. MITJANA DELS IMPROPIS EN LA FORM SEGONS PLANTES AMB CAPACITAT TÈCNICA ANUAL INFERIOR I IGUAL O SUPERIOR A 10.000 TONES (%).....	23
FIGURA 3. CARACTERITZACIÓ DELS METALLS PESANTS (ZN, NI, PB, CU, CR, CD, HG), MG/KG MS	25
FIGURA 4. ESCENARIS PER LA VARIACIÓ D'IMPROPIS TOTALS EN EL MODEL 2 I RELACIÓ AMB EL CONTINGUT EN ZN	80
FIGURA 5. ESCENARIS PER LA VARIACIÓ D'IMPROPIS TOTALS EN EL MODEL 4 I RELACIÓ AMB EL CONTINGUT EN CU.....	81
FIGURA 6. ESCENARIS PER LA VARIACIÓ D'IMPROPIS TOTALS EN EL MODEL 6 I RELACIÓ AMB EL CONTINGUT EN PB.....	82
FIGURA 7. ESCENARIS PER LA VARIACIÓ D'IMPROPIS ESPECIALS EN EL MODEL 8 I RELACIÓ AMB LA CE	83
FIGURA 8. ESCENARIS PER LA VARIACIÓ D'IMPROPIS BOSSES EN EL MODEL 9 I RELACIÓ AMB L'INCREMENT DE TEMPERATURA DURANT EL TEST D'AUTOESCALFAMENT.....	84

Resum

1. Introducció

La presència d'impropis a la fracció orgànica dels residus municipals (FORM) és un dels factors importants que intervenen sobre la qualitat del compost produït a les plantes de compostatge. A més, la qualitat d'aquest producte es veu influenciada pels processos de tractament realitzats, així com per la pròpia tipologia i característiques de les plantes.

A partir d'una base de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC), que presenta informació sobre la caracterització de la FORM i el compost obtingut a 21 plantes de compostatge i digestió anaeròbia de Catalunya durant el període de 2010 a 2014, s'ha realitzat una anàlisi estadística amb l'objectiu principal de quantificar l'efecte dels impropis, així com d'altres variables independents (p.e. tipus de tecnologia de descomposició, diàmetre del tromel de refí, durada de la producció, etc.) en diversos paràmetres de qualitat del compost. Aquests últims inclouen: la presència de metalls pesants com el zinc, níquel i coure; la conductivitat elèctrica; i la temperatura màxima obtinguda en el test d'autoescalfament. L'anàlisi es basa en el desenvolupament de diversos models de regressió que s'han dut a terme amb el suport de les anàlisis univariant i bivariant prèvies de les dades.

A partir dels models de regressió estimats s'han desenvolupat diversos escenaris amb l'objectiu principal d'analitzar l'efecte de possibles variacions dels nivells d'impropis en els paràmetres de qualitat del compost.

En base als resultats d'aquest estudi es plantegen diverses propostes que incideixen sobre la millora de la base de dades i sobre la gestió de la FORM, així com s'identifiquen noves idees de recerca.

El present informe és el resultat d'una col·laboració entre l'ARC, l'Escola Superior d'Agricultura de Barcelona (ESAB) i ENT Environment and Management.

La qualitat del compost depèn de factors com el nivell d'impropis trobats a la FORM, els processos de tractament i la pròpia tipologia de les plantes.

2. Metodologia

Aquest estudi ha estat realitzat seguint diversos passos metodològics: la lectura inicial de la base de dades original, incloent la codificació i transformació de dades per a l'anàlisi estadística; la identificació del conjunt de variables dependents i independents possibles d'integrar en els models de regressió; la realització d'anàlisis univariants i bivariants de les dades; la simulació de nombrosos models de regressió i la selecció dels models més significatius; i la simulació d'escenaris i projeccions de qualitat del compost en base als models de regressió prèviament seleccionats.

3. Anàlisi univariant

Aquest tipus d'anàlisi va permetre realitzar una caracterització inicial de les plantes de compostatge. En general, les plantes presenten força heterogeneïtat en relació a característiques com ara la capacitat tècnica anual, el temps fins a la selecció d'impropis, el tipus de tecnologia de descomposició de la qual disposen o la durada total del procés de producció.

En termes mitjans, les plantes presenten aproximadament 11% d'impropis a la FORM entrant, variant entre valors mínims i màxims de 0,13% i 30,2%, respectivament.

Sobre les variables dependents analitzades, es pot destacar que, en termes mitjans, els nivells de metalls pesants en el compost no arriben a la millor classe de qualitat (Classe A) en els casos del plom, coure i del zinc; que els valors de la conductivitat elèctrica s'aproximen al nivell aconsellat; i que els resultats pel test d'autoescalfament està dins dels valors recomanats.

4. Anàlisi bivariant

En aquest apartat es van estimar les taules de correlació i de relacions causals entre les variables dependents i independents com a pas previ al desenvolupament dels models de regressió.

Les correlacions més fortes han estat vinculades als metalls pesants presents al compost, mentre que les

Les plantes de compostatge a Catalunya són heterogènies quant a la capacitat tècnica anual i el tipus de tecnologia de descomposició, entre altres aspectes.

variables referents a les impureses donaren valors de correlació més dèbils.

Quant a les relacions causals, els resultats més significatius s'obtenen per les variables dependents relacionades amb els metalls pesants i la conductivitat elèctrica. D'altra banda, el grup de les variables d'impureses presenta un nombre menor de relacions significatives.

5. Models de regressió

S'han seleccionat els 9 models més significatius, incloent, 3 models amb el zinc com variable dependent, 2 pel coure, i els restants 3 models pel plom, per la conductivitat elèctrica i per la temperatura màxima del test d'autoescalfament. Aquests models han inclòs com a mínim una variable independent referent als impropis, conjuntament amb altres variables (p.e. tipus de tecnologia de descomposició).

Entre els resultats més significatius destaquen la verificació de la relació causal entre l'increment dels impropis a la FORM i la reducció de la qualitat del compost per tots els paràmetres de qualitat analitzats.

Altres resultats inclouen, per exemple, relacions causals positives entre la durada de la maduració i la conductivitat elèctrica, els nivells de saturació i el test d'autoescalfament, i el diàmetre de tromel de refí i el mateix test.

6. Determinació d'escenaris i projeccions de qualitat

En aquest estudi es van simular diversos escenaris referents a l'efecte de la variació dels impropis en els paràmetres de qualitat de compost estudiats. Entre els principals resultats, destaca que la reducció d'impropis contribuiria a la reducció de la presència de metalls pesants i a millorar els nivells de conductivitat elèctrica i del test d'autoescalfament, encara que també se suggereix que calen més canvis en la gestió de la FORM per arribar a millors nivells de qualitat del compost.

Els models de regressió desenvolupats confirmen que l'increment dels impropis influeix negativament en la qualitat del compost.

7. Propostes

En aquest apartat es proposa adreçar la manca de dades per algunes variables, i la identificació de noves variables, com alguns dels aspectes de millora de la base de dades analitzada.

A més, s'identifica la importància d'afavorir models de recollida selectiva més eficaços que contribueixen a la reducció d'impropis i la identificació de males praxis que afecten els nivells de saturació a les plantes com algunes de les propostes per la millora de la gestió de la FORM.

Finalment, es plantegen diverses idees de recerca futura, entre aquestes, la continuació d'aquest estudi per un període més llarg al respecte d'una o més plantes analitzades.

8. Conclusions

Aquest estudi constata la relació important entre els impropis i la qualitat del producte de les plantes de tractament de FORM, així com la identificació de noves interrelacions que calen investigar més a fons en properes anàlisis.

Els resultats obtinguts poden recolzar mesures a incidir sobre els tipus de models de recollida i tractament de la FORM que contribueixin a millorar la seva gestió i garantir un compost de millor qualitat.

La promoció de models de recollida més eficaços, així com la identificació de males praxis que influeixen en els nivells de saturació de les plantes estan entre les propostes de millora de gestió de la FORM.

Noves interrelacions trobades entre variables de l'estudi obren noves oportunitats d'anàlisi.



1. Introducció

Les plantes de tractament de la fracció orgànica dels residus municipals (FORM) recollida selectivament, més enllà de la necessitat de gestionar correctament aquesta fracció, tenen per objectiu l'obtenció d'un compost de qualitat que en permeti la seva posterior utilització com a esmena orgànica o fertilitzant orgànic.

En aquest sentit, d'entre tots els factors que intervenen sobre la qualitat del compost, la presència d'impropis a la FORM recollida té una incidència molt determinant. Per una banda, certs impropis transfereixen contaminants al compost, com ara metalls pesants, i per l'altra, dificulten els processos de tractament (mala oxigenació, mal funcionament i disminució de l'eficiència dels equips de procés, necessitat de maquinària específica per retirar-los, pèrdues de matèria orgànica, etc.) amb una conseqüència directa sobre la qualitat del producte final i dificultant també el maneig/gestió de la instal·lació.

Des de l'any 2006 l'Agència de Residus de Catalunya (ARC) realitza una caracterització trimestral dels circuits de recollida de FORM de les diferents plantes de tractament, obtenint les tones anuals recollides i els impropis de cadascun dels circuits separats per fraccions. Aquesta sèrie tan exhaustiva és única i presenta gran rellevància fins i tot a nivell internacional, i ja va permetre elaborar un primer estudi concloent sobre quins són els factors socioeconòmics i dels models de recollida que expliquen el nivell desigual d'impropis en la FORM recollida pels municipis (Puig-Ventosa et al. 2013).

A banda, l'ARC també disposa d'informació sobre diferents variables en relació al procés de cada planta, com ara el tipus de tecnologia, el nombre de setmanes de procés abans del pretractament, la durada de producció, etc. Així mateix, des de l'any 2010 també disposa d'un gran nombre d'anàlitzes del compost resultant, anàlitzes encarregades per la mateixa ARC i en les quals es mesura la concentració de diferents metalls pesants, a més d'altres paràmetres, com ara la conductivitat elèctrica, la temperatura màxima observada en el test d'autoescalfament, el grau d'estabilitat, contingut en nutrients, etc.

L'efecte negatiu que aquests impropis tenen sobre el procés de compostatge és evident i de fet moltes de les plantes de tractament de fracció orgànica disposen de tarifes diferenciades segons el percentatge d'impropis de la FORM. Igualment, la qualitat del

compost pot ser influenciada per les pròpies característiques de les plantes i dels processos de tractament de la FORM que s'hi duen a terme.

Aquest informe presenta els resultats d'una anàlisi de les dades de caracterització de la FORM entrant a 21 plantes de compostatge de Catalunya¹, considerant una freqüència trimestral de les dades per al període comprès entre 2010 i 2014. L'objectiu principal d'aquest treball és l'anàlisi estadística de com la incidència dels impropis a la FORM –conjuntament amb aspectes relacionats amb el maneig del procés i el propi disseny de les plantes–, afecta la qualitat del compost produït a les plantes de compostatge de Catalunya.

El present informe és el resultat de dos estudis encarregats per ARC, per una banda, l'“Estudi de la qualitat del compost de FORM en relació a la qualitat de les plantes de compostatge de FORM de Catalunya” a càrrec de l'Escola Superior d'Agricultura de Barcelona (ESAB) i, per altra, l'estudi “Modelització estadística de la incidència dels impropis de la FORM sobre la qualitat del compost” realitzat per ENT Environment and Management.

Aquest document s'estructura en 8 apartats:

- 1)** La present introducció;
- 2)** La metodologia adoptada per aquest estudi;
- 3)** L' anàlisi univariant de les variables considerades;
- 4)** L'anàlisi bivariant, amb la inclusió de matrius de correlació i de relacions causals referents a diverses variables;
- 5)** Presentació dels resultats dels models econòmètrics més significatius;
- 6)** Presentació de varis escenaris i projeccions de qualitat del compost a partir dels resultats obtinguts en l'anàlisi de regressió;
- 7)** Presentació d'un conjunt de propostes relacionades amb la millora de la base de dades, de la gestió de la FORM, així com la identificació de noves línies de recerca; i
- 8)** Exposició de les principals conclusions del estudi.

¹ L'anàlisi univariant inclou 21 plantes, mentre que la resta de l'anàlisi estadística inclou 20 plantes (sense la planta de Terrassa, que s'exclou per motius de manca de dades).



2. Metodologia

Aquest apartat presenta els principals passos metodològics seguits en aquesta anàlisi, en concret: la primera lectura de la base de dades original, la identificació de necessitats de transformació de variables així com la seva codificació; la selecció de variables dependents i independents per integrar en l'anàlisi estadística; les anàlisis univariant i bivariant de les dades; l'elaboració de models de regressió; i el desenvolupament de escenaris i projeccions de qualitat del compost. A continuació s'exposen aquests passos amb més detall.

2.1. Base de dades original i transformació de dades

La base de dades caracteritza la gestió de la FORM en 21 plantes de compostatge de Catalunya. Totes aquestes plantes han estat objecte de l'anàlisi estadística univariant, però per les anàlisis bivariant i de regressió es va considerar 20 plantes de compostatge a causa de la no disponibilitat d'algunes dades per una de les plantes (Terrassa). La Taula 1 identifica les plantes analitzades:

Taula 1. Plantes de compostatge analitzades

Nom de la planta
Ecoparc 1 (Barcelona)
Ecoparc 2 (Montcada i Reixac)
Planta de compostatge de Boadella i les Escaules
Planta de compostatge de Botarell
Planta de compostatge de Jorba
Planta de compostatge de la Seu d'Urgell
Planta de compostatge de Llagostera
Planta de compostatge de Malla
Planta de compostatge de Manresa
Planta de compostatge de Mas de Barberans
Planta de compostatge de Montoliu de Lleida
Planta de compostatge de Sant Cugat del Vallès
Planta de compostatge de Sant Pere de Ribes
Planta de compostatge de Santa Coloma de Farners

Nom de la planta
Planta de compostatge de Tàrraga
Planta de compostatge de Tremp
Planta de tractament biològic de Granollers
Planta de tractament biològic de l'Espluga de Francolí
Planta de tractament biològic de Terrassa
Planta de tractament biològic de Torrelles de Llobregat
Planta de tractament biològic d'Olot

La base de dades original inclou 92 variables dividides en els següents grups: 3 variables referents a la identificació de les observacions, el període associat a les dades i la planta de compostatge; 16 variables per a la caracterització de les plantes (p.e. tipus de gestió; capacitat tècnica anual de tractament de FORM); 12 variables referents a les entrades i sortides de FORM, fracció vegetal (FV), rebuig, etc.; 16 variables relacionades amb la caracterització dels impropis; i 45 variables sobre les característiques del compost (p.e. conductivitat elèctrica, percentatge de germinació) (Taula A1, en la secció d'annexos).

Al llarg de l'anàlisi estadística es va realitzar diversos tipus de canvis en les variables, incrementant el nombre fins a 186. Aquests canvis han estat relacionats, per exemple, amb la creació de variables *dummy*, la seva transformació logarítmica o la presentació de les variables sense valors atípics (*outliers*), entre altres. Alguns d'aquests canvis representen únicament proves efectuades per trobar les millors formes de transformació de les variables. Això significa que no totes les variables creades surten en els resultats finals presentats en aquest estudi. La Taula A2 en la secció d'annexos presenta el conjunt de les variables transformades que han estat incloses en les anàlisis univariant, bivariant i de regressió presentades en aquest informe.

La base de dades es presenta com a dades de panell, és a dir, amb diverses variables de les plantes observades al llarg del temps, si bé es tracta d'un panell no balancejat, que significa que no totes les plantes presenten dades per tots els períodes trimestrals considerats. Igualment, hi ha plantes amb més d'una observació per trimestre, fet que ha motivat fer la mitjana trimestral d'algunes de les dades d'aquestes plantes.

2.2. Selecció de variables dependents i independents

A partir del conjunt de variables incloses en la base de dades s'ha fet una divisió de les variables que es pretenen explicar (variables dependents) i de les principals variables que a priori es creu que poden ser explicatives (variables independents), com es presenta a la Taula 2. Aquesta selecció va ser basada en una anàlisi efectuada per l'ESAB dins del marc del estudi "Estudi de la qualitat del compost FORM en relació a la qualitat de les plantes de compostatge de FORM de Catalunya". La selecció d'aquestes variables té per objecte identificar els trets característics que permetin establir les relacions entre paràmetres per aconseguir la consecució de l'objectiu del treball i s'han agrupat de la següent manera:

- **Tipologia de planta.** S'identifiquen els principals trets característics de la instal·lació, partint de la mida o capacitat i considerant la ubicació o el tipus de gestió. En general, es tracta de paràmetres que no varien per cada planta i que poden prendre valors variables, constants o nominals.

- **Tipologia de procés.** Aspectes relacionats amb el tipus de procés i maneig, com ara la tecnologia utilitzada, sistema de ventilació, etc. Aquests paràmetres tampoc és probable que pateixin variacions en el temps excepte en el cas que hi hagi canvis en el maneig de la planta.
- **Qualitat de la FORM i dels materials d'entrada.** Relacionada principalment amb el contingut en impropis de la FORM i amb la proporció d'incorporació de fracció vegetal en la barreja. Els primers varien amb les caracteritzacions efectuades però els relacionats amb el maneig tendeixen a ser constants.
- **Qualitat del compost.** Composició química, especial relació amb els metalls pesants, patògens i categorització segons RD506/2013. Els valors d'aquests paràmetres provenen dels resultats de la presa de mostra de compost, raó per la qual varien.

Taula 2. Llista de variables dependents i independents considerades en l'anàlisi

Variables dependents	Variables independents més rellevants			Altres variables independents considerades
	Disseny de planta	Maneig del procés	Material inicial i barreja	
Conductivitat elèctrica (CE)	- Tecnologia de descomposició - Tecnologia de maduració - Mida garbell refí	- Moment de selecció d'impropis - Durada total	- Contingut en impropis total - % FV / FORM tractada	
Grau d'estabilitat (GE)	- Capacitat tècnica - Tecnologia de descomposició - Tecnologia de maduració	- Saturació de la planta - Durada total	- % FV / FORM tractada	
Metalls pesants (Zinc, Coure, Níquel, Plom)	- Tecnologia de descomposició	- Moment de selecció d'impropis	- Contingut en impropis total - Impropis plàstic total - Impropis metalls totals - Impropis vidre - Impropis metall+plàstic+vidre - % FV / FORM tractada - Rebuig/Impropis	- Gestió de la planta - Temps inici tractament - Durada descomposició - Durada maduració
Impureses (metalls, plàstic, vidre, total)	- Mida del garbell de refí	- Moment de selecció d'impropis	- Contingut en impropis totals - Impropis plàstic total - Impropis metalls totals - Impropis vidre - Impropis metall+plàstic+vidre	
Test d'auto-escalfament	- Capacitat tècnica - Tecnologia de descomposició - Tecnologia de maduració	- Saturació de la planta - Durada total	- % FV / FORM tractada	
Percentatge de germinació	- Capacitat tècnica - Tecnologia de descomposició - Tecnologia de maduració	- Saturació de la planta - Durada total	- Contingut en impropis - % FV / FORM tractada	

2.3. Anàlisi univariant i bivariant

Aquest punt de la metodologia consisteix en l'anàlisi estadística-descriptiva de les variables incloses en l'estudi, de forma individual (univariant) o entre dues variables (bivariant).

Per l'anàlisi univariant, es va caracteritzar les variables en termes de mesures com la mitjana, mediana, valors mínims, valors màxims, i desviació estàndard. Igualment es van elaborar diagrames de caixa (en anglès, *boxplots*) per variables referents als impropis i per la caracterització dels valors de metalls pesants trobats a les plantes de compostatge.

Al respecte de l'anàlisi bivariant, es va definir la taula de correlació entre diverses variables, distingint els nivells de correlació dèbil, mitjana o forta per valors absoluts inferiors a 0,33, entre 0,33 i 0,66 i superiors a 0,66 respectivament, així com la taula de relacions causals entre variables dependents i el conjunt de variables de l'estudi amb l'objectiu de trobar relacions amb significança elevada (basada en un valor P menor a 0,05) i significança considerada mitjana o menor (basada en un valor P entre 0,05 i 1).

2.4. Anàlisi de regressió

Aquesta representa la part principal de l'anàlisi estadística i consisteix en una anàlisi de regressió per a desenvolupar diversos models estadístics que tracten d'explicar els principals factors que afecten la qualitat del compost resultant, així com el pes que té cadascun en la determinació de la qualitat final, fent especial èmfasi en els nivells d'impropis, a més de variables associades al disseny de les plantes, maneig del procés i altres components del material inicial i de barreja. Per a fer-ho es desenvoluparan diversos models:

$$q_{it} = f(m_{it}, t_i, u_{it})$$

On q_{it} es la qualitat del compost de la planta (provant diferents mesures de la qualitat, com les variables dependents indicades a la Taula 2) i en el moment t ; m_{it} és el vector de variables que recullen el conjunt de característiques del material d'entrada a la planta i en el moment t , incloent els nivells d'impropis i la seva composició; t_i es el vector de variables que recullen la tecnologia, el mètode portat a terme i altres característiques de la planta i ; i u_{it} és el terme de pertorbació o altres factors que afectarien la qualitat del compost. L'anàlisi de dades de panel no balancejats com es presenta en el apartat 5 es va realitzar a través de model de regressió de mètode de mínims quadrats ordinaris (*Generalized Least Squares*). La metodologia adoptada per la simulació i selecció dels models de regressió es va basar en dos etapes, descrites a continuació.

Primer, es van simular diversos models de regressió amb la següent lògica. Per cada variable dependent es van seleccionar les variables explicatives (o independents) prioritàries per analitzar en aquest estudi, així com aquelles que donaven valors de relacions causals més forts segon el que s'ha explicat en el apartat d'anàlisi bivariant. Aquestes variables es van introduir en els models una per una, analitzant en cada moment el resultat en termes de significança individual i global del model. Si una variable introduïda no presentava significança individual i afectava negativament la significança global del model, s'extreia la variable del model i se n'inclouia una altra. Aquest procés es va fer de forma successiva fins a trobar models amb la inclusió exclusiva de les variables que presenten significança elevada.

Segon, per a la validació dels models seleccionats a partir de la etapa anterior es va comprovar el compliment de les següents condicions:

- a) **Significança estadística dels paràmetres** a partir de la realització del contrast de significança individual (test estadístic t), assegurant-ne nivells de significança dels valors P, de cara a comprovar que una determinada variable independent disposa de poder explicatiu en relació a la variable dependent considerada;
- b) **Significança estadística del model** a partir de la realització del contrast de significança global (test estadístic F), trobant nivells de significança dels valors P, que significa que en el seu conjunt les variables independents d'un determinat model poden ser utilitzades per explicar la variació de la variable dependent;
- c) **Distribució normal dels residus** a partir de l'observació de les representacions gràfiques dels residus basada en la distribució de freqüències (histograma) i en el contrast *Jarque-Bera* i el respectiu valor P;
- d) **Absència d'autocorrelació** comprovada a partir de l'indicador estadístic *Durbin-Watson* (DW), indicant la possibilitat de rebutjar o no la hipòtesis nul·la d'absència d'autocorrelació, encara que és considerat com a més normal trobar la presència d'autocorrelació en models basats en dades de panell;
- e) **Absència d'heteroscedasticitat**, condició que és assegurada a partir de l'estimació dels models de panell amb la selecció del mètode de *white-cross section* que corregeix les desviacions estàndards i relaxa aquest supòsit;
- f) **Absència de multicol·linealitat**, analitzant les matrius de correlació de les variables independents, les regressions de les mateixes variables i l'anàlisi del factor d'inflació de les variàncies (*Variance Inflation Factor*), de cara a comprovar la no existència de correlacions elevades entre les variables independents, que pot perjudicar la precisió dels estimadors dels models de mínims quadrats ordinaris.

2.5. Desenvolupament d'escenaris i projeccions de qualitat del compost

Després de seleccionar els models finals, s'han desenvolupat diversos escenaris basats en projeccions de l'efecte de possibles variacions en les variables independents integrades en els models de regressió, sobretot dels impropis, en la qualitat del compost definida per variables com la presència de metalls pesants, la conductivitat elèctrica i els valors màxims trobats en el test d'autoescalfament. Aquests escenaris es realitzen sobre la base de les equacions estimades pels models, on se simula l'efecte de l'increment o reducció dels valors d'una variable independent en la variable dependent, amb el manteniment de la resta de variables constants.



3. Anàlisi univariant

Aquesta anàlisi depèn del tipus de variable a analitzar, en particular: variables constants i no constants i variables numèriques i categòriques.² Les taules 3 i 4 presenten les característiques principals de les 20 plantes de compostatge analitzades, concretament de les variables categòriques i numèriques constants, respectivament. Per aquest tipus de dades es van considerar 21 observacions, una per cada planta.

A la Taula 3 es pot observar que la gestió de les plantes es reparteix pràcticament a parts iguals entre gestió pública i privada, i disposen de tecnologia de descomposició principalment basada en pila dinàmica (33,3%), túnel (28,6%) i digestió anaeròbia (19,1%). Respecte de la tecnologia de maduració, hi ha una preponderància de la tecnologia no ventilada (66,7%). La majoria de les plantes procedeix al tractament immediat de la FORM (81%).

Taula 3. Anàlisi estadística descriptiva de variables categòriques constants

Variable	%
GESTIÓ DE LA PLANTA	
Pública	47,6
Privada	52,4
TECNOLOGIA DE DESCOMPOSICIÓ	
Digestió anaeròbia	19,1
Pila dinàmica	33,3
Pila dinàmica ventilada	9,5
Túnel	28,6
Sitja ventilada	9,5

² Variables constants i no constants es diferencien segons si el valor de la variable varia al llarg de les observacions. Respecte de les variables numèriques i categòriques, les primeres corresponen a observacions que prenen valors numèrics, mentre que les segones es presenten en la forma de categoria o atribut, és a dir, aspectes qualitius (p.e. tipus de gestió de la planta, que es pot classificar com pública o privada).

Variable	%
TECNOLOGIA DE MADURACIÓ	
Ventilada	33,3
No ventilada	66,7
TEMPS QUE ES TRIGA A INICIAR EL TRACTAMENT	
Immediat	81
Tardà	19

Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

La capacitat tècnica anual, és a dir, de processament de tones a l'any, és d'una mitjana d'aproximadament 19.000 tones, amb una àmplia variació entre 100 i 90.000 t/any encara que la meitat de les instal·lacions presenta una capacitat inferior o igual a 10.000 t/any. Les plantes de gran capacitat inclouen les línies de tractament de FORM dels Ecoparcs 1 i 2 (90.000 t/any), seguits de lluny per la planta de Granollers (45.000 t/any). La durada del procés de producció del compost se situa en una mitjana de 93 dies, entre un mínim de 52 i un màxim de 150 dies. Les durades més llargues corresponen a plantes de petita capacitat, com Boadella o Malla, mentre que les que practiquen períodes més curts són les que incorporen una digestió anaeròbia prèvia al compostatge. La durada de descomposició i maduració presenta una mitjana de prop de 24 i 56 dies, respectivament. Les plantes triguen, en mitjana, 14 dies per seleccionar els impropis després de l'entrada de la FORM, però la variació situa aquest moment entre les que seleccionen just quan arriba el material, amb o sense barreja prèvia amb material complementari, i les que fan la selecció un cop ha passat la fase termòfila. Finalment, el diàmetre del tromel de pretractament és sempre de 80 mm, mentre que el diàmetre del tromel refí varia entre 10 i 16 mm, sent prioritari el primer; només tres plantes fan servir tromel de 16 mm (Montoliu, Olot i Sant Pere de Ribes) i dues el de 12 mm, en concret Llagostera i Sant Cugat (Taula 4).

Taula 4. Anàlisi estadística descriptiva de les variables numèriques constants

Variable	Mitjana	Mediana	Min.	Max.	Desviació estàndard
Capacitat tècnica anual (t/any)	18.857,14	10.000	100	90.000	25.773,12
Capacitat tècnica trimestral (t/trimestre)	4.714,29	2.500	25	22.500	6.443,28
Durada procés de producció (dies)	93,1	94	52,00	150,00	26,45
Durada descomposició (dies)	23,86	21	14	49	9,86
Durada maduració (dies)	55,90	60	12	98	23,83
Durada total (descomposició i maduració) (dies)	79,76	84	33	140	27,63
Temps fins a selecció d'impropis (dies) ¹	15,26	14	1	49	14,4
Diàmetre tromel pretractament (mm)	80	80	80	80	0
Diàmetre tromel refí (mm)	11,05	10	10	16	2,16

Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

Nota: ¹ Per aquesta variable no s'inclouen les dades referents a dues plantes de compostatge que no realitzen selecció d'impropis a causa de manca de presència important d'impropis.

Les taules 5 a 8, així com les figures 1 i 2, mostren una anàlisi general de les variables no constants. Les dades referents a les taules 5 i 6, així com a la Per a una anàlisi complementària, la Figura 1 presenta els valors mitjans, les medianes i màxims per totes les categories d'impropis. Especialment en el cas de la poda i del plàstic, i en menys mesura el grup d'altres impropis, es pot veure que hi ha molts valors que es troben clarament per sobre la mitjana (representats amb cercle i asterisc), que també donen una idea de l'elevada dispersió de dades per a aquests materials.

Figura 1, són mitjanes trimestrals de les observacions per cada planta, mentre que a les taules 7 i 8 es va fer l'anàlisi estadística descriptiva de totes les observacions recollides.

La Taula 5 presenta els resultats per variables relacionades amb la FORM, FV, rebuig i impropis en base trimestral o en percentatges. La mitjana d'entrades de FORM està prop a 4,7 milers de tones, mentre que la FORM tractada representa 4,3 milers de tones. Les sortides de FORM corresponen a instal·lacions que no tracten tota la FORM que reben i la deriven cap a altres plantes, situació que es dona en pocs casos.

Degut a les diferents capacitats de les plantes, tal i com s'ha observat a la Taula 4, el rang de variació de material entrats és molt gran. Els valors de zero a les entrades de FV corresponen a dades de l'Ecoparc 1, Malla i Granollers, on en alguns trimestre no hi ha registres d'entrades, la qual cosa no indica que no en facin servir ja que poden tenir material emmagatzemat per ser utilitzat en el procés. La mitjana percentual de la relació entre FV i FORM tractada és d'aproximadament 21%, que equival a una barreja de 83 % FO i 17 % FV en massa i de 2,4:1 en volum (considerant les densitats aparents de FO en López et al., (2010a) i de FV en López et al. (2010b)). Les sortides de compost presenten un valor mitjà de 477,5 tones, el rebuig 1.733 tones, i els impropis 604 tones. La combinació d'aquests valors dona una idea del rendiment del conjunt de plantes, que indica que de cada 100 t de FO tractada 14,6 es converteixen en compost. Aquest valor podria indicar que s'ha produït una reducció molt gran de la matèria orgànica present en el material inicial, però cal considerar també que existeix una elevada producció de rebuig i que a més a més el quocient es fa només respecte FORM entrada i no respecte la barreja amb la resta vegetal. D'altra banda, cal tenir en compte que les sortides de compost corresponen a l'expedit i no al produït, de manera que es reflecteix un valor més baix del real, que inclús pot ser zero, com alguns registres de l'Ecoparc 2, Sta. Coloma de Farners, Tàrrrega, Tremp i Granollers. No obstant, aquests valors són similars als trobats en l'estudi anterior de Huerta et al. (2010) sobre les plantes de compostatge de Catalunya.

Les sortides de rebuig també resulten molt variables, d'acord amb les mides de planta. En tractar-se de plantes de FORM, és difícil pensar que es donin casos on no surti rebuig, però així seria a Boadella o Malla, on el material entra molt net degut a una recollida selectiva de molt alta qualitat. Els resultats indiquen, en termes mitjans, que hi ha 2,1 tones de rebuig per cada tona d'impropis i 0,2 tones de rebuig per cada tona de FORM tractada. El primer nombre indica que es treu més rebuig que impropis entrats, però es pot justificar, tant per la baixa eficiència de la maquinària de pretractament on es perd força matèria orgànica, com pel fet que durant el refí també part de la resta vegetal incorporada a la barreja es perd com a rebuig si no s'incorpora novament al procés, cosa que amb freqüència no se sol fer per

esgotament del material i de les funcions que li són pròpies i per anar, en ocasions, acompanyat d'una quantitat important d'impropis, normalment plàstics. Aquest fet també afectaria a la relació entre tones de rebuig i FORM tractada.

Taula 5. Anàlisi estadística descriptiva de variables referents a la FORM, rebuig, compost i impropis

Variable	Observacions	Mitjana	Mediana	Min.	Max.	Desviació estàndard
Entrades de FORM (t/trim)	420	4.653	2.365	9	32.372	5.940
Sortides de FORM (t/trim)	96	1.365	864	0	5.933	1.322
FORM tractada (t/trim)	420	4.341	2.090	9	31.122	5.762
Entrades FV (t/trim)	420	361	157	0	3.402	583
FV/FORM tractada (%)	420	20,6	9,8	0	1.063,3	75,4
Sortides rebuig (t/trim)	420	1.733	387	0	14.016	3.073
Sortides compost (t/trim)	420	477	238	0	6.798	789
Total d'impropis (t/trim)	420	604	257	0,02	4688	977
Rendiment (Sortida compost/FORM tractada) (%)	420	14,6	12,5	0	87,2	12,9
Saturació (FORM tractada/capacitat tècnica anual) (%)	420	22,4	22,2	0,5	68,2	8,8
Rebuig/total d'impropis (t/t)	420	2,1	1,9	0	7,6	1,4
Rebuig/FORM tractada (t/t)	420	0,2	0,2	0	0,7	0,2

Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

Nota: "trim" és l'abreviatura de trimestre.

L'anàlisi del contingut total d'impropis a les plantes de compostatge presentada a la Taula 6 mostra una mitjana de 10,8% de presència d'impropis en la FORM a les plantes de compostatge, amb una variació entre 0,13% i 30,2%. Els valors més baixos (<1%) provenen de les plantes de Boadella i de Malla, mentre que els valors més elevats (> 20%) són aportats per registres de Sant Cugat, Mas de Barberans, Botarell i Ecoparc 1. En terme mig, i a nivell individual, les tres categories d'impropis més presents són el plàstic (3,18%), les bosses de plàstic (1,52%) i paper (1,47%). En el cas del plàstic, incloent les dues categories, s'ha de tenir en compte l'efecte que tenen dins el procés degut a la seva baixa densitat aparent, de manera que per una banda suposen un gran efecte visual i per altra un efecte funcional, ja que poden limitar el pas de l'oxigen i la distribució de l'aigua entre la massa.

Un altre dels efectes a considerar en relació a la presència de plàstics és l'efecte que poden manifestar en la migració de metalls pesants. A Huerta-Pujol et al. (2010) es va determinar el contingut en metalls pesants de diferents bosses de plàstic, incloent les recomanades per

a fracció orgànica (no biodegradables) i es van trobar valors molt elevats de Pb (4.779 mg/kg) i de Cr (1.138 mg/kg) en bosses taronges per a fracció orgànica.

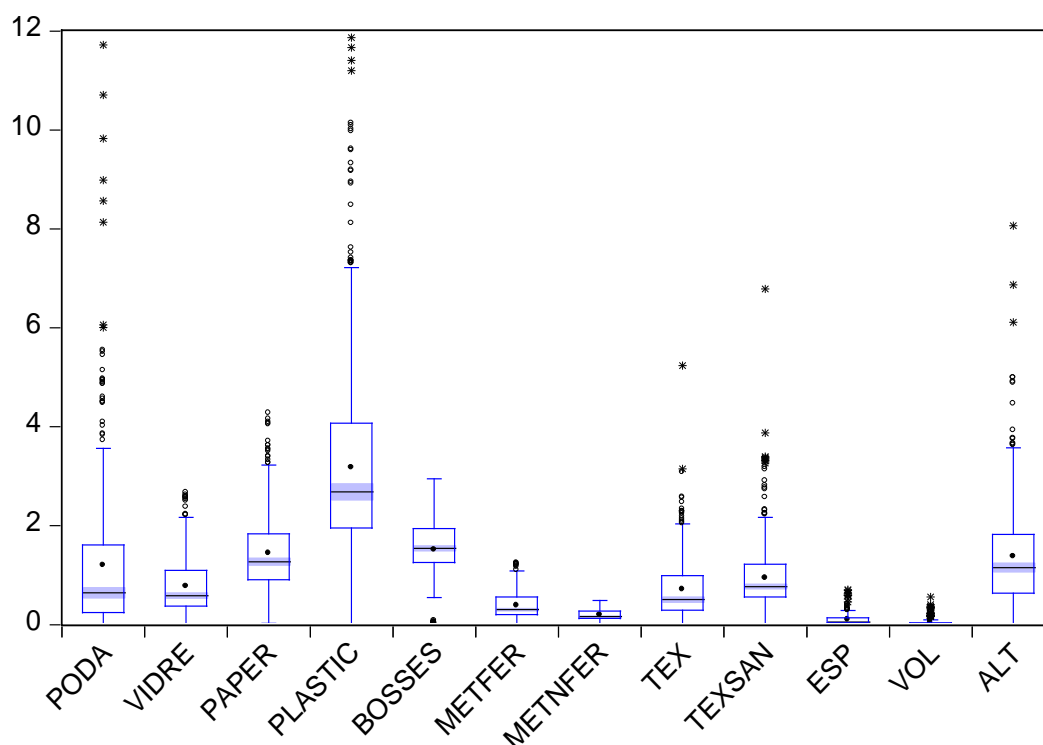
Taula 6. Anàlisi estadística descriptiva de variables referents al contingut en impropis de la FORM

Variable	Observacions	Mitjana (%)	Mediana (%)	Mín. (%)	Màx. (%)	Desviació estàndard (%)
Poda	420	1,17	0,65	0	11,72	1,58
Vidre	420	0,78	0,62	0	2,67	0,57
Paper	420	1,47	1,31	0,03	4,28	0,82
Plàstic	420	3,18	2,72	0,01	11,87	2,15
Bosses	420	1,52	1,56	0	2,95	0,64
Metall fèrric	420	0,39	0,34	0	1,25	0,26
Metall no fèrric	420	0,20	0,19	0	0,49	0,10
Tèxtil	420	0,73	0,56	0	5,24	0,61
Tèxtil sanitari	420	0,96	0,8	0	6,79	0,73
Especials	420	0,11	0,08	0	1,31	0,12
Voluminosos	420	0,04	0,02	0	0,56	0,07
Altres	420	1,40	1,19	0	8,07	1,06
Total d'impropis respecte FORM tractada (%)	420	10,77	9,93	0,13	30,2	5,71

Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

Per a una anàlisi complementària, la Figura 1 presenta els valors mitjans, les medianes i màxims per totes les categories d'impropis. Especialment en el cas de la poda i del plàstic, i en menys mesura el grup d'altres impropis, es pot veure que hi ha molts valors que es troben clarament per sobre la mitjana (representats amb cercle i asterisc), que també donen una idea de l'elevada dispersió de dades per a aquests materials.

Figura 1. Mitjana, mediana i variació dels impropis (%)

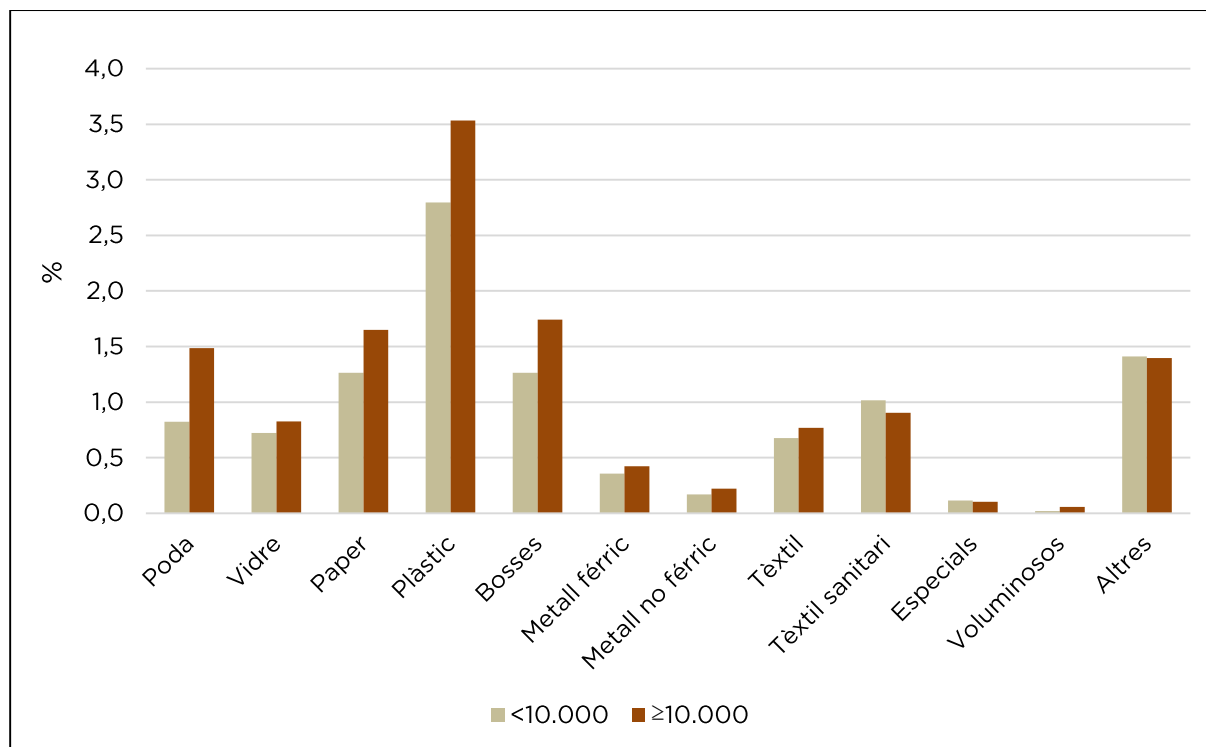


Font: Elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

Nota: Els símbols inclosos en la figura tenen el següent significat: la mediana és representada amb la línia horitzontal inclosa dins de cada diagrama de caixa (*boxplot*); la mitjana és representada amb un cercle negre dins dels *boxplots*; cada *boxplot* és comprès entre un límit inferior i superior referents al primer i tercer quartil, respectivament; les línies verticals que surten dels *boxplots* presenten l'extensió dels valors des del primer i tercer quartils fins als valors encara no considerats com atípics (*outliers*); els *outliers* surten representats amb circumferències (valors més properes) i amb asteriscs (valors més extrems).

Amb intenció de treure més informació sobre els impropis, s'ha relacionat el contingut en la FORM depenent de la mida de planta. La Figura 2 presenta els valors mitjans pels impropis segons la divisió de les plantes de compostatge en termes de la seva capacitat tècnica anual de tractament de la FORM. Aquesta divisió considera dos rangs amb valors inferiors i iguals o superiors a 10.000 tones. En termes mitjans, les plantes dins de la categoria de major capacitat presenten valors més elevats d'impropis en la FORM per totes les categories amb l'excepció del tèxtil sanitari, especials i altres. D'aquests resultats també es pot destacar la diferència més notòria en el cas del plàstic, tant bosses com general, amb major presència en les plantes de mida gran.

Figura 2. Mitjana dels impropis en la FORM segons plantes amb capacitat tècnica anual inferior i igual o superior a 10.000 tones (%)



Font: Elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

La Taula 7 presenta els resultats per les variables dependents considerades en aquest estudi. El nombre d'observacions varia molt entre les diverses categories, en concret 109 per les analítiques d'impureses i 185 pels metalls pesants (Níquel-Ni; Plom-Pb; Coure-Cu; i Zinc-Zn) i la conductivitat elèctrica (CE). Es presenten els valors mitjans, mediana, mínims i màxims i els valors aconsellats per algunes de les variables, inclosos en l'última columna de la taula.

Començant pels metalls pesants, els nivells aconsellats es refereixen a les tres classes de compost A, B, C, que presenten un ordre decreixent de qualitat, d'acord amb el Reial Decret 506/2013. Aquests tres nivells estan relacionats amb les limitacions d'ús, de manera que les classes A i B no presenten cap restricció i els materials de classe C només es poden aplicar a raó de 5 t de matèria seca per hectàrea i any. Els materials que superin la classe C no poden ser utilitzats en agricultura. Per exemple, el zinc (Zn) té un límit de 200 mg/kg ms (Classe A), 500 (Classe B) i 1.000 (Classe C). Segons aquesta lògica, solament el valor mitjà del níquel (Ni) se situa a la Classe A amb 17,75 mg/kg. El plom (47,03 mg/kg ms), el coure (121,81 mg/kg ms) i el Zn (281,50 mg/kg ms) es classifiquen com a classe B, però amb mitjanes molt més properes al límit de classe A que al de classe C. Per tant, a partir d'aquests valors i de la resta de metalls que apareixen a la Taula, el conjunt de mostres resultarien classe B. La Figura 3 permet il·lustrar la relació entre els valors mitjans observats i valors de les classes A, B i C pels metalls pesants.

La conductivitat elèctrica presenta valors molt variables, ja que aquest paràmetre depèn de la concentració de sals solubles, de la mineralització del material i de les característiques de

les matèries primeres utilitzades per a produir el compost. Es poden considerar alts per a l'ús directe dels productes, encara que també s'hi troben valors baixos procedents de registres de diverses plantes, per la qual cosa no es pot establir una relació amb una planta determinada, sinó que el valor de CE del compost sembla respondre a particularitats puntuals de materials entrats a planta. En relació amb el test d'autoescalfament, el valor mig (46,34 °C) compleix amb el valor aconsellat per a classe III, que hauria d'estar per sota de 50 °C segons LAGA Merkblatt 10 (1984). El percentatge de germinació tampoc compleix amb els valors aconsellats si es considera el valor mig de 41,97%, molt distant de l'aconsellat (>80%). Respecte de les impureses, registren valors mitjans per sota del màxim aconsellat (<0,5% smh), encara que els valors màxims de les impureses de plàstics i vidre estaven per sobre, respectivament, 1,01% smh i 2,75% smh.

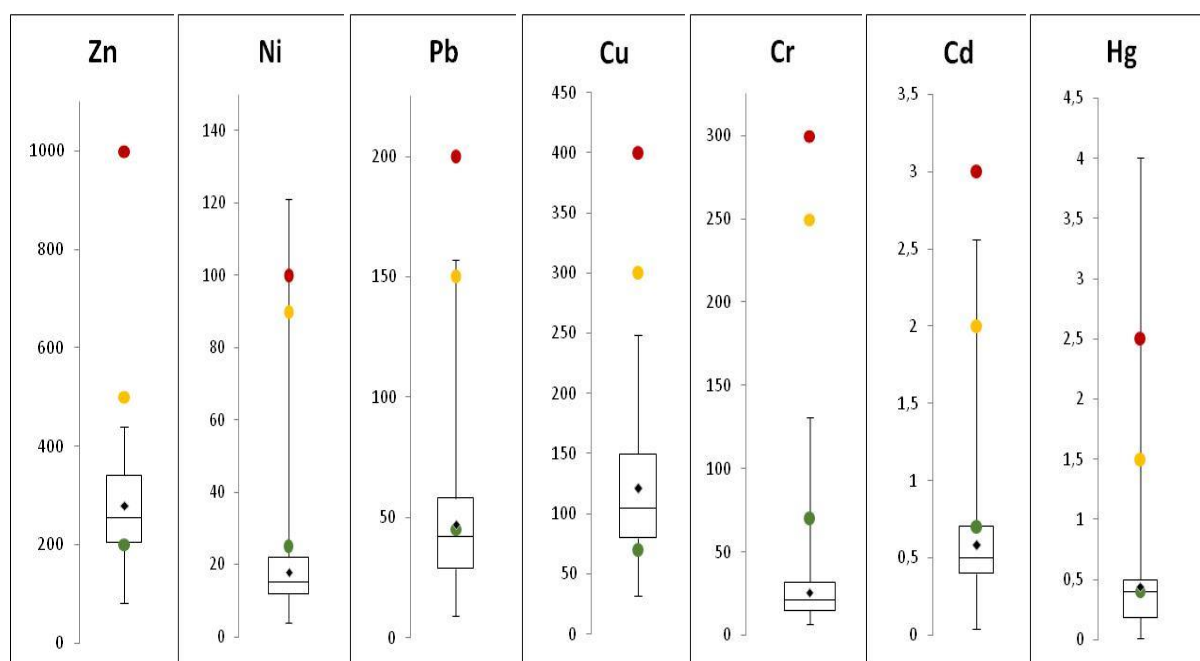
Taula 7. Anàlisi estadística descriptiva de variables dependents

Variable	Observacions	Mitjana	Mediana	Mín.	Màx.	Desviació estàndard	Valors aconsellats ³	
Metalls pesants (mg/kg ms)	Níquel (Ni)	221	17,75	15	3,98	49,00	8,80	25; 90; 100
	Plom (Pb)	221	47,03	42	8,90	192,00	25,91	45; 150; 200
	Coure (Cu)	221	121,81	104,5	32,00	574,00	66,05	70; 300; 400
	Zinc (Zn)	221	281,50	255	81,00	741,00	109,63	200; 500; 1.000
Conductivitat elèctrica (ds/m) (CE)	221	8,03	8,26	1,55	14,30	2,46	8	
Grau d'estabilitat ¹ (% sms)	133	59,53	59,80	34,40	77,70	7,24	>50% ⁴	
Test d'autoescalfament (°C) (TEMP)	185	46,34	45	20,00	74,00	16,26	<50°C	
Percentatge de germinació (%) (PG)	130	41,51	31,5	0,00	100,00	37,00	>80%	
Impureses (% smh) ²	Metalls	120	0,07	0,1	0,00	0,18	0,05	-
	Plàstics	120	0,19	0,1	0,00	1,81	0,24	-
	Vidre	120	0,28	0,1	0,00	2,75	0,55	-
	Suma metalls, vidre i plàstics	155	0,36	0,13	0,00	3,28	0,58	<0,5% smh ⁵

Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

Notes: ¹ Aquesta variable s'obté a través del quocient entre matèria orgànica resistent (MOR) i matèria orgànica total (MOT); ² Per aquestes variables algunes observacions es presentaven en la base de dades originals amb rangs de valors. Per exemple, algunes observacions de la variable "Metalls (%)" (en les impureses) es presentaven com "<10". Per aquestes observacions valor es va convertir a "10"; ³ Els valors aconsellats per les variables referents a metalls pesants i impureses són definits al RD 506/2013, respectivament per les categories A, B i C; ⁴ Aquest valor es basa en López *et al.* (2010); ⁵ Aquest valor fa referència a la suma de metalls, vidre, plàstics i pedres i graves.

Figura 3. Caracterització dels metalls pesants (Zn, Ni, Pb, Cu, Cr, Cd, Hg), mg/kg ms



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

Llegenda: ● Classe A ● Classe B ● Classe C ◆ Mitjana

La Taula presenta diverses variables recollides en les analítiques de compost. De nou, hi ha una gran variació respecte del nombre d'observacions per les diferents variables, des d'11 per l'Índex de respiració dinàmica (IRD) fins a 221 per altres variables. Igualment, s'inclou una columna amb els valors aconsellats. Les variables que en valor mig no compleixen amb els valors aconsellats són la respiració als 4 dies (AT4), l'*Escherichia coli* i el nitrogen amoniacal (NH₄). Tots els valors mitjans corresponents als restants metalls pesants (Cr, Cd i Hg) inclosos en aquesta taula compleixen amb els límits de la Classe A de compost, amb l'excepció del mercuri que mostra valors mitjans molt poc per sobre d'aquesta classe, indicant així que el Ni, Pb, Cu i Zn són els metalls pesants més restrictius per la qualitat del compost. És per aquest motiu que a l'anàlisi bivariant (apartat 4) només es prenen aquells 4 elements com a variables dependents dels metalls pesants del compost.

Taula 8. Anàlisi estadística descriptiva de variables referents a altres analítiques de compost

Variable	Observacions	Mitjana	Mediana	Mín.	Màx.	Desviació estàndard	Valors aconsellats?
Matèria seca (% smh)	221	70,57	71,80	29,00	90,24	10,47	-
Humitat (% smh)	221	29,43	28,20	9,76	71,00	10,47	<40%
pH	219	7,89	8,01	5,80	9,00	0,55	-
Matèria orgànica total (% sms)	221	52,22	52,10	24,00	76,00	8,61	> 35% smh
Matèria orgànica total (% smh)	221	36,96	36,78	13,05	60,80	8,82	-
Matèria orgànica resistent (% sms)	133	30,49	30,50	11,60	44,70	5,78	> 50% de la MOT

Variable	Observacions	Mitjana	Mediana	Mín.	Màx.	Desviació estàndard	Valors aconsellats ²
Matèria orgànica degradable (% sms)	133	20,89	20,10	10,60	46,00	5,92	< 50% sms
Índex de respiració dinàmica (IRD) (mg O ₂ /kg MO)	11	1.777,73	1.328	550,00	4871,00	1346,71	-
Respiració als 4 dies (AT4) (mg O ₂ /g MS) ¹	36	20,87	18,12	1,00	63,56	17,63	<10
Àcids húmics (% sms)	36	12,16	12,40	3,80	20,50	4,25	-
Test Solvita (*)	36	5,19	5,50	1,00	7,00	1,47	-
Escherichia coli (UFC**) ¹	193	1.307,58	10	2,00	75.000,00	7.852,97	<1.000
Salmonel·la (UFC**)	193	0,02	0,00	0,00	2,00	0,16	Absència en 25g
Nitrogen total (NT) (% sms)	221	2,66	2,66	1,09	4,40	0,50	-
Nitrogen amoniacal (NH ₄) (% sms)	221	0,43	0,42	0,03	1,04	0,17	< 0,05% sms
Relació C/N	220	10,06	9,90	6,70	26,50	2,08	<20
Fòsfor (P) (% sms)	219	1,01	0,98	0,28	1,77	0,30	-
Potassi (K) (% sms)	219	1,52	1,49	0,57	2,70	0,48	-
Calci (Ca) (% sms) ¹	218	8,36	8,38	1,66	16,86	2,30	-
Ferro (Fe) (% sms)	220	0,97	0,94	0,27	2,46	0,29	-
Magnesi (Mg) (% sms)	219	0,72	0,66	0,23	1,50	0,25	-
Sodi (Na) (% sms)	20	0,68	0,68	0,09	1,20	0,25	-
Crom (Cr) (mg/kg sms) ¹	221	26,36	21	6,40	131,00	17,44	70; 250; 300
Cadmi (Cd) (mg/kg sms) ¹	219	0,59	0,50	0,04	2,56	0,34	0,7; 2; 3
Mercuri (Hg) (mg/kg sms) ¹	215	0,44	0,40	0,01	4,01	0,38	0,4; 1,5; 2,5
Fracció granulomètrica > 20 mm (GR 20) (% smh)	120	0,02	0,00	0,00	2,00	0,18	-
Fracció granulomètrica entre 10 i 20 mm (GR10_20) (% smh)	120	1,03	0,00	0,00	11,00	2,35	-
Fracció granulomètrica < 10 mm (GR 10) (% smh)	120	98,13	100	0,00	100,00	9,35	-
Test de males herbes (TMH)	100	0,05	0,00	0,00	5,00	0,50	-
Impureses (pedres i graves) (% smh) ¹	120	0,14	0,10	0,00	2,65	0,38	-

Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

Notes: ¹ Per aquestes variables algunes observacions es presentaven en la base de dades originals amb rangs de valors. Per exemple, algunes observacions de la variable "impureses (pedres i graves) (%)" es presentaven com "<10". Per aquestes observacions es va convertir a "10"; ² Els valors aconsellats per les variables humitat, matèria orgànica total, relació C/N, granulometria, E. coli, salmonel·la i els metalls pesants de crom (Cr), cadmi (Cd) i mercuri (Hg) som relacionats amb la legislació RD506/2013. Al respecte dels metalls pesants, els valors aconsellats es presenten per ordre decreixent de qualitat i es associen a les classes A, B i C de compost, de forma semblant com el observat en la Taula 7; * El Test Solvita s'interpreta per una escala adimensional de 1 a 8 (de menys a més estable/madur); ** UFC: unitats formadores de colònies.



4. Anàlisi bivariant

Aquest apartat fa un resum de les relacions bilaterals entre possibles variables dependents i independents, presentant la matriu de correlació i les possibles relacions causals entre variables.³

En l'estudi d'aquestes relacions s'han eliminat algunes de les variables independents que constaven en el llistat inicial, pels motius que seguidament s'exposen.

Variables de Procés eliminades:

1. Sortides de FORM: només mostrava 2 relacions significatives: una de coherent (disminució del GE) i una altra d'incoherent (augment del % de germinació);
2. Rebuig generat/Quantitat d'impropis totals: només detectava 1 relació significativa (augment de les impureses de vidre) que no és coherent;
3. Rendiment: només es detectava un relació significativa (augment de impureses de vidre) que no és coherent;
4. Gestió de planta: només indicava 1 relació de elevada significança positiva amb el % de germinació i 1 de menor significança amb impureses de plàstic també positiva. Ambdues relacions tenen poc sentit;
5. Capacitat tècnica trimestral: perquè mostra les mateixes relacions que l'annual;
6. Temps fins a la selecció d'impropis: només tenia una relació positiva de menor significança amb el contingut de plom en el compost que no té sentit;
7. Trimestre de producció: aquesta variable no té sentit, tot i que mostrava dues relacions de alta significança (positiva amb el % de germinació y negativa amb la CE).

Variables del Compost eliminades:

1. MOT smh: perquè dona la mateixa informació que MOT sobre matèria seca;
2. IRD: perquè no mostrava cap relació causal;
3. Fòsfor: perquè no té senti en aquest estudi ja que no s'avalua el contingut en nutrients i perquè les 3 relacions positives que indicava (Cu i Zn en compost i impureses de plàstic) no tenen explicació;

³ Aquesta anàlisi se centra en 20 plantes de compostatge;

4. Test males herbes: perquè els resultats del test eren tots zero excepció feta d'una sola observació corresponent al valor 5.

Variables dels Impropis de la FORM eliminades:

1. Suma vidre+metall+plàstic: perquè no té senti considerar la suma de fraccions d'impropis quan prèviament s'han discutit un per un i perquè en algun cas mostra una tendència contradictòria (p.e. en relació a GE);
2. Altres: perquè aquesta fracció reuneix tot el que no està inclòs en les anteriors i que, per tant, té una composició molt diversa i desconeguda. Això no permet justificar les poques relacions que mostrava: negativa de major significança amb impureses de vidre i negativa de menor significança amb impureses metalls.

4.1. Matriu de correlació

A continuació es presenten les matrius de correlació amb la divisió en grups de variables dependents, en concret: metalls pesants (Zn, Pb, Ni, Cu); conductivitat elèctrica (CE); grau d'estabilitat (GE); impureses (metalls, plàstic, vidre, suma); temperatura màxima del test d'autoescalfament; i percentatge de germinació (PG). Els valors de correlació poden variar entre -1 i 1 i indiquen una correlació més forta quant més a prop estan d'aquests nombres. Aquesta anàlisi no s'interpreta com una relació de causalitat, però sí que indica la intensitat i direcció (negativa o positiva) de l'associació lineal entre dues variables.

La Taula 8 presenta la matriu de correlació de les variables considerades per aquest estudi. L'anàlisi es basa en la divisió de tres rangs de correlació: dèbil $[-0,33; 0,33]$; mitjana $[0,33; 0,66]$ o $[-0,66; -0,33]$; i forta $[0,66; 1]$ o $[-1; -0,66]$. Aquests rangs es presenten il·lustrats amb distints colors segon s'especifica en la llegenda de la taula.

Es pot observar que les correlacions més fortes es presenten en relació al grup de variables de metalls pesants. Al contrari, el grup de variables associades a les impureses presenta correlacions més dèbils amb altres variables. Les correlacions més fortes corresponen a les següents variables: Conductivitat Elèctrica (CE) i Sodi (Na) amb el valor de 0,80; Coure (Cu) i Zinc (Zn) amb 0,70; Impureses de Vidre i Suma d'Impureses amb 0,95; Test d'autoescalfament amb IRD (Índex de respiració dinàmic) i AT4 (Respiració als 4 dies) amb valors de 0,69 i 0,68, respectivament; i percentatge de germinació i AT4 (Respiració als 4 dies) amb valor de -0,67.

Taula 8. Matriu de correlació de variables dependents i el conjunt de variables del estudi

Variable	Conductivitat elèctrica (CE)	Grau d'estabilitat (GE)	Metalls pesants				Impureses			Test d'auto-escalfament	% Germinació	
			Ni ¹	Pb ¹	Cu ¹	Zn	Metalls	Plàstic	Vidre			Total
Poda	0,11	0,19	-0,14	-0,07	-0,01	0,04	0,06	-0,06	-0,18	-0,17	-0,04	0,11
Vidre	-0,18	0,03	0,25	0,38	0,47	0,57	0,02	0,13	0,04	0,08	-0,09	0,12
Paper	-0,22	-0,02	0,23	0,36	0,42	0,54	-0,05	0,16	0,02	0,07	-0,08	0,17
Plàstic	-0,09	-0,13	0,15	0,37	0,45	0,57	-0,01	0,02	-0,06	-0,05	0,03	0,10
Bosses	0,32	-0,09	-0,13	0,03	0,01	0,09	0,00	0,01	-0,07	-0,07	0,32	-0,09
Plàstic total	0,00	-0,13	0,11	0,34	0,41	0,53	-0,01	0,02	-0,07	-0,06	0,11	0,06
Metalls fèrrics	-0,16	0,04	0,20	0,39	0,45	0,59	0,00	0,15	-0,03	0,02	-0,07	0,13
Metalls no fèrrics	-0,14	0,01	0,16	0,35	0,35	0,52	-0,05	0,19	-0,01	0,05	0,03	0,04
Metalls totals	-0,16	0,03	0,19	0,40	0,44	0,60	-0,02	0,17	-0,03	0,03	-0,05	0,11
Tèxtil	-0,06	0,13	0,09	0,27	0,32	0,36	-0,12	0,09	0,00	0,03	-0,01	0,08
Tèxtil sanitari	-0,03	0,03	0,02	0,22	0,29	0,34	-0,08	0,04	-0,02	0,02	0,03	-0,01
Especials	-0,02	0,03	0,11	0,25	0,31	0,41	-0,03	-0,04	0,10	0,09	0,01	-0,01
Voluminosos	-0,18	0,05	0,40	0,42	0,36	0,50	-0,15	0,06	-0,15	-0,12	-0,16	0,00
% d'impropis totals	-0,07	-0,04	0,15	0,38	0,46	0,58	-0,06	0,05	-0,04	-0,01	0,02	0,09
Quantitat d'impropis totals	-0,32	0,11	0,43	0,47	0,54	0,61	-0,09	0,38	-0,01	0,10	-0,21	0,09
Entrades de FORM	-0,36	0,14	0,39	0,44	0,49	0,58	-0,04	0,38	-0,04	0,07	-0,21	0,10
FORM tractada	-0,35	0,16	0,39	0,44	0,48	0,57	-0,06	0,40	-0,03	0,09	-0,20	0,06
Entrades de FV	0,05	0,12	-0,10	0,19	0,12	0,09	0,02	-0,11	-0,06	-0,13	0,11	0,03
FV respecte a FORM tractada ²	0,24	0,12	-0,32	-0,05	-0,19	-0,24	0,06	-0,23	-0,05	-0,16	0,07	0,10
Sortides de rebuig	-0,38	0,14	0,40	0,42	0,51	0,59	-0,04	0,38	-0,04	0,08	-0,25	0,13
Sortides de compost	-0,22	0,17	0,30	0,25	0,24	0,31	-0,08	0,26	0,23	0,26	-0,14	-0,05
Rebuig respecte a FORM tractada	-0,28	-0,01	0,15	0,34	0,42	0,57	0,01	0,21	-0,07	-0,01	-0,10	0,06
Saturació	-0,05	-0,24	0,04	0,20	0,20	0,24	-0,05	-0,11	0,25	0,14	0,25	-0,24
Capacitat tècnica anual	-0,35	0,16	0,41	0,42	0,46	0,57	-0,04	0,42	-0,04	0,10	-0,24	0,11
Temps inici tractament	0,47	-0,23	-0,35	-0,35	-0,37	-0,47	0,02	-0,44	0,04	-0,11	0,32	-0,16
Durada de descomposició	-0,08	0,19	-0,15	-0,04	-0,11	-0,13	0,02	-0,14	-0,18	-0,18	-0,29	0,25
Durada de maduració	0,30	-0,10	-0,30	-0,32	-0,28	-0,43	0,01	-0,33	-0,21	-0,29	0,03	0,17
Durada total (descomposició més maduració)	0,24	-0,01	-0,33	-0,30	-0,30	-0,43	0,02	-0,34	-0,25	-0,33	-0,09	0,26
Diàmetre tromel refí	0,37	0,04	-0,02	-0,24	-0,16	-0,17	0,00	0,08	-0,13	-0,07	0,27	-0,08
Durada procés de producció	0,24	-0,01	-0,33	-0,30	-0,30	-0,43	0,02	-0,34	-0,25	-0,33	-0,09	0,25
Matèria seca	0,32	-0,34	-0,13	-0,12	-0,10	-0,21	-0,05	-0,20	-0,11	-0,07	0,33	-0,31
Humitat	-0,32	0,34	0,13	0,12	0,10	0,21	0,05	0,20	0,11	0,07	-0,33	0,31
pH	-0,25	0,15	0,08	0,11	0,24	0,11	-0,01	-0,14	-0,18	-0,19	-0,40	0,36

Variable	Conductivitat elèctrica (CE)	Grau d'estabilitat (GE)	Metalls pesants					Impureses			Test d'auto-escalfament	% Germinació
			Ni ¹	Pb ¹	Cu ¹	Zn	Metalls	Plàstic	Vidre	Total		
Matèria orgànica total	0,26	-0,18	-0,22	-0,06	-0,20	-0,05	-0,04	0,02	0,07	0,04	0,58	-0,37
Matèria orgànica total sobre mostra humida	0,37	-0,36	-0,22	-0,09	-0,20	-0,15	-0,06	-0,10	-0,04	-0,02	0,65	-0,47
Matèria orgànica resistent	0,12	0,55	-0,31	-0,06	-0,21	-0,04	-0,07	0,06	-0,08	-0,08	0,30	-0,25
AT4 (Respiració als 4 dies)	0,38	-0,47	-0,11	-0,29	-0,14	-0,14	0,00	-0,01	0,21	0,18	0,68	-0,67
Àcids húmics	0,19	-0,08	-0,09	-0,14	-0,17	-0,22	0,00	-0,13	0,08	0,04	0,32	-0,45
Test Solvita	0,09	0,45	-0,32	0,05	-0,19	-0,15	0,00	-0,13	-0,29	-0,29	-0,22	0,40
Escherichia Coli	-0,08	0,15	-0,05	-0,07	-0,06	0,01	0,12	0,43	-0,06	0,10	0,03	-0,06
Salmonella	0,11	-0,02	-0,07	0,00	-0,05	-0,09	0,07	0,20	-0,02	0,06	0,08	-0,11
Nitrogen total	0,36	0,03	-0,30	-0,30	-0,27	-0,17	0,14	-0,09	-0,21	-0,18	0,06	0,04
Nitrogen amoniacal	0,06	0,26	-0,04	0,00	-0,01	0,18	0,00	0,14	0,14	0,11	0,19	-0,25
Relació C/N	-0,11	-0,16	0,16	0,29	0,14	0,22	-0,16	0,12	0,31	0,23	0,38	-0,36
Potassi (K)	0,44	-0,03	-0,14	-0,30	-0,05	-0,18	0,10	-0,17	-0,18	-0,20	-0,12	0,07
Calci (Ca)	-0,08	-0,22	0,38	0,07	0,34	0,21	0,16	0,03	0,21	0,19	-0,29	0,15
Ferro (Fe)	-0,32	0,10	0,31	0,16	0,33	0,28	-0,03	0,09	0,00	0,00	-0,29	0,12
Magnesi (Mg)	-0,40	0,15	0,39	0,57	0,52	0,59	0,07	0,20	-0,05	0,00	-0,47	0,20
Sodi (Na)	0,80	-0,28	0,54	0,15	0,12	-0,08	-	0,04	0,00	0,01	-0,03	-
Crom (Cr)	-0,27	-0,18	0,56	0,34	0,38	0,35	-0,16	0,24	0,05	0,14	-0,13	-0,07
Cadmi (Cd)	-0,14	-0,10	0,18	0,26	0,43	0,51	0,19	0,20	-0,07	0,02	-0,22	0,20
Mercuri	-0,18	-0,22	0,29	0,12	0,31	0,30	0,23	0,09	0,22	0,22	-0,12	0,01
Fracció granulomètrica > 20mm	-0,20	0,04	-0,03	-0,03	-0,08	-0,09	0,07	-0,04	-0,03	-0,05	-0,14	0,14
Fracció granulomètrica entre 10 i 20mm	-0,40	0,19	-0,14	0,05	-0,07	-0,01	0,21	0,15	-0,07	-0,02	-0,25	0,06
Fracció granulomètrica < 10mm	0,10	-0,22	0,06	0,06	0,04	0,06	-0,12	-0,04	0,04	0,02	0,08	-0,09
Impureses pedres i graves	-0,007	-0,16	-0,08	-0,13	-0,14	-0,22	0,17	0,03	0,25	0,24	0,01	0,1

Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

Llegenda: Les cel·les relacionades amb correlació dèbil, en concret amb valors compresos entre $]-0,33; 0,33[$ no tenen cap ombreig, mentre que les cel·les que representen una correlació mitjana, és a dir, entre $[0,33; 0,66[$ o $]-0,66; -0,33]$, i forta, per valors entre $[0,66; 1]$ o $[-1; -0,66]$, estan ombrejades respectivament en gris i gris fosc; s'ha comprovat que els resultats associats a les cel·les ombrejades presenten significança estadística de l'1%.

Nota: ¹Aquestes variables es presenten amb les seves unitats originals, és a dir, en mg/kg ms, encara que en els apartats següents s'ha fet la seva transformació logarítmica. ² Els valors de correlació presentats per aquesta variable consideren totes les seves observacions, encara que en els apartats següents s'exclouen els valors atípics (*outliers*).

4.2. Relacions causals entre dues variables

En aquest punt l'objectiu és identificar les relacions causals significatives trobades entre les variables dependents (o explicatives) i possibles variables independents (o explicades). La Taula 9 únicament inclou els resultats significatius. La interpretació dels resultats s'ha de fer de la següent forma. Si una variable no resulta significativa surt assenyalada amb el símbol “-“, mentre que variables significatives amb una probabilitat del 90% ($0,05 \leq \text{Valor } P \leq 0,1$) surten representats amb els símbols “↓” o “↑” segons si un possible increment de la variable independent origina un descens o un increment en la variable dependent, respectivament. El mateix tipus de relació entre variables també es representa amb els símbols “↓↓” o “↑↑”, però a diferència dels símbols “↓” o “↑”, aquests indiquen una significança més elevada amb valors P per sota de 0,05. El valor P inferior a 0,1 es va seleccionar com a llindar per les variables que possiblement es van testar en els models econòmics a desenvolupar en l'apartat 5 d'aquest informe.

Per a la interpretació de les relacions causals (Taula 9) s'han triat especialment aquelles que presentessin una relació positiva o negativa de major significança ($P < 0,05$) i quan s'ha considerat adient també s'hi han inclòs comentaris sobre les de menor significança ($0,05 < P < 0,1$). Els resultats s'analitzen per a les variables dependents i en relació als paràmetres de procés i de disseny, als paràmetres generals de compost, als metalls pesants del compost i als impropis de la FORM. A modus d'introducció, per a cadascuna de les variables seleccionades es presenta la descripció i la dinàmica del paràmetre en el procés de compostatge.

Taula 9. Relacions causals entre variables dependents i el conjunt de variables del estudi

	Variable	Conductivitat elèctrica (CE)	Grau d'estabilitat (GE)	Metalls pesants				Impureses			Test d'auto-escalfament	% Germinació	
				Ni ¹	Pb ¹	Cu ¹	Zn	Metalls	Plàstic	Vidre			Total
Impropis	Poda	-	-	-	↓↓	↑↑	↑	-	-	↓↓	↓	-	-
	Vidre	-	↑	-	↑↑	↑↑	↑↑	-	-	-	-	-	-
	Paper	-	-	-	↑↑	↑	↑↑	-	-	-	-	-	↑↑
	Plàstic	-	-	-	↑	↑↑	↑↑	-	-	-	-	-	-
	Bosses	↑↑	-	↓	-	↓↓	-	-	-	-	↓↓	↑↑	-
	Plàstic total	-	-	-	-	-	↑↑	-	-	-	-	-	-
	Metalls fèrrics	-	↑↑	-	↑	↑↑	↑↑	-	-	-	-	-	-
	Metalls no fèrrics	-	-	-	↑↑	↑↑	↑↑	-	-	-	-	-	-
	Metalls totals	-	↑↑	-	↑↑	↑↑	↑↑	-	-	-	-	-	-
	Tèxtil	-	↑↑	-	↑	↑	-	↓↓	↑	-	-	-	-
	Tèxtil sanitari	-	↑↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Especials	↑↑	↑↑	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	-
	Voluminosos	-	-	↑↑	↑↑	-	↑	↓↓	-	↓	↓↓	-	-
	% d'impropis totals	-	-	-	↑↑	↑↑	↑↑	-	-	-	-	-	-
	Quantitat d'impropis totals	↓↓	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	-	↑↑	-	-	-	-
Entrades i sortides	Entrades de FORM	↓↓	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	-	↑↑	-	-	-	-
	FORM tractada	↓↓	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	-	↑↑	-	-	-	-
	Entrades de FV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↓↓	-	-
	FV respecte a FORM tractada ²	↑↑	-	-	-	-	-	-	↓↓	-	-	-	-
	Sortides de rebuig	↓↓	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	-	↑↑	-	-	↓↓	-
	Sortides de compost	↓↓	-	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rebuig respecte a FORM tractada	-	-	-	-	↑↑	↑↑	-	-	-	-	-	-
	Saturació	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑↑	-
Aspectes de la planta	Tecnologia descomposició no ventilada ³	↑↑	↓	↓↓	↓↓	-	↓↓	-	↓↓	-	-	↑↑	-
	Tecnologia descomposició ventilada ³	↑↑	↓	↓↓	↓↓	-	↓↓	-	↓↓	-	-	↑↑	-
	Tecnologia descomposició estàtica ⁴	↑↑	-	↓↓	↓↓	↓	↓↓	-	↓↓	↓↓	↓	↑↑	-
	Tecnologia descomposició dinàmica ⁴	↑↑	↓↓	↓	↓↓	-	↓↓	-	↓↓	↑	-	↑↑	-
	Tecnologia maduració ventilada ⁵	-	-	-	-	-	-	-	↑↑	-	-	-	-
	Tecnologia maduració dinàmica ⁵	↑↑	-	-	-	-	-	-	↑↑	-	-	-	-
	Capacitat tècnica anual	↓↓	-	↑↑	↑↑	↑	↑↑	-	↑↑	-	-	↓	-
	Temps inici tractament	↑↑	↓	↓↓	↓↓	-	↓↓	-	↓↓	-	-	↑↑	-
Durada de descomposició	-	↑	↓	-	-	-	-	-	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	

Variable	Conductivitat elèctrica (CE)	Grau d'estabilitat (GE)	Metalls pesants				Impureses			Test d'auto-escalfament	% Germinació	
			Ni ¹	Pb ¹	Cu ¹	Zn	Metalls	Plàstic	Vidre			Total
Durada de maduració	↑↑	-	↓↓	↓	-	↓↓	-	↓↓	-	↓↓	-	-
Durada total (descomposició i maduració)	-	-	↓↓	↓	↓	↓↓	-	↓↓	↓	↓↓	-	↑↑
Diàmetre tromel refi	↑↑	-	-	↓↓	-	-	-	-	-	-	↑↑	-
Durada procés de producció	↑	-	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	-	↓↓	-	↓↓	-	↑↑
Matèria seca	↑	↓↓	-	-	-	-	-	-	-	-	↑↑	↓↓
Humitat	↓	↑↑	-	-	-	-	-	-	-	-	↓↓	↑↑
pH	↓↓	-	-	-	↑↑	-	-	-	-	-	↓↓	↓↓
Matèria orgànica total	↑↑	↓↓	↓↓	-	↓↓	↓↓	-	-	-	-	↑↑	↓↓
Matèria orgànica resistent	↑	↑↑	↓↓	-	↓↓	-	-	-	-	-	↑↑	-
AT4 (Respiració als 4 dies)	-	↓↓	↓	↓↓	↓↓	↓↓	-	-	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓
Àcids húmics	↑↑	-	↓↓	↓	↓↓	↓	-	↓↓	-	-	↓↓	↓
Test Solvita	↓↓	↑↑	↓↓	-	-	↑↑	-	-	-	-	↓↓	↑↑
Escherichia Coli	-	-	↓	↓↓	-	-	-	↑↑	-	↑	-	-
Salmonella	↑↑	-	↓↓	↑↑	-	↓↓	↑	↑↑	-	-	-	↓↓
Nitrogen total	↑↑	-	↓↓	↓↓	-	↑↑	↑	-	-	-	-	-
Nitrogen amoniacal (NH4)	↑↑	-	↓↓	↓↓	-	-	-	-	-	-	↑↑	↓↓
Relació C/N	-	↓↓	-	-	-	-	-	-	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓
Potassi (K)	↑↑	-	-	↓↓	-	-	-	-	-	-	↓↓	-
Calci (Ca) ¹	-	-	↑↑	-	↑↑	↑↑	-	-	-	-	↓↓	↑↑
Ferro (Fe)	↓↓	-	↑↑	-	↑↑	↑↑	-	-	-	-	↓↓	-
Magnesi (Mg)	↓↓	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	-	-	-	-	↓↓	-
Sodi (Na)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Crom (Cr)	-	↓	↑↑	↑	↑↑	-	↓	-	-	-	↓↓	-
Cadmi (Cd)	-	-	-	-	↑↑	↑↑	↑	↑	-	-	↓↓	↑↑
Mercuri (Hg)	-	↓↓	↑↑	-	↑↑	-	-	-	-	↑↑	-	-
Fracció granulomètrica > 20mm	-	-	↓↓	↓↓	-	-	↑↑	-	-	↓	↓↓	↑↑
Fracció granulomètrica entre 10 i 20mm	↓↓	↑	-	-	↑	↑	↑↑	-	-	-	-	-
Fracció granulomètrica < 10mm	-	↓↓	-	-	-	-	↓↓	-	-	-	-	↓↓
Impureses pedres i graves	↑↑	↓↓	↓	↓	-	-	↑↑	-	-	-	-	-

Dades de compost

Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

Llegenda: El símbol "-" indica una relació no significant; "↓" o "↑" indica un relació negativa o positiva, respectivament, de significança amb un Valor P entre 0,05 i 0,1 inclusivament; i "↓↓" o "↑↑" indica una relació negativa o positiva, respectivament, de major significança amb un Valor P menor a 0,05. Les cel·les ombrejades en gris representen les variables independents prioritàries d'analitzar per cada variable dependent ja anteriorment identificades a la Taula 2.

Notes: ¹Aquestes variables es presenten amb les seves unitats originals, és a dir, en mg/kg ms, encara que en els apartats següents se n'ha fet la transformació logarítmica; ² Els valors de correlació presentats per aquesta variable consideren totes les seves observacions, encara que en els apartats següents s'exclouen els valors atípics (*outliers*); ^{3, 4 i 5} Aquestes són variables *dummy* que es llegeixen en parelles. Per exemple, les tecnologies estàtica i dinàmica són dues variables *dummy* que representen dos nivells de tecnologia en comparació a un tercer nivell referent a digestió anaeròbia. Això significa que per a l'estimació de les relacions causals, les dues variables han d'estar incloses al model de regressió, és a dir, no es pot estimar relacions causals al respecte d'una variable dependent de forma separada.

4.2.1. Conductivitat elèctrica

a) Descripció i dinàmica del paràmetre

La conductivitat elèctrica (CE) del compost és una mesura indirecta del contingut en sals solubles de la mostra, fonamentalment associada a la presència dels cations Na^+ , K^+ , Ca^{2+} i Mg^{2+} i dels anions HCO_3^- , Cl^- i SO_4^{2-} , que normalment representen més del 95% del total de sals solubles. Aquest paràmetre té molta importància quan el compost s'aplica al sòl o s'utilitza com a substrat de cultiu, atès que una salinitat excessiva és un factor limitant restrictiu de la germinació de les llavors i del creixement i desenvolupament dels cultius. A més a més, la CE del compost pot donar informació sobre els materials d'entrada i/o el funcionament del procés de compostatge. En el compost final, i també en analitzar mostres intermèdies de procés, la CE està molt relacionada amb el contingut de N-amoniacal, que és un catió (NH_4^+) inherent al procés de compostatge, que es produeix com a resultat de la desaminació de les proteïnes i altres biomolècules nitrogenades, principalment en la fase mesòfila inicial i en la termòfila, i que pot representar una part important de la CE total del material. Aquest N-amoniacal pot seguir diverses rutes, amb intensitat variable segons les característiques de la barreja inicial i les condicions de procés, durant el compostatge: volatilització en forma de gas amoníac (NH_3); incorporació a la biomassa microbiana per formar biomolècules nitrogenades; incorporació a quinones reactives en la fase inicial de la formació d'àcids húmics; romandre com a N-amoniacal en el compost; i oxidar-se biològicament a nitrat (NO_3^-) pel procés de nitrificació bacteriana. Si aquesta darrera via és significativa, els nitrats formats també tindran importància en la CE del compost final.

Quan el procés de compostatge cursa de forma adequada, i no hi ha episodis importants de rentat o lixiviació sense recirculació, s'observa un increment progressiu de la CE, que s'intensifica sota condicions ambientals de temperatura alta i humitat relativa baixa, atès que incrementen les pèrdues d'aigua de la massa en procés i concentren les sals solubles. No obstant, l'increment principal de la CE al llarg del compostatge s'origina per diverses causes, que són complementàries entre si. Aquestes s'indiquen a continuació.

En primer lloc, pels processos de descomposició i transformació de la matèria orgànica que, mitjançant la posterior mineralització, incorporen ions solubles a la matriu compostable (NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , etc.) que es trobaven immobilitzats formant part de biomolècules orgàniques de les matèries primeres i que, per tant, no generaven salinitat.

Segonament, pels altres ions que s'han pogut solubilitzar dels impropis existents en la barreja, degut a les condicions favorables a la solubilització que es produeixen durant el compostatge (especialment pH àcid en una part de la fase de descomposició, augment de la superfície de les partícules dels impropis per fragmentació, etc.).

En tercer lloc, també romanen en el compost els ions que ja eren solubles en les matèries primeres o en els impropis (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , etc.).

Una darrera font de ions solubles en el compost pot procedir de les sals solubles de l'aigua de reg que s'incorpora, usualment, en els processos de compostatge de la FORM en

ambients mediterranis, per mantenir una humitat adequada, i també de l'aplicació de reg amb lixiviats de procés durant a la fase de descomposició.

Tots aquest ions solubilitzats o ja solubles des de l'inici formaran part de la fracció matèria mineral del compost, juntament amb els altres components minerals insolubles constitutius de les partícules del compost i de les impureses que hi puguin haver. Tenint en compte el principi general de Haug (1993), que diu que en el procés de compostatge es conserva la matèria mineral, el compost contindrà tots els components minerals, tant els solubilitzats de les matèries primeres com dels impropis, com els que ja eren solubles i, evidentment, les fraccions minerals insolubles del compost que són la fracció quantitativament més important de la seva matèria mineral. Com que el procés de compostatge oxida una bona part de la matèria orgànica, el contingut absolut en matèria orgànica total del compost haurà disminuït fortament (amb més intensitat quan millor s'hagi fet el procés) i, en conservar-se la totalitat de la matèria mineral, la concentració percentual mineral serà molt més alta. La component soluble d'aquesta fracció, la procedència de la qual s'ha indicat anteriorment, serà la responsable de l'augment de CE al llarg del procés i en el compost final. Addicionalment, el % de humitat del compost també afecta la seva CE: a igualtat de contingut total en sals solubles, la CE del compost serà més alta quan més sec sigui per efecte de concentració de les sals. Com a norma general, quan més intensa hagi estat la mineralització de la matèria orgànica durant el compostatge, és a dir quan millor hagi cursat el procés, major serà la CE del compost final. Com ja s'ha comentat inicialment, aquest presumible increment no s'observarà, ho farà amb menor intensitat, o fins i tot s'observarà una disminució, si el material en procés o el compost final s'han rentat.

Tot seguit es presentaran i discutiran les relacions causals observades entre la Conductivitat Elèctrica del compost i les diferents variables de l'estudi, agrupades en 4 tipologies: paràmetres de procés i de disseny, paràmetres generals del compost, metalls pesants del compost i impropis de la FORM.

b) Relacions amb els paràmetres de procés i de disseny

La CE del compost mostra elevada relació negativa amb la FORM entrada i tractada, les sortides de rebuig, les sortides de compost i la capacitat tècnica de la planta. Contràriament, presenta elevada relació positiva amb la fracció vegetal respecte a FORM tractada, la tecnologia de maduració dinàmica, el temps d'inici del tractament, la durada de maduració i el diàmetre del tromel de refí. Complementàriament, tot i que amb menor significança, s'observa relació positiva amb la durada del procés de producció i negativa amb la tecnologia de maduració ventilada.

Els resultats indiquen que les plantes més petites (de baixa capacitat i que entren i tracten poca FORM) i amb poca sortida de compost i de rebuig presenten una CE més elevada en el compost. La justificació es podria trobar en que les plantes petites controlen més el procés, tenen més temps i espai i poden allargar el procés, de manera que es descompon més matèria orgànica fàcilment degradable i per tant augmenta la mineralització; aquest augment de la mineralització fa incrementar components minerals solubles que comporten

un increment de la CE. Això es podria corroborar si, a més a més, les plantes més petites tenen un procés més llarg i una matèria orgànica més baixa.

D'altra banda, també es desprèn que les plantes que triguen més temps a iniciar el procés de tractament i que obtenen un producte de mida granulomètrica major presenten major conductivitat. És esperable que si s'allarga el contacte entre els impropis i la fracció orgànica, especialment durant la primera fase on les condicions són químicament més agressives i afavoreixen la migració de metalls i altres components solubilitzables en medi àcid cap a la matriu orgànica, hi hagi una CE final superior. Per tant, tota reducció d'aquest contacte anirà abocada a reduir la CE del producte. Respecte el tromel de refí, caldria esperar que si és més fi augmentés la CE perquè és en les partícules més petites acostumen a portar més components minerals, però el que també pot succeir és que en augmentar el diàmetre del tromel de refí passin més partícules de recirculat vegetal, la CE del qual és més elevada i per tant contribueixi a augmentar-la, tal com s'ha trobat en aquest estudi.

Complementàriament, quan augmenta la durada de maduració i quan es fa volteig en aquesta fase (maduració dinàmica) es detecta un augment de la CE; aquest comportament és clarament explicable pel fet que en allargar el temps i/o afavorir el procés per volteig augmenta el grau de transformació biològica, comportant un augment de la mineralització i, per tant, de la presència de components minerals solubles. També s'ha observat que en augmentar la proporció de FV respecte a la FORM tractada es promou un augment de la CE. Aquesta relació podria semblar anòmala ja que la FV presenta una CE molt menor que la FORM i, per tant, si l'enginyeria de procés fos la mateixa, les plantes que incorporen més fracció vegetal haurien d'obtenir un compost de menor salinitat. No obstant, és molt habitual que aquestes plantes facin un procés més llarg, amb major degradació de matèria orgànica (estabilitzant i madurant millor el compost) i, per tant, augmentant el seu grau de mineralització, i com a conseqüència la CE del compost.

Tot i que amb menor significança, també s'ha detectat que la CE del compost augmenta amb la durada del procés de producció i disminueix quan s'aplica ventilació en maduració. Aquest comportament reforça tot el que s'ha comentat anteriorment en relació a que processos més llargs augmenten la mineralització; afegint informació d'interès pel que fa a ventilar en maduració. Aquesta operació, per una banda, afavoreix la pèrdua de nitrogen amoniacal per volatilització cap a l'atmosfera en forma d'amoníac gas i que, per tant, disminueix la CE del compost; d'altra banda, com que la maduració estàtica no fragmenta les partícules es redueix la mineralització de la MO i, per tant, la producció d'ions solubles.

c) Relacions amb els paràmetres generals de compost

La CE mostra relacions negatives d'alta significança amb el test de germinació, test Solvita, pH, Fe, Mg i fracció granulomètrica 10-20mm. Contràriament, s'observen relacions positives d'alta significança amb test d'autoescalfament, matèria orgànica total (MOT), àcids húmics, Salmonella, nitrogen total, nitrogen amoniacal, potassi i impureses de pedres i graves. Tot i que no s'ha observat relació causal de la CE amb el contingut en sodi, cal considerar que la matriu de correlació de la Taula 10 indicava una correlació positiva molt alta (+0,80). Per

aquest motiu, i pel fet que el contingut en sodi és molt rellevant en la salinitat del compost, la discussió dels resultats es fa com si hi hagués relació causal.

Complementàriament, però amb menor significança, s'observen relacions positives amb el % matèria seca i la MOR i negativa amb el % d'humitat. La CE clarament influeix en la germinació de llavors, com es veu a través de la relació amb el percentatge de Germinació, de manera que una elevada salinitat produeix una baixa germinació, fet atribuïble a l'efecte inhibidor general de la CE sobre la germinació de llavors, que es comentarà en l'apartat 6. Pel que fa al test Solvita, cal tenir en compte que un dels dos components d'avaluació és la presència de N en forma d'amoniac en el compost, que està en equilibri amb la forma amoniacal: quan més alta sigui la concentració menor és el valor del test; en augmentar la concentració d'amoni/amoniac disminueix el valor del Solvita, situació que ve determinada per un major contingut d'amoni, que comporta un increment de la salinitat. La relació negativa de la CE amb el pH vindria determinada per la presència de processos de nitrificació durant la fase de maduració que, en incorporar ions hidrogen (H^+) al medi fan disminuir el pH. Els composts més madurs, que deriven de processos de compostatge més llargs i millor gestionats, són, com s'ha comentat abans, els que mostren més mineralització (CE superiors). En aquests processos és molt probable que una part del nitrogen amoniacal durant la fase de maduració es transformi en nitrat, disminuint el pH, la qual cosa explica la relació negativa entre CE i pH. Aquest efecte de la nitrificació es podria comprovar si es disposés de la mesura de nitrats en els composts. La disminució de la CE associada a l'increment de Fe total i també de Mg total en el compost, derivaria de la molt baixa solubilitat del Fe en medi bàsic i de la baixa solubilitat del Mg quan està integrat en components orgànics o inorgànics del compost. La relació negativa amb la fracció granulomètrica 10-20 mm contradiu en certa manera l'observació feta en l'apartat anterior de paràmetres de procés i de disseny, on augmentava la CE si augmentava el diàmetre de refí, que com a màxim és de 16 mm. En qualsevol cas, el fet que el diàmetre de llum de pas del garbell sigui una o altra mida, no condiciona la distribució de partícules que es pugui donar en les de diàmetre inferior. Pot ser que en dues mostres, totes passades en tamís de 10 mm, una de les dues presenti una major proporció de fracció 10-20 mm que l'altra. No obstant, no s'ha trobat correlació de la CE amb les partícules de diàmetre < 10mm.

Pel que fa a les relacions positives, indicar que l'augment de la CE que s'observa en incrementar el contingut del compost en K, Na i N-amoniacal és totalment esperable atès que es tracta d'ions d'alta solubilitat. Complementàriament, el fet que en augmentar la CE del compost s'observin increments en àcids húmics i en N-total derivaria, indirectament, de que la major mineralització està associada a una millor maduració del compost i, per tant, a un augment en la humificació i en la integració del nitrogen en formes orgàniques, principalment les resistents. L'increment de CE detectat en els composts que mostren temperatures més altes en el test d'autoescalfament i major contingut de MOT, vindria determinat de forma indirecte a través del nitrogen amoniacal. Els composts amb menor estabilitat i poc madurs presenten un valor elevat de temperatura en el test d'autoescalfament i major contingut en matèria orgànica, atesa la menor degradació. En aquests composts el contingut de nitrogen amoniacal és alt, la qual cosa comporta un augment de la seva CE. La presència de *Salmonella* en els composts és un indicador d'higienització deficient, i per tant, d'una fase termòfila massa curta o amb poc increment de la temperatura; la relació positiva de la CE amb la presència de *Salmonella* també podria

derivar, indirectament, d'un nivell més elevat de N-amoniacal en processos amb fase termòfila deficient on disminueixen les pèrdues de amoníac cap a l'atmosfera. L'augment de la CE amb l'increment de pedres i graves en el compost indicaria que aquestes partícules presenten components salins.

Tot i que amb menor significança, s'observa que la CE dels composts és més alta en els que tenen menys humitat, atès l'efecte de concentració de sals per un mateix pes de mostra, i en els que tenen un contingut en matèria orgànica resistent (MOR) superior. Aquesta darrera relació, vindria determinada pel fet que l'augment de MOR implica major estabilitat i, per tant, s'associa a composts més mineralitzats que són més salins.

d) Relacions amb els metalls pesants del compost

No s'han trobat correlacions rellevants de la CE amb els metalls del compost, situació esperable ates que els metalls pesants són molt minoritaris en la massa del compost. No obstant, tot i que amb un nivell de significança baix (P entre 0,05 i 0,1) es detecta una disminució de la CE amb l'increment de Ni i Cu en el compost, relació no fàcilment justificable.

e) Relacions amb els impropis de la FORM

S'han trobat relacions d'alta significança de signe positiu amb les fraccions bosses de plàstic i especials dels impropis de la FORM i negatiu amb la quantitat d'impropis totals.

Les relacions positives amb la fracció bosses de plàstic no es poden atribuir al seu component de plàstic, atès que la seva degradació física no genera ions solubles, sinó a la brutícia líquida o sòlida que les acompanya, tant en el seu origen a les llars com en entrar en contacte amb la FORM i altres impropis en els contenidors de recollida selectiva i, també, en els acopis a les plantes abans d'entrar i/o durant el procés. Les bosses i fragments de bosses incorporades en el procés són films no permeables que retenen aigua amb substàncies dissoltes i són aquestes les que generen salinitat. Pel que fa a l'efecte dels impropis especials cal indicar que una part dels seus components que han ingressat a procés es va degradant física i químicament, tant abans com durant el procés de compostatge, produint substàncies solubles, principalment inorgàniques, que augmenten la CE del compost final.

Pel que fa a relacions negatives, en augmentar la quantitat d'impropis totals es detecta una disminució de la CE. Aquest fet és atribuïble a que, globalment, les diferents fraccions dels impropis (especialment el vidre, els metalls fèrrics i no fèrrics i els plàstics) que hagin entrat en procés són molt menys generadores de compostos salins que la FORM, atesa la naturalesa de matèria orgànica, majoritàriament degradable, d'aquesta fracció. Complementàriament, les plantes que entren més impropis usualment fan processos més curts i menys eficients, amb menor degradació de MO i per tant menys mineralitzats, fets que comporten una menor CE en el compost.

4.2.2. Grau d'estabilitat

a) Descripció i dinàmica del paràmetre

El grau d'estabilitat és un paràmetre que avalua l'estabilitat química de la matèria orgànica d'un material orgànic, en aquest cas del compost. D'una manera simplificada es pot indicar que la matèria orgànica està constituïda per dues fraccions: la matèria orgànica degradable (MOD), constituïda per components fàcilment degradables, i la matèria orgànica resistent (MOR), constituïda per components poc o molt poc degradables. El mètode emprat per a la seva determinació sotmet la mostra a una doble hidròlisi àcida, amb l'objectiu de digerir els components de fàcil degradació i obtenir, com a fracció residual de la digestió química, la MOR. El residu sec es sotmet a un procés de calcinació i, per gravimetria indirecta, es determina la MOR. Paral·lelament, es determina el contingut en matèria orgànica total (MOT) d'una mostra del material per calcinació. El Grau d'Estabilitat química (GE) del material, expressat en %, serà: $GE(\%) = [\%MOR / \%MOT] \times 100$. Complementàriament, la MOD (%) = $\%MOT - \%MOR$.

En el decurs d'un bon procés de compostatge es produeix una forta reducció de la MOT del material en procés, que afecta molt majoritàriament a la MOD mentre que la MOR roman o augmenta si es produeix la desitjada humificació. Per tant, el GE del compost serà més elevat quant més s'hagi reduït la MOD i incrementat la MOR, essent aquest paràmetre un bon indicador de l'estabilitat del compost.

Tot seguit es presentaran i discutiran les relacions causals observades entre el grau d'estabilitat química i les diferents variables de l'estudi, agrupades en 4 tipologies: paràmetres de procés i de disseny, paràmetres generals del compost, metalls pesants del compost i impropis de la FORM.

b) Relacions amb els paràmetres de procés i de disseny

No s'han observat relacions d'alta significança (ni positives ni negatives) del GE amb els paràmetres de procés i de disseny de les plantes. No obstant, amb menor significança, s'ha detectat relació positiva amb la durada de descomposició i negativa amb la tecnologia de maduració dinàmica i amb el temps d'inici de tractament.

La tendència a augmentar el GE del compost en incrementar la durada de la fase descomposició és atribuïble a una major degradació de la matèria orgànica durant aquesta fase, que afecta majoritàriament la fracció degradable, el que fa que proporcionalment passi més matèria orgànica resistent a maduració, promovent un augment del GE. Contràriament, l'estabilitat del compost tendeix a ser menor quan més temps triga la planta a iniciar al tractament, fet atribuïble a una pèrdua prèvia de matèria orgànica i a condicions anaeròbiques en el temps d'espera per entrar en línia. La tendència a disminuir el grau d'estabilitat amb la tecnologia de maduració dinàmica, sembla suggerir que la maduració dinàmica tendeix a limitar l'estabilització del compost bé perquè els nivells d'oxigen són insuficients i/o perquè el volteig asseca massa el material, restringint l'activitat biològica.

c) Relacions amb els paràmetres generals de compost

Es detecten relacions negatives d'alta significança amb impureses de vidre, %matèria seca, matèria orgànica total (MOT), AT4, relació C/N, fracció < 10mm i impureses pedres i graves. Contràriament, es troben relacions positives d'alta significança amb humitat, matèria orgànica resistent (MOR) i Test Solvita. Amb menor significança es detecten relacions negatives amb impureses (suma metalls, plàstic i vidre) i el test d'autoescalfament i positives amb la fracció 10-20 mm.

El grau d'estabilitat del compost augmenta en incrementar el contingut en MOR i en disminuir la relació C/N del compost, tal com ha de succeir quan més estable i madur és el producte. Complementàriament, i per la mateixa raó, en augmentar el valor del test Solvita (baixes emissions de CO₂ i d'amoníac) i disminuir l'AT4 (menor respiració) augmenta el GE. Tot i que amb menor significança, aquest comportament també es detecta amb el test d'autoescalfament, ja que quan més alta és la temperatura del test (major respiració) menor és el GE. La relació negativa d'alta significança del GE amb la MOT deriva del fet que alts continguts de MOT en el compost final són indicadors de poca transformació biològica i per tant de menor estabilitat. La relació positiva del GE amb la humitat del compost (i negativa amb el % matèria seca), posen de manifest que el procés d'estabilització biològica requereix una determinada humitat del material en procés, especialment, durant la fase de maduració, que és prèvia a l'afinat. Una menor humitat en el compost significa que el material en maduració és també més sec i que per tant hi ha hagut menys activitat biològica. En augmentar les impureses de materials inerts (no orgànics) s'observa una disminució del GE que és d'alta significança per les pedres i graves i vidre més dèbil per la suma de vidre, metalls i plàstic. Aquest comportament ve determinat perquè la presència d'aquestes impureses en la massa del compost fa disminuir, proporcionalment, els continguts en MOT i MOR i, per tant el GE. La disminució del GE en augmentar la fracció més fina del compost (<10mm) sembla anòmla ja que les fraccions més fines són les més transformades i, per tant, haurien de mostrar un GE més elevat. No obstant, cal tenir en compte que el tall granulomètric és força alt (10 mm) i que la part superior del tall pot tenir partícules poc transformades.

d) Relacions amb els metalls pesants del compost

Només s'han detectat dues relacions negatives del GE amb els metalls pesants: una d'alta significança amb el Hg i l'altra de menor significança amb el Cr. Dins del grup del metalls pesants, el mercuri i el crom són dos dels elements més tòxics pels microorganismes del compostatge. La relació trobada sembla indicar que l'activitat biològica durant el procés de compostatge ha estat limitada per un cert grau de toxicitat de Hg i Cr, comportant un menor GE, sigui perquè s'ha degradat menys MOT i/o perquè s'ha assolit un contingut menor de MOR.

e) Relacions amb els impropis de la FORM

S'observen relacions positives del GE del compost amb alta significança amb els metalls fèrrics, metalls totals, tèxtil, tèxtil sanitari i impropis especials i amb menor significança amb el vidre. No es troba cap argument que permeti explicar aquests augments de l'estabilitat del compost en augmentar el contingut d'impropis de la FORM, especialment pel que fa referència als inorgànics (metalls fèrrics, metalls totals, especials i vidre) ja que en no contenir matèria orgànica no poden generar MOR. La relació amb el tèxtil i el tèxtil sanitari es podria justificar ja que permeten introduir components cel·lulòsics i lignocel·lulòsics amb potencial productor de MOR.

4.2.3. Metalls pesants en el compost

a) Descripció i dinàmica del paràmetre

El contingut en metalls pesants del compost expressa el contingut total (mg/kg) de cadascun dels 7 elements químics que constitueixen aquest grup d'acord amb la legislació vigent: Cadmi (Cd), Coure (Cu), Níquel (Ni), Plom (Pb), Zinc (Zn), Mercuri (Hg) i Crom (Cr).

Els metalls pesants que es troben en el compost poden tenir diferents orígens:

1) Per una banda, i com a font ineludible, els metalls pesants existents en les matèries primeres del procés, en aquest cas la fracció orgànica dels residus municipals (FORM) i la fracció vegetal (FV) que s'utilitza com a material complementari. El contingut en metalls pesants d'aquestes matèries primeres és variable, segons la tipologia i origen dels seus components, però generalment és baix, tot i que major a la FORM que a la FV però molt més alt en la fracció vegetal recirculada (FVR), com es comentarà més endavant;

2) Complementàriament, es poden introduir metalls pesants en el procés de compostatge procedents de materials acompanyants de les dues matèries primeres, atès que la recollida selectiva de cadascuna d'aquestes fraccions dels residus municipals, per bona que sigui, sempre conté algun material no propi. En el cas de la FORM es denominen impropis a tots aquells materials que no són FORM: vidre, paper i cartró, plàstic (mixtos i film), bosses plàstic, metall fèrric, metall no fèrric, tèxtil, tèxtil sanitari, residus especials, residus voluminosos i altres. En el cas de la FV, constituïda principalment de residus de poda, també hi pot haver impropis diversos, principalment bosses de plàstic i metalls, però també d'altres. Una bona part d'aquests impropis de la FORM o del la FV poden contenir algun/s d'aquells metalls pesants i transferir-los a les matèries primeres i/o a la barreja en procés. En aquests context, la transferència es pot fer en els contenidors de recollida selectiva, essent aquesta molt superior en el cas de la FORM degut a la seva alta humitat i reacció àcida, però també en els processos de tria i selecció de la FORM a les plantes, on mai s'aconsegueix l'eliminació total dels impropis i, per tant, una part d'ells s'incorporaran al procés de compostatge. La gestió de la FV a les plantes tampoc aconsegueix eliminar totalment els seus impropis. Quan més impropis hagin ingressat en el procés de compostatge, més risc hi ha d'incorporar els metalls pesants que contenen a la matriu compostable. Part d'aquests metalls pesants es poden solubilitzar des dels impropis, ateses les condicions químiques favorables que es

donen sobretot en la fase de descomposició (on s'instaura inicialment pH àcid), i aquesta fracció solubilitzada, en alta proporció es trobarà en el compost. En el procés d'afinat final del compost s'eliminen com a rebuig una part d'aquests materials procedents dels impropis, però la selecció no és total i aquesta ineficàcia serà la responsable de trobar impureses en el compost de diversa naturalesa: metalls, plàstic, vidre, pedres i graves, etc. Aquestes impureses, en contenir metalls pesants, promouran un increment del contingut total de cadascun dels metalls;

3) El procés d'afinat final genera una fracció grollera constituïda fonamentalment per fracció vegetal de mida superior en el tromel de refí que en la major part de les plantes de compostatge es torna a incorporar en el procés, denominant-se en aquest cas fracció vegetal recirculada o recirculat vegetal (FVR). Ultra altres consideracions en relació a les característiques d'aquest material, la FVR té un contingut molt més elevat en metalls pesants que la FV nova i aquesta concentració augmenta quan més vegades es recircula. L'augment de metalls pesants en aquesta fracció es produeix per transferència des dels altres components de la matriu en compostatge i, amb molt bona part des dels impropis que s'hi han incorporat; i

4) De forma complementària a les tres fonts de metalls pesants descrites anteriorment, també cal indicar que la maquinària de procés, molt especialment les màquines de voltejar i les pales autopropulsades, van sofrir un desgast que incorpora aliatges metàl·lics al material en procés que poden contenir diversos metalls pesants.

El present estudi es centra en els continguts en 4 dels 7 metalls pesants que estableix la legislació vigent, concretament en Ni, Pb, Cu i Zn, per indicació de l'Agència de Residus de Catalunya, atès que aquests són el que més limiten la qualitat dels composts de FORM produïts a les plantes de Catalunya.

Els resultats de les relacions causals del quatre metalls pesants es presentaran i discutiran de forma conjunta en cadascun dels quatre apartats que agrupen les variables de l'estudi, atès que amb elevada freqüència es troben relacions que són comunes a més de dos dels 4 metalls pesants.

b) Relacions dels 4 metalls amb els paràmetres de procés i de disseny

Pel que fa al **Níquel**, s'han detectat relacions causals positives d'alta significança amb les entrades de FORM i FORM tractada, amb les sortides de rebuig i amb la capacitat tècnica de les plantes (4 variables). Altrament, la tecnologia de descomposició estàtica, el temps d'inici de tractament, la durada de maduració, la durada total (descomposició i maduració) i la durada del procés de producció (5 variables) mostren relació negativa també d'alta significança. Complementàriament, però amb menor significança, s'observa relació positiva amb les sortides de compost i negativa amb la durada de descomposició.

En el **Plom** s'observen relacions causals positives d'alta significança amb les mateixes variables (4) que amb el Ni (entrades de FORM i FORM tractada, sortides de rebuig i capacitat tècnica de les plantes). Pel que fa a les relacions negatives d'alta significança se'n

troben amb 3 de les observades amb el Ni (la tecnologia de descomposició estàtica, el temps d'inici de tractament i la durada del procés de producció) i, a més a més amb el diàmetre del tromel de refí. Amb menor significança, es troben relacions positives amb la durada de maduració i la durada total (descomposició i maduració), que eren d'alta significança amb el Ni; addicionalment, amb el Pb també es detecta relació positiva de menor significança amb la tecnologia de maduració ventilada.

En el **Coure**, hi ha relacions causals positives d'alta significança amb 3 variables comunes amb el Ni i el Pb (entrades de FORM, FORM tractada i sortida de rebuig) i també amb el rebuig respecte a FORM tractada; i amb menor significança es troba relació positiva amb la capacitat tècnica de les plantes, variable que era d'alta significança amb el Ni i el Pb. Pel que fa a les relacions negatives se'n detecten amb 2 de comunes amb el Ni i el Pb (tecnologia de descomposició estàtica i durada del procés de producció) i amb menor significança amb la durada total (descomposició+maduració), que era d'alta significança amb el Ni i també de menor significança amb el Pb.

Pel que fa al **Zinc**, es detecten relacions positives d'alta significança amb les 4 variables comunes amb el Ni i el Pb (Entrades FORM, FORM tractada, sortida de rebuig i capacitat tècnica) i també amb el rebuig respecte a FORM tractada que també ho era amb el Cu. Es detecten relacions negatives d'alta significança amb les 4 de les 5 detectades pel Ni (temps inici tractament, durada de maduració, durada total (des+mad) i durada procés de producció). Complementàriament es troba relació positiva de menor significança amb la tecnologia de maduració ventilada que també ho era amb el Pb.

Pel que fa a la discussió de les relacions positives, a mesura que augmenta la mida de les plantes (quantitats de FORM entrada i tractada, de rebuig generat i capacitat tècnica) s'observa un augment de concentració dels 4 metalls pesants estudiats (Ni, Pb, Cu i Zn) en el compost produït. Les plantes més grans, generalment, tenen una qualitat de FORM inferior, associada principalment amb un major contingut d'impropis, que és una font important d'entrada de metalls pesants en el procés. Complementàriament es detecten també augments en el Cu i el Zn en les plantes que generen més rebuig respecte a la FORM tractada.

Respecte de les relacions negatives, contràriament, en augmentar la durada del procés i la durada de descomposició+maduració es produeix una disminució de la concentració dels 4 metalls pesants en el compost. Complementàriament, l'augment de la durada de maduració també fa disminuir el contingut en Ni, Zn i Pb. Aquests resultats podrien semblar anòmals, atès que en augmentar la durada del tractament total, caldria esperar una major degradació de la fracció orgànica que comportaria un increment relatiu dels components minerals, i per tant també dels metalls pesants. No obstant, cal tenir present que les plantes que fan processos més llargs són les que tracten una FORM de millor qualitat, amb menys impropis i metalls pesants, essent aquesta la causa que el compost que produeixen en tingui menys. També com a relació negativa, es detecta una disminució del contingut en Ni, Pb i Zn en augmentar el temps fins a l'inici de tractament. Aquest comportament seria atribuïble a la major duració de les condicions de reacció àcida i alta humitat que es produeixen en el temps d'espera a entrar en línia que afavoreixen la solubilització dels metalls i, per tant, la seva transferència als lixiviats de recepció; com a conseqüència, el nivell de metalls que

ingressen a procés és més baix. El fet que la tecnologia de descomposició estàtica, confrontada amb la dinàmica, comporti disminució del contingut en 3 (Ni, Pb i Cu) dels 4 metalls pesants del compost és atribuïble a que la migració dels metalls pesants des dels impropis o altres materials cap a la matriu compostable és molt menor en l'estàtica ja que en no haver-hi volteig ni trencament físic de partícules, la superfície de contacte per la migració està limitada. La disminució de Pb observada amb menor significança quan augmenta el diàmetre del tromel de refí seria atribuïble a que les fraccions més grolleres del compost tenen un contingut menor en Pb (fracció vegetal recirculada i altres materials orgànics poc transformats i/o també inorgànics o inerts grollers).

c) Relacions dels 4 metalls amb els paràmetres generals de compost

En referència al **Níquel**, s'observen relacions causals positives d'alta significança (3) amb els continguts de Ca, Fe i Mg del compost. Contràriament, la relació és negativa d'alta significança amb 10 variables: CE, continguts en MOT, MOR, àcids húmics, N-total, N-amoniacal i fracció >20mm del compost i amb els resultats del test d'autoescalfament (TA), test Solvita i presència de *Salmonella*. Complementàriament, però amb menor significança, es detecten relacions negatives amb 3 variables: AT4, presència de *E. coli* i impureses de pedres i graves.

En el cas del **Plom**, també hi ha 2 relacions causals positives d'alta significança: contingut en Mg (comuna amb el Ni) i nivell de *Salmonella* (contrària amb el Ni ja que hi tenia signe negatiu). Altrament, s'observen relacions negatives d'elevada significança en 7 variables: 3 comunes amb el Ni (N-total, N-amoniacal i fracció >20mm), 2 que eren també negatives però de menor significança en el Ni (AT4 i *E. coli*) i també amb les impureses de metalls i el contingut en potassi. Complementàriament, s'observen relacions negatives de menor significança amb la CE i els àcids húmics del compost (que eren del mateix signe però de major significança en el Ni) i amb les impureses de pedres i graves, tal com succeïa en el Ni.

Pel que fa al **Coure**, es detecten 4 relacions positives d'alta significança: Mg (comuna amb Ni i Pb), Ferro i Magnesi (comunes amb Ni) i també amb el pH. Contràriament, hi ha 5 relacions negatives d'alta significança: 4 de comunes amb el Ni (test d'autoescalfament, MOT, MOR i àcids húmics), i una de comuna amb el Plom (AT4). Complementàriament, s'observen relacions de menor significança de signe positiu amb les impureses de plàstics, % de germinació i fracció granulomètrica 10- 20mm ; i de signe negatiu amb la CE (igual que en el Pb i que ho era amb major significança en el Ni).

En el **Zinc**, s'observen 6 relacions causals positives d'elevada significança: Fe, Ca i Mg (comunes amb Ni i Cu), impureses de plàstic (que era de menor significança en el Cu), test Solvita (que era de signe negatiu i alta significança en el Ni) i N-total (que era de signe negatiu i alta significança en Ni i Pb). Complementàriament, es troben relacions de menor significança de signe positiu amb la fracció de 10-20mm (comuna amb Cu) i de signe negatiu amb el contingut d'àcids húmics (que era també negativa però d'elevada significança en el Ni i el Cu).

En relació a la discussió de les relacions positives, l'augment de Ni, Cu i Zn amb la concentració de Fe del compost podria venir determinada per l'estreta relació existent entre aquests metalls en els aliatges industrials del Fe amb Ni, Cu i Zn. Aquesta font d'entrada de Fe amb Ni, Cu i Zn derivaria de la presència d'impropis metàl·lics en la FORM d'entrada i, potser en part del desgast de la maquinària de procés. En aquest sentit, com es comentarà més endavant, s'ha trobat relació causal del Cu, Ni i Pb amb la fracció d'impropis metalls totals, però no amb el Ni, que la mostra amb els impropis totals i els voluminosos. La relació directe entre la concentració de Ni, Cu i Zn amb les de Ca i Mg del compost i la del Pb amb el Mg podrien derivar de la presència de Ni, Cu, Zn i Pb com a metalls pesants acompanyants en les roques que contenen calci i magnesi, majoritàriament sedimentàries però també ígnies. A més a més, i com a consideració global, els increments dels 4 metalls pesants amb l'augment de diversos components minerals del compost (Fe, Ca i Mg) es podrien justificar com un efecte indirecte de l'augment de la fracció mineral, que afecta a tots els minerals, siguin o no metalls pesants. De fet, i com es veurà en les relacions negatives, la concentració en Ni, Cu i Zn del compost disminueix quan augmenta el contingut en MOT del compost és a dir quan la fracció mineral és menor.

També s'ha observat increment de Zinc, i en menor grau del Cu, en augmentar les impureses de plàstic en el compost, podrien derivar de l'ús d'òxids de Zn i Cu en els processos de síntesi dels plàstics i també del Zn emprat com a pigment en els plàstics. En relació al Coure també es detecta un augment quan el pH del compost és més alt, que és podria atribuir a la disminució de la solubilitat del Zn en augmentar el pH.

Els augments del Test Solvita i del N-total amb el contingut en Zinc són anòmals i es discutiran en el següent apartat.

Per últim, pel que fa a les relacions negatives, la concentració de metalls pesants del compost disminueix quan augmenten la respiració (AT4; Pb, Cu, Zn i Ni), el contingut en MOT (Ni, Cu i Zn), la temperatura del test d'autoescalfament (Ni, Cu i Zn) i també amb l'augment del N-amoniacal (Ni i Pb). Aquestes disminucions del contingut en metalls pesants derivarien de processos de compostatge incomplets o mal gestionats, on la degradació de la matèria orgànica ha estat baixa i, per tant, la concentració relativa de minerals, entre ells els metalls pesants, serà menor. En aquestes condicions hi ha encara una fracció elevada de matèria orgànica degradable que fa que l'activitat biològica (TA i AT4) sigui alta i acompanyada de nivells alts de N-amoniacal. Complementàriament, en aquestes condicions és produïria una higienització deficient (patògens alts), és a dir una relació negativa entre concentració de metalls pesants i els patògens tals com s'ha trobat: *Salmonella* (Ni i Zn) i *Escherichia coli* (Pb i Ni).

Altrament, també es detecten relacions negatives que tenen un sentit contrari: dels 4 metalls pesants amb el contingut en àcids húmics; de la concentració de Ni, Pb i Cu amb la CE; del Ni i Cu amb el contingut en MOR; del Ni i Pb amb el Ntotal; i del Ni amb el test Solvita. Aquestes respostes, en contrast amb les del grup anterior, són indicadores de bon funcionament del procés: augments de la humificació, de la MOR, de la CE i del test Solvita, amb producció d'un compost molt més estable i madur que en el cas anterior. Aquestes característiques es presenten en les plantes que tracten una FORM de major qualitat, amb menor entrada de metalls pesants i tot i que el procés sigui més llarg i hi hagi més

mineralització la concentració final de metalls pesants és inferior. No obstant, cal indicar que aquesta argumentació no admet el comportament del Zinc en relació al test Solvita i al N-total, atès que mostrava una relació positiva, com s'ha indicat en l'apartat anterior. La relació negativa del Ni i del Pb amb la fracció granulomètrica més gruixuda (>20mm) ve determinada perquè les fraccions més grolleres estan menys mineralitzades i, per tant, tindran menys metalls.

Finalment s'ha detectat disminució de Pb amb l'augment del contingut en K i de les impureses de metalls. La disminució amb l'augment de potassi es pot justificar per un efecte de dilució directe ja que quan més potassi hi ha a la matèria mineral, proporcionalment hi haurà menys metalls pesants, en aquest cas Pb. Pel que fa a les impureses metalls, la relació negativa indicaria que aquesta fracció té poc plom i que el seu augment en el compost produiria un efecte de dilució.

d) Relacions dels 4 metalls pesants amb els metalls del compost

En cap dels quatre metalls pesants analitzats s'han detectat relacions causals negatives (sigui quina sigui la significança) amb els altres metalls pesants. En tots els casos les relacions han estat positives.

En relació al **Níquel**, s'han detectat 4 relacions positives d'alta significança (Cu, Zinc, Cr i Hg) i cap de baixa significança.

Pel que fa al **Plom**, s'observen 2 relacions positives d'alta significança (Cu i Zn) que són comunes amb el Níquel i 1 de menor significança amb el Cr, que era d'elevada significança en el Níquel.

En el **Coure** es detecten 6 relacions positives d'alta significança: Zn (comuna amb Ni i Pb), Cr i Hg (comunes amb Ni i pel que fa al Cr, però amb menor significança, també amb el Pb), Ni, Pb i Cd. És a dir el Coure les presenta amb la totalitat dels altres metalls pesants del compost.

Finalment, en el **Zinc**, es troben 2 relacions positives d'alta significança: Cu (comuna amb Ni i Pb) i Cd (comuna amb el Cu) i 2 de menor significança (Ni i Pb, que eren d'elevada significança amb el Coure)

Per la discussió d'aquestes relacions positives, aquest comportament indica que quan augmenta el contingut d'un determinat metall pesant en el compost també es produeixen augments en una bona part dels altres; la màxima dependència es troba en el Cu, l'augment del qual cursa amb increment de tots els altres 6 metalls pesants (Ni, Pb, Zn, Cr, Cd i Hg), i la menor amb el Pb, que cursa amb augments de Cu, Zn i Cr. Aquesta relació positiva seria atribuïble a la presència de diversos metalls pesants en diferents aliatges dels impropis de la FORM o dels elements metàl·lics de la maquinària de procés (Cu, Zn, Cr, Ni), impropis metàl·lics no fèrrics (Cr, Cu, Zn, Pb i Cd), mentre que la relació amb el Hg podria derivar d'impropis especials com les piles de botó. Complementàriament els metalls pesants també poden derivar del color i la pintura d'alguns components dels impropis tals com plàstics,

llaunes, vidres i altres de color o pintats, quan s'han utilitzat pigments minerals derivats de diversos metalls pesants (Zn, Cu, Cr, Cd, Pb, Ni i amb menor incidència també Hg) i també de diferents additius en la fabricació de plàstics (Zn i Cu) o dels metalls pesants presents en diferents tipus de vidre (Pb, Zn i amb menor incidència Cu).

e) Relacions dels 4 metalls pesants amb els impropis de la FORM

En el **Níquel** es detecten 2 relacions positives d'alta significança amb els impropis de la FORM (quantitat d'impropis totals i voluminosos) i pel que fa a les negatives no se'n observa cap d'alta significança però amb menor significança es detecta relació amb les bosses.

En el cas del **Plom**, s'observen 7 relacions positives d'alta significança: quantitat d'impropis totals (comuna amb el Ni), % impropis totals, vidre, paper, metalls no fèrrics, metalls totals i voluminosos. Complementàriament, també es detecten 3 relacions positives de menor significança: plàstic, metalls fèrrics i tèxtil. Pel que fa les relacions negatives se'n detecta 1 d'alta significança amb la poda i cap de menor significança.

Pel que fa al **Coure**, es troben 8 relacions positives d'alta significança: quantitat d'impropis totals (comuna amb Ni i Pb), % d'impropis totals (comuna amb Pb), poda (que era negativa amb alta significança en el Pb), vidre (comuna amb el Pb), plàstic, metalls fèrrics, metalls no fèrrics (comuna amb el Pb) i metalls totals (comuna amb el Pb). També de signe positiu, però amb menor significança, es troben relacions amb el paper (comuna amb el Pb), el tèxtil i els impropis especials. Pel que fa a les relacions de signe negatiu només se'n observa una, que és d'alta significança, amb les bosses.

En relació al **Zinc**, es detecten també 8 relacions positives d'elevada significança: Quantitat impropis totals (comuna amb Ni, Pb i Cu), % d'impropis totals (comuna amb Pb i Cu), vidre (comuna amb Pb i Cu), paper (comuna amb Pb), plàstic (comuna amb Cu), plàstic total, metalls fèrrics (comuna amb Cu), metalls no fèrrics (comuna amb Pb i Cu) i metalls totals (comuna amb Pb i Cu). També de signe positiu, però amb menor significança hi ha relació amb la poda (que també en tenia però amb elevada significança en el cas del Cu i que contràriament era negativa amb alta significança amb el Pb) i amb els voluminosos (que n'establia amb alta significança amb el Ni). En el cas del Zinc no es detecta cap relació de signe negatiu amb cap de les tipologies d'impropis de la FORM.

Quant a l'anàlisi de les relacions positives trobades, els anteriors resultats indiquen relacions positives d'alta significança de tots 4 metalls pesants del compost amb la quantitat d'impropis totals i del Pb, Cu i Zn amb el % d'impropis de la FORM. Resta patent doncs que les plantes que entren més impropis produeixen un compost amb major concentració de metalls pesants. En analitzar l'efecte de les diferents tipologies dels impropis s'observa un comportament molt redundat: els augments de metalls totals, no fèrrics, fèrrics, vidre, plàstic i el paper-cartró promouen un augment en els continguts de Cu, Zn i Pb, sense que aquestes fraccions afectin a la concentració de Ni. Aquestes relacions identifiquen la presència d'aquests 3 metalls en els indicats impropis sigui com a components d'aliatges (en el cas dels metalls), o com a additius (plàstics), pigments (en paper-cartró, plàstics, vidre i diferents tipus de llaunes o envasos metàl·lics), o components químics complementaris (Pb

i Zn en el vidre, Zn i Cu en els plàstics). El fet que el Ni no augmenti amb els metalls, significaria que els aliatges que promouen l'augment dels metalls són pobres en aquest metall i que també en tenen poc els impropis vidre, plàstic i paper-cartró. Aquest metall si que augmenta amb els voluminosos, fet que es podria justificar si es té en compte que en aquesta fracció hi ha materials que el contenen: com a recobriment anticorrosiu (niquelat) de diversos objectes de distinta mida, bateries recarregables, discs durs d'ordinadors, plàstics durs (canonades, caixes, etc.) en la síntesi del qual s'incorpora Ni, entre d'altres fonts de Ni. El voluminosos també incrementen el Pb i aquesta relació podria derivar de la presència de canonades antigues de plom (que tot i estar prohibides encara se'n troben), pintures amb mini (tetròxid de Pb), recobriment de cables de tota mena, bateries de plom, materials ceràmics, plàstics de clorur de vinil estabilitzats amb Pb, etc. També s'observen augments de Zn en el plàstic total, que podria venir relacionat amb l'ús del Zn com a estabilitzant tèrmic i material de rebliment en la síntesi dels plàstics. El fet que la fracció poda incrementi el contingut en Cu i en menor proporció en Zn, podria derivar de l'aplicació de tractaments fitosanitaris a base de coure i zinc en els espais verds, principalment arbres i arbustos.

Per la discussió de les relacions negatives, com era d'esperar, s'han detectat molt poques relacions negatives entre el contingut en metalls pesants del compost i els impropis de la FORM. L'augment de la poda fa disminuir el contingut en Pb i el de bosses disminueix el Cu, sense disposar d'arguments precisos que justifiquin aquestes relacions negatives, tot i que podrien derivar d'un efecte de dilució en ser la poda i les bosses pobres en Pb i Cu respectivament.

4.2.4. Impureses del compost

El marc legislatiu que regula actualment les característiques del compost procedent de fracció orgànica de residus municipals (Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes) indica, entre d'altres requisits establerts pel tipus O2 (enmienda orgànica - Compost), que el compost "No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos"; és a dir, que no pot contenir cap mena d'impureses. Aquest requisit, que encara és vigent, ha estat molt discutit per l'Agència de Residus de Catalunya amb els responsables del Ministeri d'Agricultura, Alimentació i Medi Ambient, atès que és pràcticament impossible que aquest producte ho compleixi. De fet, hi ha cert consens en que es pot admetre una quantitat d'impureses que sigui inferior al 0,5% en massa. El RD que regulava anteriorment aquest producte (Real Decreto 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes), permetia un cert nivell d'impureses: "Las piedras y gravas eventualmente presentes de diámetro superior a 5 mm, no superaran el 5%. Las impurezas (metales, vidrios y plásticos) eventualmente presentes de diámetro superior a 2 mm, no superarán el 3%".

La presència d'impureses en el compost reflecteix que les operacions de refí no són totalment efectives per eliminar els components no desitjables en el compost i l'origen d'aquestes fraccions, com ja s'ha comentat en altres apartats, es troba en els impropis de la FORM i també de la Fracció Vegetal, una part dels quals s'han incorporat al procés degut a la limitada eficàcia de les operacions de tria i selecció. Globalment, és presumible que quan

més impropis tinguin les matèries primeres i menys eficaços siguin el seus processos de tria i selecció i el refinat final, més impureses hi hagin en el compost. Complementàriament, una part de les impureses del compost poden haver-se introduït en el procés des de la pròpia planta de tractament, principalment les pedres i graves i en menor mesura metalls.

En qualsevol cas, les anàlisis de compost que es consideren en aquest estudi contenen informació sobre els diferents tipus d'impureses, prenent-ne 4 com a variables dependents (metalls, plàstic, vidre i impureses suma metalls+plàstic+vidre) i afegint-hi les impureses de pedres i graves en el conjunt de variables de l'estudi.

Seguidament es presentaran i discutiran les relacions causals observades per a cadascuna de les tipologies de les impureses, agrupant les variables d'estudi en 4 tipologies: paràmetres de procés i de disseny, paràmetres generals del compost, metalls pesants del compost i impropis de la FORM.

4.2.4.1. IMPURESES METALLS

a) Relacions amb els paràmetres de disseny i de procés

No s'ha detectat cap relació causal entre el contingut de la fracció metalls en les impureses del compost i les diferents variables de procés i de disseny analitzades en l'estudi, la qual cosa permet indicar que la concentració de metalls en les impureses de compost no depèn de cap d'aquestes variables.

b) Relacions amb paràmetres generals del compost

Es detecten relacions causals positives d'alta significança entre el contingut en metalls de les impureses del compost i les fraccions granulomètriques >20mm i 10-20mm i també amb la fracció pedres i graves de les impureses del compost. Altrament es troba una relació negativa d'alta significança amb la fracció <10mm del compost. Complementàriament, però amb menor significança s'observen relacions positives amb el contingut en *Salmonella* i en N-total i una de negativa amb el test d'autoescalfament.

Els resultats indiquen que les impureses metalls estan majoritàriament constituïdes per partícules de mida superior a 10 mm, la qual cosa fa que les fraccions granulomètriques de 10-20 mm i les > de 20 mm, així com la de pedres i graves estiguin enriquides amb impureses metalls, mentre que la fracció <10mm n'estigui empobrida.

La relació negativa de baixa significança amb el test d'autoescalfament podria atribuir-se a que en augmentar les impureses metalls (que són minerals) proporcionalment hi ha menys MOT, per la qual cosa disminueix la temperatura màxima en el test. Les positives també de baixa significança amb *Salmonella* i Ntotal no tenen justificació des de l'òptica científica-tècnica i, segurament, són casuals.

c) Relacions amb els metalls pesants del compost

Només es detecta una relació negativa d'alta significança entre el contingut de metalls en les impureses del compost i en contingut en Plom del compost. Amb menor significança ni ha una relació positiva amb el Cadmi i una de negativa amb el Crom.

L'augment de la fracció metalls en les impureses del compost no depèn de l'increment de metalls pesants en el compost però produeix una disminució del contingut en plom del compost. Aquests resultats semblen indicar que la concentració final de metalls pesants en el compost no condiciona la quantitat d'impureses metalls en el compost, excepció feta d'una tendència a augmentar quan augmenta el nivell de Cadmi. Aquest comportament és esperable ja que el contingut en metalls pesants en el compost és sempre molt baix (mg/kg) i, tot i que una part d'ells entri en la composició de les impureses metalls, no es esperable una relació directa. L'augment de plom en el compost observat amb elevada significança quan disminueix el contingut en impureses metalls indica que el plom del compost no deriva dels metalls (en els aliatges dels quals és molt infreqüent) sinó d'altres materials que el poden contenir com el vidre, bateries, cables, etc.

d) Relacions amb els impropis de la FORM

Es detecten relacions causals negatives d'alta significança entre el contingut en metalls de les impureses del compost i dues fraccions dels impropis de la FORM: tèxtil i voluminosos. No s'observen relacions causals positives, ni d'alta ni baixa significança, de la fracció metalls en les impureses del compost i els impropis de la FORM.

Els resultats indiquen que no hi ha cap fracció dels impropis de la FORM que faci augmentar la fracció metalls de les impureses del compost, però que quan més impropis tèxtils i voluminosos tingui la FORM menys impureses en metalls té el compost. Els efectes "diluidors" d'aquestes fraccions vindrien determinades perquè són fraccions sense o amb baixa presència de components metàl·lics.

4.2.4.2. IMPURESES PLÀSTICS

a) Relacions amb els paràmetres de procés i de disseny

El nivell d'impureses de plàstic en el compost mostra relacions positives d'elevada significança amb les entrades de FORM, FORM tractada, sortides rebuig, tecnologia maduració ventilada, capacitat tècnica anual i capacitat tècnica trimestral. Altrament, les relacions són negatives d'alta significança amb FV respecte FORM tractada, temps inici tractament, durada de maduració, durada total (des+mad) i durada del procés de producció. S'observa que a mesura que augmenta la mida de les plantes (entren i tracten més FORM, generen més rebuig i tenen major capacitat tècnica), es genera un compost amb major quantitat d'impureses de plàstic.

Contràriament, les plantes que utilitzen més quantitat de fracció vegetal per FORM tractada i que fan processos més llargs (descomposició, maduració i total) produeixen un compost amb menor quantitat de plàstics. Aquests resultats són clarament atribuïbles a dues causes que són complementàries: qualitat de la FORM d'entrada i qualitat de la gestió del procés. Les plantes més grans, en general, entren FORM amb més impropis, entre ells la fracció plàstic, mentre que les més petites tenen una FORM més neta; complementàriament, les plantes més petites fan servir més fracció vegetal en la barreja (material que aporta menys plàstic) i controlen i gestionen millor el procés i el període de tractament és més llarg.

També s'ha observat que la tecnologia de maduració ventilada augmenta la presència de plàstic en les impureses del compost. Aquest efecte seria atribuïble a que la ventilació en maduració, en mantenir la massa sense moviment, conserva tot el plàstic que hi ha a les piles; si la maduració és dinàmica, el volteig facilita la pèrdua de plàstics cap a l'exterior, atesa la seva baixa densitat i facilitat de vol. La disminució de les impureses de plàstic amb l'augment del temps d'inici de tractament, podria derivar d'una pèrdua d'impropis de plàstic en aquest període, atès que una part d'ells és de baixa densitat i en forma de làmines, la qual cosa facilita el seu vol.

b) Relacions amb els paràmetres generals del compost

Es detecten relacions causals positives d'alta significança entre el contingut en plàstic del compost i les impureses de vidre, impureses de metall+plàstic+vidre, i els continguts en patògens (*E. coli* i *Salmonella*). Altrament, hi ha relacions causals negatives d'alta significança del plàstic en el compost amb el contingut en àcids húmics del compost. En aquest apartat no es detecta cap relació causal amb baixa significança.

Els resultats indiquen que els composts que tenen més plàstic també contenen més vidre i impureses totals (metall+plàstic+vidre), és a dir que els compost amb més impureses les tenen de tota mena i, com es veurà més endavant el seu nivell al compost depèn sobretot de la quantitat d'impropis totals de la FORM. Complementàriament, s'observa que els composts amb més plàstics tenen un grau menor d'higienització (més contingut en patògens), que derivaria de processos amb fases de descomposició deficientes. Contràriament, els que en tenen menys contenen més àcids húmics; aquesta observació és coherent amb que les plantes que tracten FORM amb menys impropis, en particular plàstics, fan millor el procés, obtenint un grau d'humificació superior. Com ja s'ha comentat la presència de plàstics en el compostatge dificulta l'aeració i tendeix a crear zones anaeròbiques en el material en procés.

c) Relacions amb els metalls del compost

Les impureses de plàstic en el compost només mostren relacions causals positives amb el contingut en metalls pesants del compost: amb elevada significança amb el Cu i el Zn i amb menor significança amb el Cadmi. Aquests resultats posen de manifest que la presència de plàstics en les impureses del compost comporta també increment en alguns metalls pesants del compost, principalment en Cu i el Zn, i en menor mesura amb Cd. Aquests metalls

pesants s'empren tant per donar color al plàstic (identificació de marques comercials i/o color general de les bosses) i també com a additiu en la síntesi dels polímers.

d) Relacions amb els impropis de la FORM

En aquest apartat també només s'observen relacions causals positives entre el plàstic en el compost i els impropis de la FORM: amb alta significança amb la quantitat d'impropis totals i amb menor significança amb la fracció tèxtil. Aquests resultats posen de manifest, com ja s'ha avançat abans, que la presència de plàstic en les impureses del compost, depèn de la qualitat de la FORM d'entrada, majoritàriament de la quantitat d'impropis total i que secundàriament hi influeix la quantitat de tèxtil; aquest efecte secundari podria atribuir-se no tant al total de tèxtils sinó als tèxtils que són de plàstic o a tèxtils amb plàstic.

4.2.4.3. IMPURESES DE VIDRE

a) Relacions amb els paràmetres de procés i de disseny

Les impureses de vidre del compost no mostren relacions causals positives d'elevada significança amb cap de les variables estudiades. Altrament les relacions són negatives i d'alta significança amb la tecnologia de descomposició estàtica i la durada de descomposició.

Complementàriament, però amb menor significança, es detecta relació positiva de les impureses de vidre amb la tecnologia de descomposició dinàmica i negativa amb la durada total (descomposició+maduració).

Quan la descomposició és estàtica la proporció d'impureses de vidre disminueix ja que en no trencar-se els impropis de vidre són més grans i permeten que les operacions de selecció de vidre posteriors a la descomposició (post-descomposició i afinat) siguin més eficients. Aquest argument es veu reforçat en observar-se, tot i que amb menor significança, que la descomposició dinàmica (que en voltejar fragmenta els vidres) tendeix a augmentar les impureses de vidre en el compost. El fet que en augmentar la durada de descomposició, i amb menor intensitat de descomposició+maduració, disminueixin les impureses de vidre, seria una conseqüència indirecte derivada de que les plantes que fan processos biològics més llargs són les que tracten FORM amb menys impropis i per tant amb menor entrada de vidre.

b) Relacions amb els paràmetres generals del compost

Les impureses de vidre del compost mostren relacions causals positives d'elevada significança amb les impureses de plàstic i la suma de metalls+plàstic+vidre, així com també amb el test d'autoescalfament (TA), la respirometria (AT4) i la relació C/N del compost. Contràriament, s'observen relacions causals negatives d'elevada significança amb el Grau

d'Estabilitat del compost i el percentatge de germinació. En aquest apartat, no es detecta cap relació causal de baixa significança.

Aquests resultats tenen força similitud amb les impureses de plàstic. Ara indiquen que els composts que tenen més vidre també contenen més plàstic i impureses totals (metall+plàstic+vidre), és a dir que els compost amb més impureses les tenen de tota mena. Complementàriament, s'observa que els composts amb més vidre tenen un grau menor de transformació biològica i estabilització de la MOT (processos deficients), que es tradueix en una temperatura màxima superior en el TA, una major respiració (AT4) i una C/N més alta.

Complementàriament, i en el mateix sentit, els composts que tenen menys vidre mostren una major estabilització i maduració ja que augmenta el Grau d'Estabilitat i el % de germinació de les llavors i aquestes observacions són coherents amb que les plantes que tracten FORM amb menys impropis fan millor el procés, obtenint un grau d'humificació superior.

c) Relacions amb els metalls del compost

Només s'observa una relació causal de les impureses de vidre del compost amb el contingut en metalls pesants del compost; concretament és una relació negativa d'alta significança amb el Plom.

Les impureses de vidre no promouen augments en el contingut de metalls pesants del compost, però en augmentar el vidre s'observa una tendència a la disminució del contingut en plom, comportament de difícil argumentació ja que hi ha vidres que contenen plom i seria més lògic trobar un efecte positiu.

d) Relacions amb els impropis de la FORM

Les impureses de vidre mostren relació negativa d'alta significança amb la fracció poda dels impropis de la FORM i, complementàriament, una relació també negativa, però de menor significança, amb la fracció voluminosos.

Quan augmenten les fraccions de poda i altres impropis en la FORM, i en menor grau també la fracció de voluminosos, s'observa una disminució de les impureses de vidre. Aquesta relació seria atribuïble a un efecte dilució ja que la poda i els voluminosos no contenen vidre i, per tant, si augmenten en quantitat en els impropis de la FORM, proporcionalment hi ha menys vidre en el compost.

4.2.4.4. TOTAL D'IMPURESES

a) Relacions amb els paràmetres de procés i de disseny

El total d'impureses del compost només mostra relacions causals negatives amb els paràmetres de procés i de disseny de les plantes. Específicament, la relació és d'alta significança amb les entrades de FV, durada de descomposició, durada de maduració, durada total (des+mad) i durada del procés de producció. Complementàriament, hi ha relació negativa de menor significança amb la tecnologia de descomposició estàtica.

Les plantes que produeixen composts amb menor quantitat d'impureses totals són aquelles que fan processos més llargs, tant a la fase de descomposició com a la de maduració, i les que entren més Fracció Vegetal. Aquestes plantes, en general, són les que gestionen millor el compostatge i a més a més de tenir processos de tria i selecció i d'afinat més eficients, que disminuirien les impureses en el compost. Molt sovint aquestes plantes entren FORM de millor qualitat, és a dir, amb menor quantitat d'impropis, la qual cosa també comporta menor presència d'impureses en el producte final. El fet que la tecnologia de descomposició estàtica comporti un menor contingut en impureses total deriva de que en condicions estàtiques no hi ha trencament d'impropis la qual cosa facilita la seva extracció cap als diferents rebuigs, contràriament al que succeeix quan la descomposició és dinàmica.

b) Relacions amb els paràmetres generals del compost

S'observen relacions causals positives d'elevada significança entre el total d' impureses del compost i les fraccions de plàstic i de vidre de les impureses, així com també amb la respirometria (AT4) i la relació C/N del compost. Complementàriament, però amb menor significança, es detecta relació positiva amb el nivell d'*E. Coli* i negativa amb la fracció > 20mm del compost.

Com és d'esperar aquests resultats tenen força similitud amb les impureses de plàstic i les de vidre. Ara indiquen que els composts que tenen més vidre i més plàstic també tenen més impureses totals; és a dir que els compost amb més impureses les tenen de tota mena. Complementàriament, s'observa que els composts amb més impureses totals tenen un grau menor de transformació biològica i estabilització de la MOT (processos deficients), que en aquest cas es tradueix en una major respiració (AT4) i una C/N més alta. Aquests composts, alhora, tendeixen a presentar un grau d'higienització inferior (més contingut en *E. coli*), que derivaria de processos amb fases de descomposició deficients. Aquests composts amb alt contingut d'impureses totals, procedirien de plantes que entren FORM amb major contingut d'impropis (com s'ha comentat en l'apartat anterior) i que fan processos que limiten l'estabilització de la MO. La tendència a disminuir el total d'impureses en augmentar la fracció >20mm vindria determinada perquè aquesta fracció conté elevada proporció de reciclat vegetal i, proporcionalment, menys impureses totals.

c) Relacions amb els metalls del compost

El total d'impureses mostra una relació causal positiva d'elevada significança amb el contingut de Hg del compost i una de negativa, però de menor significança, amb el Plom. Els resultats indiquen que els composts que tenen més impureses totals tenen un contingut superior en Hg i tendeixen a tenir menor concentració de Pb. L'increment de Hg amb el total d'impureses és difícil de justificar, atès que cap de les tres fraccions que conformen el total impureses (metalls, plàstic i vidre) promouen el seu augment. La tendència a la disminució en Pb podria derivar d'una major proporció d'impureses de vidre i de metall en el total, que eren les que comportaven disminució en el contingut de Pb.

d) Relacions amb els impropis de la FORM

En aquest apartat només es detecten relacions causals negatives: d'alta significança amb les fraccions de plàstic i voluminosos de la FORM i de menor significança amb la fracció poda.

Els resultats indiquen que quan els impropis estan enriquits en plàstic i voluminosos, i amb menor significança en poda, el total d'impureses del compost és menor. Aquest comportament seria atribuïble a que aquestes tres fraccions dels impropis són més fàcilment eliminables que les altres pels mètodes usuals de tria, selecció durant el procés i afinat final del compost, degut principalment a la seva mida i/o densitat.

4.2.5. Test d'autoescalfament (TA)

a) Descripció i dinàmica del paràmetre

El test d'autoescalfament analitza la variació tèrmica que presenta una mostra de compost ubicada dins un vas de Dewar en el decurs del temps. Prèviament, la mostra s'ha portat a unes condicions preestablertes d'humitat, que garanteixin una humitat i aeració adequades, per tal de propiciar la degradació aeròbica microbiana de la matèria orgànica romanent en el compost. Es tracta de fet d'una mesura indirecta de l'estabilitat biològica de la matèria orgànica, ja que no mesura directament l'activitat respiratòria sinó l'increment de temperatura que se'n deriva en un recipient isolat tèrmicament. L'increment de temperatura en relació a l'ambiental és directament proporcional a la quantitat de matèria orgànica degradable present en el compost. Per tant, quan més alta sigui la temperatura assolida menys estable o més inestable serà el compost. Atès que la corba tèrmica pot mostrar diferents perfils, per avaluar l'estabilitat del compost es determina usualment la temperatura màxima neta assolida i es poden establir 5 classes de compost (1=material fresc; 5=compost molt estable).

En aquest estudi no s'ha treballat amb classes sinó amb la temperatura neta màxima assolida, per la qual cosa quant més alta sigui en el test d'autoescalfament menys estable és el compost. Valors alts seran indicadors d'elevada presència de MO degradable en el compost (baixa estabilitat), que normalment estan associats a contingut elevats de MO total, mentre que els valors baixos indicaran major estabilitat. Quan més alta sigui aquesta

temperatura menor haurà estat l'activitat de degradació i transformació biològica de la matèria orgànica durant el procés de compostatge i a l'inrevés. Els factors que poden condicionar baixa estabilitat en el compost són molt diversos, però en la major part dels casos deriven d'una gestió deficient del procés, sigui per manca d'aeració/excés d'humitat, manca d'humitat, curta durada de les fases biològiques, presència de substàncies tòxiques pels microorganismes, etc.

Tot seguit es presentaran i discutiran les relacions causals observades entre el test d'autoescalfament i les diferents variables de l'estudi, agrupades en 4 tipologies: paràmetres de procés i de disseny, paràmetres generals del compost, metalls pesants del compost i impropis de la FORM.

b) Relacions amb els paràmetres de procés i de disseny

La temperatura màxima del test d'autoescalfament mostra relacions causals positives d'alta significança amb la saturació de les plantes, temps inici tractament i diàmetre tromel de refí. Contràriament, la relació es negativa amb les sortides rebuig i la durada de descomposició. Complementàriament, però amb menor significança, es detecta relació positiva amb la tecnologia de descomposició ventilada i negativa amb la capacitat tècnica.

Els resultats obtinguts són clarament justificables tenint en compte que una major temperatura en el test d'autoescalfament representa que la matèria orgànica del compost té proporcions elevades de matèria orgànica degradable. Quan augmenta la saturació de les plantes els processos de degradació biològica es veuen limitats i molt sovint la fase de descomposició (en la que s'ha de produir la major part de la pèrdua de matèria orgànica degradable) és més curta, justificant així que la temperatura sigui major quan més saturada està i quan menor és la durada de la fase de descomposició. Complementàriament, si augmenta el temps d'inici del tractament, la FORM en espera d'entrar en línia pateix condicions d'anòxia que alenteixen fortament la descomposició, mantenint nivells més alts de matèria orgànica degradable. Aquestes condicions de limitació de l'oxidació terminal, continuen existint a l'inici de la fase de descomposició quan aquest material entra en línia, disminuint per tant la degradació total d'aquesta fase tot i que s'hi imposin condicions aeròbiques, per volteig o per ventilació, la qual cosa explica la relació positiva de la temperatura amb el temps d'inici de tractament. Quan augmenta el diàmetre del tromel d'afinat, el compost obtingut té més fracció grollera, enriquint-se preferentment amb fracció vegetal de mida grossa que, òbviament, té major contingut de matèria orgànica degradable. En el mateix sentit, és clarament justificable que la descomposició ventilada augmenti la temperatura del test d'autoescalfament, ja que en no produir-se trencament de les partícules hi ha menys superfície de contacte per l'acció microbiana i el contingut en MO degradable és major. Contràriament, les plantes poc saturades i amb durada major de descomposició, degraden més matèria orgànica i produeixen un compost amb baix contingut de MO degradable. Sovint, aquestes plantes tenen capacitat tècnica alta però amb baixa saturació, generant molt rebuig, atesa l'eficiència dels processos de tria i selecció i afinat final, característiques que els hi permeten fer millor els processos de degradació biològica.

c) Relacions amb els paràmetres generals del compost

La temperatura màxima del test d'autoescalfament mostra relacions causals positives d'alta significança amb la CE, les impureses de vidre, el %MS, els continguts en MOT, en MOR i en N-amoniacal, així com amb la respirometria (AT4) i la relació C/N. Contràriament, les relacions són negatives amb les impureses en metalls, la fracció >20mm, la humitat, el pH, els continguts en àcids húmics, potassi, calci, ferro i magnesi i els resultats del test Solvita i % germinació. En aquest apartat no es detecta cap relació de baixa significança.

Tal com s'ha indicat a l'apartat anterior, una temperatura més alta en el test d'autoescalfament indica que el compost té contingut elevat de matèria orgànica degradable i que això, generalment, és degut a que el procés de degradació biològica s'ha vist limitat. L'increment de la temperatura màxima amb els augments en el contingut de MOT, relació C/N, respirometria (AT4) i el contingut en N-amoniacal del compost, són indicadors de presència elevada de MO degradable. La relació també positiva amb la CE, derivaria, com ja s'ha comentat en l'apartat de conductivitat elèctrica, de l'alt contingut de N-amoniacal que fa augmentar la CE. El fet que la temperatura màxima sigui superior en els compost més secs (i més baixa en els més humits) caldria atribuir-lo a una limitació de l'activitat biològica per manca d'aigua, possiblement en la fase de maduració, que fa que el contingut en matèria orgànica degradable del compost sigui superior.

Contràriament, els composts amb menor temperatura màxima, seran els que han tingut una major degradació biològica i, per tant, els que són més estables i/o madurs. Els augments en el contingut d'àcids húmics, valor del test Solvita, % de germinació i pH observats quan disminueix la temperatura màxima corroboren aquest comportament. La relació positiva amb la MOR sembla, en principi, contradictòria ja que l'estabilització i maduració comporten un increment relatiu de la MOR en relació a la MOT, és a dir un augment del Grau d'Estabilitat; no obstant, aquesta relació positiva podria atribuir-se al fet que si hi ha hagut poca degradació de matèria orgànica en el compost hi haurà nivells alts de MOT i també de MOR. Les relacions negatives observades amb els continguts en K, Ca, Fe, Mg podrien derivar de que la mostra de compost que s'introdueix en el vas de Dewar està enriquida en components minerals i que, a igualtat de massa, es sotmeti al test una menor quantitat de matèria orgànica, la qual cosa pressuposa una menor capacitat calorífica. Aquest argument de disminució de la massa orgànica també explicaria que la temperatura màxima disminuís en augmentar les impureses de metalls.

Tot i que els resultats indiquen que la temperatura màxima augmenta amb el contingut en impureses de vidre no es troba cap argument que ho pugui justificar atès que el vidre és també inorgànic i hauria de tenir el mateix efecte que els metalls, és a dir de disminució. Similarment, tampoc es troben arguments que expliquin les relacions negatives observades amb la fracció superior a 20 mm.

d) Relacions amb els metalls del compost

La temperatura màxima del test d'autoescalfament només mostra relacions causals de signe negatiu amb els metalls pesants del compost: amb elevada significança amb el Ni, Cr i Cd i amb menor significança amb el Cu.

Tal com s'ha comentat abans, les temperatures elevades en el test d'autoescalfament venen determinades per continguts elevats de matèria orgànica en el compost, especialment de la fracció degradable, la qual cosa implica que la concentració de matèria mineral del compost és menor. Atès que els metalls pesants formen part de la fracció mineral és previsible que la seva concentració en els composts sigui inferior, tal com passava amb altres components minerals (ferro, potassi, calci i magnesi).. Els nostres resultats no mostren disminucions en tots els metalls pesants (7), però si que se'n observen en 4 (Ni, Cr, Cd i Cu).

e) Relacions amb els impropis de la FORM

La temperatura màxima del test d'autoescalfament només mostra una relació positiva amb alta significança amb la fracció bosses dels impropis de la FORM. Que la major proporció de bosses de plàstic en els impropis de la FORM comportin una temperatura més elevada en el test d'autoescalfament, significaria que la presència d'aquest impropis en el procés biològic disminueix la degradació de la matèria orgànica i fa que el compost en tingui més, augmentant així la producció de calor durant el test. Els plàstics film en la matriu compostable promouen la creació de zones anaeròbiques, en retenir líquids sobre la superfície. En aquestes condicions la matèria orgànica es degrada menys i el producte final té més substrat respirable.

4.2.6. Percentatge de germinació

a) Descripció i dinàmica del paràmetre

El percentatge de germinació és un assaig que pretén avaluar la possible fitotoxicitat del compost, fent extractes del material i sembrant i incubant llavors en càpsules de Petri que contenen aquest extracte, emprant una metodologia específica basada en l'assaig de fitotoxicitat descrit per Zucconi et al. (1980, 1981 i 1985) . Com a espècie control s'utilitzen normalment llavors de *Lepidium sativum* i com a tractament testimoni es preparen càpsules amb aigua destil·lada. L'assaig es duu a terme sota condicions controlades i en finalitzar s'avaluen normalment diversos paràmetres de germinació, expressant els resultats de la prova de forma percentual respecte als del testimoni amb aigua destil·lada. Els paràmetres d'avaluació són: percentatge de germinació (% G), longitud mitjana de les radícules de les llavors germinades (%Lm) i índex de germinació ($[(\% G \text{ prova} \times \% Lm \text{ prova}) / (\% G \text{ testimoni} \times \% Lm \text{ testimoni})] \times 100$). Com més alta és la germinació observada respecte el testimoni, menor és la fitotoxicitat del compost, la qual cosa significa, en principi, una major maduresa del compost. En aquest estudi només s'ha determinat el % de Germinació.

La presència de substàncies tòxiques en el compost disminueixen el % de germinació de la llavor control, en aquest cas, *Lepidium sativum*. Aquesta inhibició pot venir causada per la

presència de substàncies tòxiques de naturalesa mineral o orgànica. Entre les minerals destaquen el excessos de Mn, d'amoni i dels diferents metalls pesants, però també s'ha de considerar l'excés de sals solubles (elevada conductivitat elèctrica) que, en augmentar la pressió osmòtica de l'extracte, inhibeix la germinació de les llavors, amb major o menor intensitat en funció de la tolerància a les sals de l'espècie control. Entre les de naturalesa orgànica hi ha dos grups de substàncies tòxiques: 1) les que provenen de les matèries primeres del compostatge (substàncies fenòliques tòxiques, resines, tanins, antocians, monoterpens, etc.) i que el procés no ha pogut degradar suficientment ; i 2) les que es generen per un compostatge deficient (àcids acètic, propiònic i butíric, etanol, etc.), principalment derivades d'una aeració deficient amb establiment de condicions anaeròbiques o semi-anaeròbiques locals o generals durant el procés.

L'assaig de fitotoxicitat dut a terme en les mostres de compost objecte d'estudi no permet discernir si es tracta d'una fitotoxicitat deguda a l'excessiva salinitat general del compost o a la presència de substàncies fitotòxiques específiques. El mètode actual del CEN per a avaluar la fitotoxicitat del compost i altres esmenes de sòl o substrats de cultiu mitjançant els test de *Lepidium sativum* en càpsula de Petri, permet determinar la toxicitat específica ja que si el producte prèviament humitejat té una CE superior a un límit (80 mS/m), es fa l'assaig barrejant el material amb una quantitat de torba d'esfagne que no superi aquest límit.

Atenent tot l'anterior, els resultats obtinguts en aquest apartat s'hauran d'interpretar de doble manera: d'una banda en relació a l'efecte inhibidor general de les elevades CE i de l'altra en relació amb el possible efecte inhibidor de substàncies específiques. Dissortadament, no es podran discernir ambdues components restrictives.

D'antuvi un bon procés de compostatge ha d'eliminar els tòxics orgànics d'origen natural presents a les matèries primeres i, si s'han format, els que s'hagin generat durant el procés. No obstant, quan els tòxics orgànics no són naturals sinó de procedència antropogènica, principalment derivats de síntesi orgànica (compostos xenobiòtics) tals com dioxines i dibenzofurans, policlorobifenils (PCB) i compostos nitroaromàtics la capacitat biodegradadora del compostatge és molt menor, tot i que variable segons la seva tipologia. Complementàriament els nivells d'amoni derivats de la desaminació dels compostos orgànics nitrogenats s'ha d'anar reduint. Tot i això, si hi ha metalls pesants i/o manganés, el procés de compostatge no els modifica, conservant-se la seva massa en el material, la qual cosa fa que, percentualment, n'augmenti la concentració en disminuir la matèria orgànica. Així mateix, un bon procés de compostatge promou una intensa descomposició i mineralització de la matèria orgànica, sense modificar la component mineral, la qual cosa comporta que percentualment augmenti la matèria mineral final. Aquesta fracció mineral, està constituïda per materials insolubles o de baixa solubilitat però també per substàncies iòniques solubles que promouen un augment de la salinitat. Atès l'anterior, quan més intensa ha estat la mineralització de la matèria orgànica durant el compostatge, major serà la CE del compost final i, per tant, augmentarà la capacitat d'inhibició de la germinació de les llavors assajades.

Tot seguit es presentaran i discutiran les relacions causals observades entre el percentatge de germinació i les diferents variables de l'estudi, agrupades en 4 tipologies: paràmetres de

procés i de disseny, paràmetres generals del compost, metalls pesants del compost i impropis de la FORM.

b) Relacions amb els paràmetres de procés i de disseny

En el % de germinació només s'han observat relacions causals positives d'alta significança; concretament, amb la durada de descomposició, la durada total (descomposició+maduració) i la durada del procés de producció.

En augmentar la durada de processament de la FORM en les plantes, tant de la fase de descomposició com de la de maduració o d'ambdues conjuntament, el % de germinació de la llavor control augmenta, és a dir que es promou una disminució de la fitotoxicitat del compost final. Quan els processos de tractament, especialment els biològics, s'allarguen, la degradació i transformació de la matèria orgànica és més intensa, disminuint o eliminant les substàncies fitotòxiques orgàniques procedents de les matèries primeres o d'episodis d'anaerobiosi local, produint un compost més estable i madur. L'increment de la germinació observat quan s'allarga la durada del procés seria atribuïble principalment a aquesta causa.

c) Relacions amb els paràmetres generals del compost

S'han detectat relacions causals positives d'alta significança amb les impureses metalls, la humitat, el test Solvita, el calci i la fracció >20mm. Contràriament, les relacions del % de germinació són negatives amb alta significança per a la CE, les impureses de vidre, la suma d'impureses metalls+plàstic+vidre, el test d'autoescalfament, el % de matèria seca, el pH, la MOT, l'AT4, el contingut en *Salmonella*, el N-amoniacal, la relació C/N i la fracció <10mm. Complementàriament, també es detecta relació negativa de menor significança amb el contingut en àcids húmics.

S'observa un increment del percentatge de germinació quan augmenta el resultat del test Solvita i quan el compost té més humitat. Resultats alts del test Solvita indiquen baixa activitat respiratòria (poc despreniment de CO₂) i baixa concentració de N-amoniacal, és a dir compostos estables i madurs, que han experimentat una transformació biològica adequada i, per tant, amb eliminació o forta disminució dels tòxics orgànics i elevada reducció de la concentració d'amoni, reduint o eliminant per tant la fitotoxicitat. La relació directa del % de germinació amb la humitat del compost (i complementàriament inversa amb el % de matèria seca) derivaria del fet que si el material en procés (especialment durant la fase de maduració) té suficient humitat, els processos de degradació i transformació biològica cursen adequadament i disminueixen molt les substàncies fitotòxiques indicades anteriorment. Contràriament, si està sec els processos s'alenteixen molt o s'aturen, la qual cosa comportaria que les substàncies fitotòxiques es mantenen o disminueixen menys.

Els resultats obtinguts també indiquen que el % de germinació disminueix quan el compost té alt contingut de matèria orgànica, elevada temperatura màxima en el test d'autoescalfament, alta activitat respiratòria (AT4), relació C/N alta i continguts elevats en N-amoniacal. Aquest conjunt de característiques en el compost indica que els processos de degradació i transformació biològica han estat deficientes, generant composts amb alts

nivells de matèria orgànica, especialment de la degradable, i això condiciona les relacions negatives anteriors, fruit totes elles de manca d'estabilitat en el compost. La inhibició de la germinació en aquestes condicions seria atribuïble tant a la presència de tòxics orgànics (procedents de les matèries primeres o generades en el procés) que no s'han degradat suficientment i/o també dels alts nivells de N-amoniacal que, com s'ha comentat abans, és fitotòxic.

Complementàriament, es detecta disminució del % de germinació en augmentar la conductivitat elèctrica del compost, la fracció granulomètrica <10mm i el pH. Aquests resultats posen de manifest l'efecte fitotòxic general de l'elevada salinitat en la germinació de les llavors control, que s'ha comentat en introduir aquest apartat. De fet, la relació causal és amb la CE del compost, que augmenta quan més mineralització hi ha, i aquesta mineralització és major en la fracció més fina del compost (que té una CE superior a la de les altres fraccions); de forma complementària, s'ha trobat augment de la germinació quan el compost té més fracció grollera (>20mm) que, en estar menys mineralitzada, té una CE menor. La relació negativa amb el pH no és causal sinó que deriva del fet que en augmentar la mineralització, amb augment de la CE, també es produeix un augment del pH. L'augment de *Salmonella* en el compost també fa disminuir el % de germinació. L'augment de patògens en el compost (en aquest cas *Salmonella*) indica que la higienització ha estat deficient, és a dir que la fase termòfila de la descomposició ha durat poc temps i/o no s'han assolit temperatures prou altes, sigui per limitació en el subministrament d'aire o per excés d'humitat (creant així condicions anòxiques) o bé per manca d'humitat en la matriu compostable. En aquestes condicions disminueix la degradació de substàncies tòxiques orgàniques procedents de les matèries primeres i se'n generen d'altres derivades del metabolisme anaeròbic i pot augmentar la concentració en amoni que es volatiliza parcialment en forma de amoníac amb les altes temperatures i que es manté en el medi si hi ha condicions d'acidesa promogudes per les fermentacions anaeròbiques. La relació negativa del % de germinació amb *Salmonella* no seria causal sinó indirecte, com a conseqüència dels components fitotòxics derivats d'una mala higienització descrits anteriorment. La tendència a disminuir el % de germinació quan augmenta el contingut d'àcids húmics en el compost seria també indirecte a través de l'augment de la CE. El contingut en àcids húmics del compost és major quan més llarga i eficient és la maduració (fase on esdevé el procés d'humificació), però al mateix temps augmenta la mineralització, augmentant el contingut en minerals solubles.

També s'han detectat efectes de les impureses en el % de germinació, que indiquen que la presència de metalls augmenta la germinació (disminueix la fitotoxicitat), mentre que el vidre i la suma de metalls+plàstic+vidre la fan disminuir; sense que es puguin trobar arguments científics o tècnics que justifiquin aquest comportament. Similarment, tampoc es troben arguments que expliquin que l'augment de Ca en el compost comporti un augment del % de germinació.

d) Relacions amb els metalls del compost

La temperatura màxima del test d'autoescalfament només mostra relacions causals de signe negatiu amb els metalls pesants del compost: amb elevada significança amb el Ni, Cr i Cd i amb menor significança amb el Cu.

Tal com s'ha comentat abans, les temperatures elevades en el test d'autoescalfament venen determinades per continguts elevats de matèria orgànica en el compost, especialment de la fracció degradable, la qual cosa implica que la concentració de matèria mineral del compost és menor. Atès que els metalls pesants formen part de la fracció mineral és previsible que la seva concentració en els composts sigui inferior, tal com passava amb altres components minerals (ferro, potassi, calci i magnesi). Els nostres resultats no mostren disminucions en tots els metalls pesants (7), però sí que se'n observen en 4 (Ni, Cr, Cd i Cu).

e) Relacions amb els impropis de la FORM

Només s'ha observat una relació positiva, d'alta significança, amb el contingut de Cadmi en el compost.

Aquest resultat, que indica que en augmentar el contingut en Cadmi del compost incrementa el % de germinació, és difícilment justificable. De fet, essent el Cd un metall pesant tòxic també pels microorganismes, el comportament hauria de ser a l'inrevés.

f) Relacions amb els impropis de la FORM

Pel que fa als impropis de la FORM, només s'ha observat una relació positiva, d'alta significança, amb el contingut de paper.

Aquest resultat indica que quan la FORM té més quantitat de l'impropi paper, el compost obtingut promou un augment del % de germinació de les llavors control, és a dir que presenta una fitotoxicitat menor. L'argumentació d'aquesta relació no és fàcil, però com a idea general es podria suposar el següent: si hi ha molt de paper en els impropis de la FORM una part d'ell entrarà en procés, ja que les operacions de tria i selecció de la FORM són poc eficients amb aquesta fracció biodegradable. El paper, en humitejar-se en contacte amb la FORM i en sotmetre's als esforços diversos dels equips de tria i selecció es va trencant i s'incorpora a la FORM seleccionada (si la selecció es fa abans de la descomposició) o a la matriu en procés si es fa després de la descomposició. L'increment de matèria orgànica total (degradable + resistent) amb el paper (principalment cel·lulosa) i el cartró (essent aquest més ric en MOR per la lignina), incrementen la font de C pels microorganismes i augmenten i milloren la relació C/N del material en procés (que generalment és inferior a 30 en la barreja inicial), atès que el paper i el cartró són pobres en N. Altrament, el paper i el cartró retenen humitat per absorció i al mateix temps faciliten la circulació de l'aire en actuar com a estructurants transitoris (especialment durant la fase de descomposició). Complementàriament, el paper i el cartró tenen molt poca matèria mineral i, per tant, la seva

descomposició genera poques substàncies solubles, disminuint la CE del material i del producte final. Totes aquestes condicions poden haver afavorit els processos de degradació i transformació biològica, reduint el contingut en tòxics orgànics i també d'amoni i de la salinitat final, amb el conseqüent efecte positiu sobre el % de germinació.



5. Models de regressió

Aquest apartat presenta els resultats dels models de regressió més significatius per l'anàlisi explicativa de diverses variables dependents considerades en aquest estudi, assegurant-ne igualment el compliment dels supòsits dels models de regressió basats en el mètode dels mínims quadrats ordinaris segon s'ha presentat a l'apartat de metodologia.⁴

Primer, es presenten els models més significatius trobats per l'anàlisi dels metalls pesants: tres models pel Zinc (Zn), dos pel Coure (Cu) i un pel Plom (Pb). A continuació, s'inclouen els resultats de dos models de regressió per la variable Conductivitat elèctrica i, per últim, un model per la variable Temperatura màxima trobada en el test d'autoescalfament. La Taula 10 identifica les variables dependents i independents considerades per tots els models, així com el nombre que identifica cada model en els sub-apartats següents.

Per les variables referents al metall pesant Níquel (Ni), al grau d'estabilitat, percentatge de germinació i a les impureses (metalls, plàstic, vidre, i la suma dels tres components anteriors) no s'han trobat models que revelin resultats estadístics vàlids de significança individual i global, i que compleixin amb diversos supòsits dels models de regressió basats en el mètode de mínims quadrats ordinaris adoptats per aquest estudi com, per exemple, l'absència de multicol·linealitat.

Taula 10. Variables integrades en els models de regressió finals

Variable dependent	Nº Model	Variables independents
Zinc	1	Impropis totals (%) Durada de la producció (dies) Diàmetre tromel refí 12 mm Diàmetre tromel refí 16 mm
Zinc	2	Impropis totals (%) Tecnologia de descomposició estàtica respecte al moviment

⁴ Aquesta anàlisi se centra en 20 plantes de compostatge.

Variable dependent	Nº Model	Variabls independents
		Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment
Zinc	3	Vidre (%) Tecnologia de descomposició estàtica respecte al moviment Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment
LnCu	4	Impropis totals (%) Tecnologia de descomposició estàtica respecte a moviment Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment
LnCu	5	Impropis especials (%) Tecnologia de descomposició estàtica respecte a moviment Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment
LnPb	6	Impropis totals (%) Diàmetre tromel refí 12 mm Diàmetre tromel refí 16 mm
Conductivitat elèctrica	7	Impropis especials (%) Impropis bosses (%) FV respecte a FORM tractada (%) Durada maduració (dies)
Conductivitat elèctrica	8	Impropis especials (%) Impropis bosses (%) FV respecte a FORM tractada (%) Tecnologia de maduració respecte a moviment
Temperatura màxima del test d'autoescalfament	9	Impropis bosses Saturació Tecnologia de descomposició respecte al moviment Diàmetre tromel refí

Els resultats dels models es presenten seguint una mateixa estructura, és a dir, per cada model, s'identifiquen les variables analitzades, les transformacions que s'han realitzat per les variables, les equacions dels models estimats, la lectura dels paràmetres estimats i la seva interpretació segon les hipòtesis esperades.

5.1. Metalls pesants

5.1.1. Zinc

Pels models del zinc (Zn) s'han realitzat les següents transformacions en les variables:

- la variable dependent (Zn) es presenta en aquests models sense valors atípics (*outliers*). Per la identificació dels *outliers* es va analitzar el gràfic de dispersió (*boxplot*) del Zn així com seguir el procediment basat en Hoaglin et al. (1987) on s'identifica els *outliers* amb el suport de l'anàlisi dels quartils superiors i inferiors i la definició de rangs de *outliers*. Això ha derivat en l'exclusió de dues observacions amb valors superiors a 600 mg/kg ms i va permetre garantir millors resultats en termes de significança del model i de la distribució dels residus;

- es van crear dues variables *dummy* referents al diàmetre de tromel refí, on es presenta la comparació dels nivells de diàmetre de 12 mm i 16 mm amb el nivell de referència, en concret, de diàmetre de tromel refí de 10 mm;
- seguint el tipus de transformació anterior, per la variable de tecnologia de descomposició es va crear dos variables *dummy* que representen els nivells de tecnologia de descomposició estàtica i dinàmica en comparació al nivell de referència de tecnologia basada en digestió anaeròbica.

a) Model 1

El primer model desenvolupat amb el Zn com variable dependent ha comptat amb les següents variables independents: Impropis totals trobats en la FORM (%); durada de producció (dies) i dues variables *dummy* referents al diàmetre de tromel refí. A continuació es presenten els resultats de l'estimació en la següent equació i a la Taula 11.

$$Zn = 369,26 + 4,61 * \text{Impropis Totals} - 1,65 * \text{Durada de la Producció} - 65,08 * \text{Diàmetre Tromel Refí 12 mm} - 25,87 * \text{Diàmetre Tromel Refí 16 mm}$$

Taula 11. Paràmetres estimats en el model economètric 1

	Coeficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
C	369,2634***	63,87882	5,780686	0,0000
Impropis totals (%)	4,609332**	2,046622	2,252165	0,0255
Durada de la producció (dies)	-1,647037***	0,583725	-2,821598	0,0053
Diàmetre tromel refí 12 mm ¹	-65,07519**	29,61469	-2,197395	0,0293
Diàmetre tromel refí 16 mm ¹	-25,87422	27,29221	-0,948044	0,3444
Resum estadístic				
Observacions	183			
F-statistic	7,990097			
Prob (F-statistic)	0,000006			
Durbin-Watson (DW)	1,760554			

Notes: Zn és la variable dependent sense valors atípics (*outliers*); ¹ Representen variables *dummy* respecte de la variable de referència de Diàmetre tromel refí 10 mm; ***, **, * representen significança estadística de l'1%, 5% i 10%, respectivament.

La lectura dels resultats es fa de la següent forma. En termes mitjans i mantenint les altres variables constants, el contingut de Zn en el compost augmenta 4,6 ppm amb cada 1 % d'increment en el percentatge d'impropis totals i disminueix 1,6 ppm amb cada dia que s'incrementa la durada del procés. Quant als efectes del tromel de refí, les mostres de compost garbellades a 12 mm presenten 65 ppm menys que les garbellades a 10 mm. En el cas de les mostres garbellades a 16 mm, el resultat no és significatiu encara que la tendència és la mateixa.

Quant a la interpretació d'aquests resultats, és esperable que, en general, el contingut en metalls augmenti amb la presència d'impropis, ja que aquests contaminen la matriu orgànica encara que puguin ser retirats amb major o menor eficàcia en determinats moments del

procés (tria i selecció abans o després de la descomposició i afinat final). El Zinc és el quart metall més emprat després del Fe, Al i Cu i la seva presència en els impropis pot tenir diverses procedències. L'ús principal del Zinc (55% del total ús), i segurament una de les fonts principals, és el galvanitzat de l'acer i del ferro (anomenat zincat), com a tractament anticorrosiu d'aquests materials. Complementàriament, el Zn s'utilitza en diferents aliatges del Zn (21%), tals com el llautó (Cu i Zn), alpaca (Cu+Zn+Ni), cuproníquelzinc i del Zinc amb l'alumini emprats pel modelar peces d'automoció, elèctriques i d'ordinador, però també en aliatges d'altres metalls (16%) però que també contenen Zinc (llautó i bronze). Complementàriament, el Zinc s'utilitza en diverses bateries (de Zn-aire en ordinadors portàtils i en les alcalines), peces de fosa injectada, cobertes de construcció zincades, conservants de la fusta, protecció ultraviolada i additiu en la fabricació de plàstics, vidres especials com es comentarà més endavant, i també com a pigment en pintures i coloració de diversos materials, especialment amb sulfat de zinc (blanc) o com a sulfur de zinc en pintures luminescents.

La disminució del contingut en Zn a mesura que augmenta la durada del procés és contradictori amb el fet de conservació de cendres (matèria mineral) i increment relatiu de la matèria mineral a mida que el procés s'allarga, ja que la matèria orgànica s'ha d'anar descomponent. El que pot succeir és que les instal·lacions que fan processos més llargs són les que parteixen de materials amb menor contingut inicial de metalls (potser materials més nets) i, per tant, encara que es doni concentració de la matèria mineral, el resultat final és que la concentració en Zn és menor.

La utilització de garbells amb llum de pas major de 10 mm pot fer que hi hagi partícules menys degradades i amb menor concentració de matèria mineral, o que aquestes partícules més grans, possiblement en molts casos restes vegetals, presentin de partida un contingut inferior en Zn.

b) Model 2

Aquest model ha comptat amb les següents variables independents: Impropis totals trobats en la FORM (%); durada de producció (dies) i dues variables *dummy* referents a la tecnologia de descomposició. Els resultats es presenten en la següent equació i a la Taula 12.

$Zn = 301,71 + 4,64 * \text{Impropis totals} - 116,66 * \text{Tecnologia de descomposició estàtica respecte a moviment} - 104,72 * \text{Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment}$

Taula 12. Paràmetres estimats en el model economètric 2

	Coeficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
C	301,7078***	47,07135	6,409584	0,0000
Impropis totals (%)	4,638997**	2,206576	2,102351	0,0369
Tecnologia de descomposició estàtica respecte al moviment ¹	-116,6644***	40,69145	-2,867050	0,0046

	Coeficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment ¹	-104,7222**	46,81799	-2,236794	0,0265
Resum estadístic				
Observacions	183			
F-statistic	9,000613			
Prob(F-statistic)	0,000014			
Durbin-Watson (DW)	1,763990			

Notes: Zn és la variable dependent sense valors atípics (*outliers*); ¹ Representen variables *dummy* al respecte de la variable de referència de tecnologia basada en digestió anaeròbia; ***, **, * representen significança estadística de l'1%, 5% i 10%, respectivament.

Els resultats trobats indiquen que el contingut de Zn en el compost augmenta 4,6 ppm amb cada 1% d'increment en el percentatge d'impropis. A més, en termes mitjans, les plantes que tenen tecnologia de descomposició estàtica presenten 116,66 ppm menys de zinc al compost produït en comparació amb les plantes que tenen digestió anaeròbia. El mateix tipus d'interpretació es fa servir per la variable referent a tecnologia de descomposició dinàmica però amb el valor -104,72 mg/kg ms.

Sobre aquests resultats, és esperable que, en general, el contingut en metalls augmenti amb la presència d'impropis, ja que aquests contaminen la matriu orgànica encara que puguin ser retirats.

Per últim, que les mostres de digestió anaeròbia presentin més Zn pot ser degut a que aquest és poc soluble i no és arrossegat amb la fracció líquida del digerit, juntament amb el fet que un procés amb una digestió anaeròbia prèvia al compostatge intensifica la degradació de la matèria orgànica i per tant promou la concentració de minerals, entre ells del Zn.

c) Model 3

L'últim model pel Zn inclou com a variables independents els impropis de vidre trobats en la FORM (%) i dues variables dummy referents a la tecnologia de descomposició. La següent equació i la Taula 13 presenten els principals resultats.

$$Zn = 318,59 + 35,79 \cdot \text{Vidre} - 109,41 \cdot \text{Tecnologia de descomposició estàtica respecte al moviment} - 100,57 \cdot \text{Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment}$$

Taula 13. Paràmetres estimats en el model economètric 3

	Coeficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
C	318,5885***	41,04114	7,762662	0,0000
Vidre (%)	35,79399**	14,61649	2,448877	0,0153
Tecnologia descomposició estàtica respecte al moviment ¹	-109,4074***	41,37246	-2,644450	0,0089

	Coeficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
Tecnologia descomposició dinàmica respecte al moviment ¹	-100,5699**	47,63703	-2,11172	0,0361
Resum estadístic				
Observacions	183			
F-statistic	7,239563			
Prob(F-statistic)	0,000130			
Durbin-Watson (DW)	1,840694			

Notes: Zn és la variable dependent sense valors atípics (*outliers*); ¹ Representen variables *dummy* respecte de la variable de referència de tecnologia de descomposició basada en digestió anaeròbia.

Els resultats indiquen que el contingut de Zn en el compost augmenta 35,8 ppm amb cada 1 % d'increment en el percentatge d'impropis de vidre. A més, en termes mitjans, les plantes que tenen tecnologia de descomposició estàtica presenten 109,41 ppm menys de zinc al compost produït en comparació amb les plantes que tenen digestió anaeròbia. El mateix tipus d'interpretació es fa servir per la variable referent a tecnologia de descomposició dinàmica, però amb el valor -100,57 mg/kg ms.

No s'ha trobat una justificació clara a l'increment en el contingut en Zn amb la presència de vidre, ja que dins de la composició del vidre comú ($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 / \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaCO}_3$), no hi ha Zn. No obstant hi ha diverses menes de vidres especials que en contenen en quantitats elevades: vidres òptics (10-15% ZnO), vidres de fosfat (10% ZnO), vidres de soldadura suau (16%), l'anomenat cristall (1%), els vitroceràmics i els vitrocrystalins. La relació trobada només seria justificable si els impropis de vidre tinguessin alguna o algunes d'aquestes tipologies de vidres especials. Complementàriament, aquesta relació es podria també atribuir a que el Zn s'utilitza com a colorant dels vidres, usualment com a cromat de Zn (color verd) o sulfat de zinc (blanc), tot i que no és el metall pesant que més es fa servir. Addicionalment, s'ha trobat que Seelsaen et al. (2006) van observar que el compost presentava una capacitat d'absorció de metalls, entre ells el Zn, superior a la d'altres materials com sorra, zeolites o cartró, entre d'altres, però que en cap cas justifica la relació amb el vidre.

Respecte als resultats vinculats a les tecnologies de descomposició, s'extreuen les mateixes conclusions del model anterior, és a dir, les plantes de digestió anaeròbia poden estar associades a major quantitat de zinc al compost perquè aquest procés previ al compostatge pot intensificar la degradació de la matèria orgànica i conseqüentment facilitar la concentració de minerals.

5.1.2. Coure

En els models models per al coure (Cu), s'han fet les següents transformacions en les variables:

- la variable dependent es presenta com el logaritme natural de Cu per normalitzar la distribució d'aquesta variable, possibilitant millors resultats en les regressions i assegurant la normalitat dels residus.

- així com s'ha fet pels models del Zn, s'han creat dues variables dummy que representen els nivells de tecnologia de descomposició estàtica i dinàmica (inclosos en el model) en comparació amb el nivell de referència de tecnologia basada en digestió anaeròbica.

d) Model 4

Aquest model integra com a variables independents els impropis totals trobats en la FORM (%) i les dues variables *dummy* per la tecnologia de descomposició. Els resultats de l'estimació es ensenyen en la següent equació i en la Taula 14.

$$\text{LnCu} = 4.78 + 0,02 * \text{Impropis totals} - 0,55 * \text{Tecnologia de descomposició estàtica respecte a moviment} - 0,31 * \text{Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment}$$

Taula 14. Paràmetres estimats en el model economètric 4

	Coeficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
C	4,782657***	0,208717	22,91456	0,0000
Impropis totals (%)	0,017464**	0,008241	2,119217	0,0354
Tecnologia de descomposició estàtica respecte al moviment ¹	-0,554930**	0,245705	-2,258517	0,0251
Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment ¹	-0,310376	0,224706	-1,381254	0,1689
Resum estadístic				
Observacions	185			
F-statistic	4,909761			
Prob(F-statistic)	0,002646			
Durbin-Watson (DW)	0,969538			

Notes: ¹ Representen variables *dummy* respecte de la variable de referència de tecnologia basada en digestió anaeròbia; ***, **, * representen significança estadística de l'1%, 5% i 10%, respectivament.

Els resultats indiquen que, en termes mitjans, el contingut de Cu en el compost augmenta un 1,7% amb cada 1% d'increment en el percentatge d'impropis. Igualment, les plantes que tenen tecnologia de descomposició estàtica presenten 55% menys de coure al compost produït en comparació amb les plantes que tenen digestió anaeròbia. Els valors per la variable referent a la tecnologia descomposició dinàmica respecte al moviment no són significatius.

Com s'ha comentat anteriorment, és esperable que s'obtingui una relació causal positiva entre la presència d'impropis en la FORM i les quantitats de contaminant com el Cu trobats en el compost.

Que les mostres de digestió anaeròbia presentin més coure que les mostres de descomposició estàtica es pot relacionar amb que el digerit té menys matèria orgànica que la FORM fresca i amb la baixa solubilitat d'aquest element. En el cas de descomposició

dinàmica, no hi ha diferència significativa respecte de la digestió anaeròbia, fet que es podria relacionar amb una degradació de la matèria orgànica equivalent en els dos casos.

e) Model 5

A diferència del model anterior, el segon model pel coure analitza l'efecte dels impropis especials en la qualitat del compost, en lloc de l'efecte dels impropis totals com s'explica en la següent equació i a la Taula 15.

$$LnCu = 4,95 + 0,55*Impropis especials - 0,59* Tecnologia de descomposició estàtica respecte a moviment - 0,35*Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment$$

Taula 15. Paràmetres estimats en el model economètric 5

	Coefficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
C	4,950363***	0,198006	25,00109	0,0000
Impropis especials (%)	0,547517**	0,251559	2,176495	0,0308
Tecnologia de descomposició estàtica respecte al moviment ¹	-0,593261**	0,266562	-2,225602	0,0273
Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment ¹	-0,354242	0,257179	-1,377414	0,1701
Resum estadístic				
Observacions	185			
F-statistic	3,456228			
Prob(F-statistic)	0,017652			
Durbin-Watson (DW)	0,974290			

Notes:¹ Representen variables *dummy* al respecte de la variable de referència de tecnologia basada en digestió anaeròbia; ***, **, * representen significança estadística de 1%, 5% i 10%, respectivament.

Aquest model indica que, en termes mitjans, el contingut de coure en el compost augmenta un 55% amb cada 1 % d'increment en el percentatge d'impropis especials. Les mostres que provenen de plantes amb tecnologia de descomposició estàtica presenten un menor contingut del Cu un 59% menor que les plantes de digestió anaeròbia. Els valors per la variable Tecnologia de descomposició dinàmica respecte al moviment no són significatius.

Per una banda, la relació entre impropis especials i el coure és esperable, ja que aquests contaminen la matriu orgànica encara que puguin ser retirats. Aquest resultat implica que els impropis especials que arriben a les plantes de compostatge de FORM porten una càrrega de coure significativa que afecta les característiques del compost obtingut. En aquest sentit, cal tenir present que el Cu és el tercer metall més emprat després del Fe i de l'alumini. Les fonts de Cu en els impropis especials poden ser diverses, tenint en compte els que contenen aliatges de Cu tals com bronze (Cu+Zn), llautó (Cu+Sn), alpaca (Cu+Zn+Ni) i altres, com els cables elèctrics i telefònics, canonades d'aigua i gas, equips informàtics (circuit integrats, transformadors i cablejat intern), equips elèctrics (generadors, motors i transformadors), radiadors de cotxes, interruptors, relés, microones, sistemes de calefacció

i refrigeració, elements de construcció i arquitectònics, etc. Complementàriament, el Cu s'empra també com a pigment en pintures, retolació i coloració d'objectes diversos.

Per altra banda, que les mostres de digestió anaeròbia presentin més Cu que les mostres de descomposició estàtica es pot relacionar amb que el digerit té menys matèria orgànica que la FORM fresca i amb la baixa solubilitat d'aquest element. En el cas de descomposició dinàmica, no hi ha diferència significativa respecte de la digestió anaeròbia, el que es podria relacionar amb una degradació de la matèria orgànica equivalent en els dos casos.

5.1.3. Plom

Pel la variable dependent Plom (Pb) s'ha seleccionat un model que compta amb un tipus de transformació ja realitzada per altres models, és a dir, la creació de dues variables *dummy* pel diàmetre de tromel refí que identifiquen diàmetres de 12 mm i 16 mm en comparació a un nivell de referència basat en un diàmetre de 10 mm.

f) Model 6

Aquest model compta amb tres variables independents, en concret, impropis totals trobats en la FORM (%) i els diàmetre de tromel refí de 12 i 16 mm. Els resultats estimats es presenten en l'equació i taula següents.

$$\ln Pb = 3,53 + 0,02 * \text{Impropis totals} - 0,54 * \text{Diàmetre tromel refí 12 mm} - 0,22 * \text{Diàmetre tromel refí 16 mm}$$

Taula 16. Paràmetres estimats en el model economètric 6

	Coefficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
C	3,527975***	0,121210	29,10625	0,0000
Impropis totals (%)	0,018078***	0,006368	2,838986	0,0050
Diàmetre tromel refí 12 mm ¹	-0,544744***	0,201469	-2,703857	0,0075
Diàmetre tromel refí 16 mm ¹	-0,217170**	0,097996	-2,216114	0,0279
Resum estadístic				
Observacions	185			
F-statistic	3,930908			
Prob(F-statistic)	0,009500			
Durbin-Watson (DW)	1,562056			

Notes: ¹ variables dummy respecte de la variable de referència de Diàmetre tromel refí 10 mm; ***, **, * representen significança estadística de l'1%, 5% i 10%, respectivament.

El model estimat indica que, en termes mitjans, el contingut de Pb en el compost augmenta un 2% amb cada 1% d'increment en el percentatge d'impropis totals. A més, les plantes que tenen un diàmetre de tromel refí de 12 mm presenten un 54,4% menys de plom al compost produït en comparació amb les plantes que tenen un diàmetre de tromel refí de 10 mm. El mateix tipus de interpretació es fa servir per la variable de Diàmetre tromel refí 16 mm, però amb el valor -21,7%.

De la mateixa forma que s'ha observat per altres metalls pesants, és esperable verificar una relació causal positiva entre la presència d'impropis i la contaminació de la matriu orgànica amb metalls pesants. El plom en els impropis pot derivar de diverses fonts que en contenen: canonades antigues d'aigua, vidres al Pb, ceràmica i esmalts, cobertes de cables de telèfon, electricitat o internet, bateries elèctriques, estabilitzadors tèrmics i d'ultraviolat en plàstics (principalment de PVC), soldadures de Cu+Sn, així com també de pigments amb plom utilitzats com a colorants, pintat o etiquetat de materials diversos i els emprats específicament en forma de pintura de tetròxid de Pb (mini) com a imprimació anticorrosiva de tota mena de elements de ferro i acer, tant a l'exterior com a l'interior.

Per últim, la utilització de garbells amb llum de pas major de 10 mm pot fer que hi hagi partícules menys degradades i amb menor concentració de matèria mineral, o que aquestes partícules més grans, possiblement en molts casos restes vegetals, presentin un contingut de partida inferior en Pb. D'altra banda també es pot tenir en compte la presència de restes de poda d'arbrat urbà i de carreteres, on els components dels tubs d'escapament poden anar a parar als arbres. El canvi de la tipologia de combustibles cap a reduccions en el contingut en plom es va observar en anteriors estudis.

5.2. Conductivitat elèctrica

L'anàlisi de la variable de conductivitat elèctrica (CE) es presenta a continuació amb dos models de regressió. Per aquests models s'han produït les següents transformacions en les variables independents:

- per la variable referent a la quantitat de FV respecte a FORM tractada s'han exclòs els valors atípics (*outliers*) a partir de l'observació d'aquestes valors en els gràfics de dispersió (*boxplots*). Es van excloure 4 observacions superiors als valors de 293%, garantint millors resultats en termes de significança individual d'aquesta variable en l'explicació de la variable CE, en comparació a la variable amb *outliers*.
- la variable referent a la tecnologia de maduració es presenta com una variable *dummy*, que indica dos nivells, en concret tecnologia de maduració estàtica i dinàmica.

g) Model 7

El primer model disposa de quatre variables independents: impropis especials trobats en la FORM (%), impropis de bosses en la FORM (%), percentatge de FV respecte a FORM tractada i durada de maduració en dies. L'equació i Taula 17 presenten els resultats estimats per aquest model.

$$CE = 3,74 + 5,35 * \text{Impropis especials} + 0,95 * \text{Impropis bosses} + 0,03 * \text{FV respecte a FORM tractada} + 0,03 * \text{Durada maduració}$$

Taula 17. Paràmetres estimats en el model economètric 7

	Coefficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
C	3,740591***	0,862890	4,334955	0,0000
Impropis especials (%)	5,351888***	1,243116	4,305219	0,0000
Impropis bosses (%)	0,949836**	0,291591	3,257428	0,0013
FV respecte a FORM tractada (%)	0,034839***	0,013150	2,649327	0,0088
Durada de maduració (dies)	0,031772***	0,009891	3,212265	0,0016
Resum estadístic				
Observacions	185			
F-statistic	5,781311			
Prob(F-statistic)	0,000212			
Durbin-Watson (DW)	1,395971			

Nota: ***, **, * representen significança estadística de l'1%, 5% i 10%, respectivament.

El model estimat indica que, en termes mitjans, la presència d'impropis especials en la FORM fa que la conductivitat augmenti 5,3 dS/m per cada 1 % que augmenten. L'increment de bosses també deriva en valors més elevats de CE, encara que amb menor magnitud que els impropis especials, és a dir, una pujada d'1 ds/m per cada 1% increment d'impropis de bosses. Per les altres variables, es verifica que per cada 1 % que augmenta la proporció de restes vegetals respecte a FORM tractada, la conductivitat del compost augmenta en 0,03 dS/m. A més, per cada dia que passa en maduració, la CE augmenta 0,03 dS/m.

Així, els impropis poden fer augmentar la salinitat, tal i com s'observa amb els resultats de la conductivitat elèctrica, que es veu incrementada amb la presència de bosses i impropis especials en la FORM, com ja s'ha discutit abastament en l'apartat 4.2.1. Les bosses augmenten lleugerament la CE, però els impropis especials (piles, etc.) tenen molta més incidència, ja que per cada unitat percentual d'increment d'aquests impropis la CE augmenta 5 unitats.

El fet que la CE augmenti en posar més restes vegetals a la barreja resulta contradictori si no és perquè es considera que les plantes que ho fan tenen processos millor acabats, amb una reducció de matèria orgànica més elevada i, per tant, major mineralització que desemboca en una salinitat superior.

Com és d'esperar, la CE també augmenta amb la durada de la maduració, que en principi es pot interpretar com que el procés ha estat més acabat. La incidència d'aquest factor és similar a la de proporció d'incorporació de restes vegetals.

h) Model 8

El segon model per la CE disposa de les mateixes variables independents que el model anterior amb l'excepció del canvi de la variable de Durada de maduració per la variable de Tecnologia de maduració respecte a moviment. L'equació i la taula següents sintetitzen els principals resultats.

$CE = 5,18 + 4,73* \text{ Impropis especials} + 0,76* \text{ Impropis bosses} + 0,04* \text{ FV respecte a FORM tractada} + 1,3* \text{ Tecnologia maduració respecte a moviment}$

Taula 18. Paràmetres estimats en el model economètric 8

	Coefficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
C	5,176432***	0,803039	6,446050	0,0000
Impropis especials (%)	4,725965***	1,146823	4,120919	0,0001
Impropis bosses (%)	0,762010**	0,335181	2,273427	0,0242
FV respecte a FORM tractada (%)	0,037808***	0,014147	2,672601	0,0082
Tecnologia maduració respecte a moviment ¹	1,299677**	0,532670	2,439927	0,0157
Resum estadístic				
Observacions	185			
F-statistic	5,759775			
Prob(F-statistic)	0,000220			
Durbin-Watson (DW)	1,382712			

Notes: ¹ Variable *dummy* representada pel valor “0” per “estàtica” i “1” per “dinàmica”; ***, **, * representen significança estadística de l'1%, 5% i 10%, respectivament.

Els resultats són semblants en relació a les mateixes variables independents utilitzades en el model anterior. En termes mitjans, la presència d'impropis especials en la FORM fan que la conductivitat augmenti 4,72 dS/m per cada 1 % que augmenten, mentre que l'increment de l'1% en els impropis de bosses s'associa a una pujada de 0,76 dS/m en el valor de la CE del compost. Per cada 1 % que augmenta la proporció de restes vegetals respecte FORM, la conductivitat del compost augmenta en 0,04 dS/m. Al respecte de la lectura de l'última variable independent, s'observa que les plantes amb tecnologia de maduració dinàmica presenten 1,3 dS/m més respecte de les de tecnologia de maduració estàtica.

Quant a l'explicació d'aquests resultats, la presència de bosses, d'impropis especials i la proporció de FV en la barreja i seva relació amb la CE es justifica de la mateixa manera que s'ha exposat en el model anterior.

Quant als efectes de la tecnologia, es pot interpretar que el fet de voltejar el material contribueix a reduir físicament la mida de partícula, de manera que la pot deixar més exposada a la degradació i mineralització posterior, alhora que també ofereix més relació superfície/volum a l'hora de fer l'extracte aquós per a determinar la CE, incrementant així la salinitat del compost.

5.3. Test d'autoescalfament (temperatura màxima)

Per aquesta variable únicament es presenta un model de regressió, on s'han fet les següents transformacions de variables independents:

- per la variable referent a Tecnologia de descomposició s'ha creat una variable *dummy* amb dos nivells, en concret un nivell associat a plantes basades en tecnologia estàtica i dinàmica i un altre per plantes de digestió anaeròbia.
- per la variable de diàmetre de tromel refí també s'ha produït una variable *dummy* amb dos nivells referents, per una banda, a les plantes amb diàmetre de 12 i 16 mm i, per altra, a les plantes amb diàmetre de 10 mm.

i) Model 9

El model analitza l'efecte de les variables independents impropis bosses trobats a la FORM (%), saturació (%), tecnologia de descomposició respecte al moviment i diàmetre tromel refí, sobre la variable de Test d'autoescalfament. Es presenten els principals resultats en l'equació i taula següents.

Test d'autoescalfament = 21,43 + 5,63 Impropis bosses + 0,28* Saturació + 10,45* Tecnologia de descomposició respecte al moviment + 7,23* Diàmetre tromel refí*

Taula 19. Paràmetres estimats en el model economètric 9

	Coeficient	Error estàndard	T estadístic	Valor P
C	21,42981***	5,519372	3,882653	0,0002
Impropis bosses (%)	5,634795**	2,358247	2,389400	0,0181
Saturació (%)	0,281136**	0,132972	2,114247	0,0361
Tecnologia descomposició respecte al moviment ¹	10,44991**	4,208858	2,482838	0,0141
Diàmetre tromel refí ²	7,234591**	3,592600	2,013748	0,0458
Resum estadístic				
Observacions	157			
F-statistic	4,911519			
Prob(F-statistic)	0,000943			
Durbin-Watson (DW)	1,605103			

Notes: ¹ Representa una variable *dummy* composta per totes les tecnologies de descomposició en comparació a la variable de referència de tecnologia basada en digestió anaeròbia; ² Variable *dummy* que compara els valors de diàmetre de 10mm (variable assumeix el valor "0") amb els diàmetres de 12 i 16 mm (variable assumeix el valor "1"); ***, **, * representen significança estadística de l'1%, 5% i 10%, respectivament.

Els resultats de la regressió indiquen que, en termes mitjans, per cada punt percentual que augmenta la variable Impropis bosses en la FORM, la temperatura del test d'autoescalfament augmenta 5,6 °C. A més, per cada unitat percentual que augmenta la saturació de la planta, la temperatura del test d'autoescalfament augmenta 0,3 °C. Respecte de l'efecte de la variable Tecnologia de descomposició, s'observa que les mostres de compost que provenen de plantes amb descomposició estàtica i dinàmica presenten, en termes mitjans, més 10,4 °C en el test d'autoescalfament que plantes de digestió anaeròbia. Per últim, les plantes que garbellen el material a 12 o 16 mm augmenten la temperatura d'aquest test en 7,2 °C respecte les de 10mm.

La lectura d'aquests resultats deriva en les següents explicacions. Primer, la presència de bosses en la matriu del procés de compostatge pot limitar la transformació biològica ja que dificulten el pas de l'aire, entre d'altres efectes negatius, i creen condicions locals d'anaerobiosi.

Segon, les plantes que tracten més material i, per tant, tenen un percentatge de saturació superior, estarien associades a processos més ineficaços, on no es produeix prou transformació de matèria orgànica i, per tant, s'assoleix una estabilització més baixa, tal i com mostren els resultats, i provoquen un major increment de temperatura en el test d'autoescalfament.

Tercer, en el cas de la digestió anaeròbia, com s'ha explicat anteriorment, el fet que el material que entra a compostatge hagi estat digerit prèviament fa que hi hagi una diferència amb la FORM fresca que arriba a les plantes on només es fa compostatge, doncs a l'inici del procés biològic aeròbic en un cas entra un material ja més degradat (digerit anaeròbicament) i, per tant, al final d'aquest procés s'obté un material més estabilitzat que produeix un menor increment de temperatura en el test d'autoescalfament.

Per últim, que la mida de partícula sigui més gran indica que ha estat menys degradada i per tant en el conjunt final de material s'obté una mostra més inestable que provoca un major increment de temperatura, el que justificaria una major temperatura del test en mostres més grolleres.



6. Determinació d'escenaris i projeccions de qualitat

Aquest apartat presenta diversos escenaris basats en alguns dels models de regressió estimats en l'apartat anterior. L'objectiu principal és realitzar la projecció de l'efecte de possibles variacions en variables independents, sobretot vinculades als impropis, en les variables de qualitat de compost estudiades (Zn, Cu, Pb, conductivitat elèctrica-CE i test d'autoescalfament).

Aquestes simulacions es basen en un model per cadascuna de les variables dependents anteriors, en concret: pel Zn s'ha seleccionat el model que ha presentat significança individual en tots els paràmetres (Model 2); pel Cu s'ha preferit usar el model amb la variable independent d'impropis totals (Model 4); pel Pb s'ha fet servir l'únic model estimat (f)Model 6); per la CE s'ha seleccionat el model amb la variable independent de tecnologia de maduració (Model 8) en lloc de la variable de durada de maduració; i pel test d'autoescalfament s'ha utilitzat el Model 9.

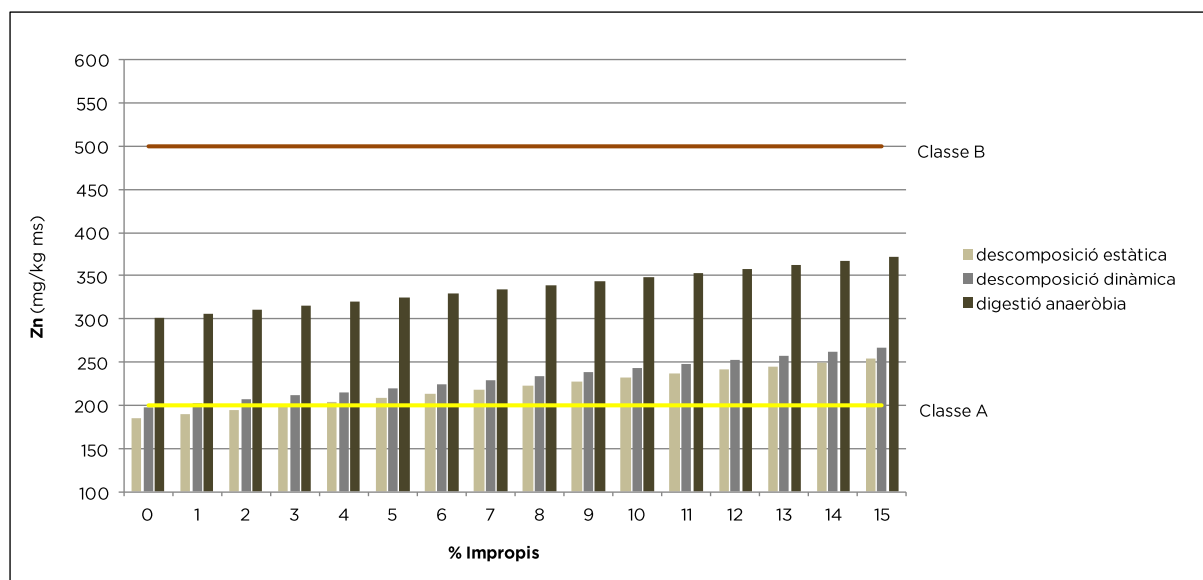
6.1. Relació entre la variació d'impropis totals i el Zinc

La primera projecció es basa en el Model 2. La Figura 4 presenta els escenaris projectats que relacionen l'efecte de la variació en la quantitat d'impropis d'entre valors de 0% i 15%, és a dir, valors inferiors i superiors a la mitjana observada en les plantes (10,77%; Taula 6). A més, els resultats presenten els valors projectats pel Zn segons el tipus de planta basada en la tecnologia de descomposició estàtica, dinàmica o digestió anaeròbica. Igualment es presenta els llindars de la qualitat del Zn en termes dels valors de Classe A (200 mg/kg ms) i Classe B (500 mg/kg ms) del RD506/2013. La Classe C (1.000 mg/kg ms) no es presenta en la figura atès que representa un nivell molt elevat no assolit per cap planta.

Els resultats indiquen un valor màxim de 371 mg/kg ms referent a un valor de 15% d'impropis i per plantes basades en digestió anaeròbica. Al respecte del valor mínim (185 mg/kg ms), aquest es refereix a un valor del 0% d'impropis i per plantes amb tecnologia de descomposició estàtica. Tots els valors estimats queden per sota del llindar del compost de Classe B pel que fa al Zn i per sobre del llindar de la Classe A, amb excepció de les plantes

de descomposició estàtica i impropis per sota del 3% i les plantes amb descomposició dinàmica i impropis al 0%.

Figura 4. Escenaris per la variació d'impropis totals en el Model 2 i relació amb el contingut en Zn



Nota: El llindar corresponent a la Classe C (1.000 mg/kg ms) no es presenta a la figura per facilitar la seva lectura i perquè els valors estimats es posicionen molt per sota d'aquest llindar.

Els resultats mostrats indiquen que la digestió anaeròbia prèvia al compostatge contribueix clarament a augmentar el contingut de Zn, molt per sobre de les altres dues variants, atribuïble a una reducció total de matèria orgànica més gran degut a les dues fases (anaeròbia i aeròbia) que té com a conseqüència un increment en el contingut mineral, en aquest cas del Zinc. També la descomposició dinàmica contribueix a una major concentració, respecte l'estàtica, possiblement per un major trencament de partícules i major exposició a la degradació, que comporten una mineralització superior.

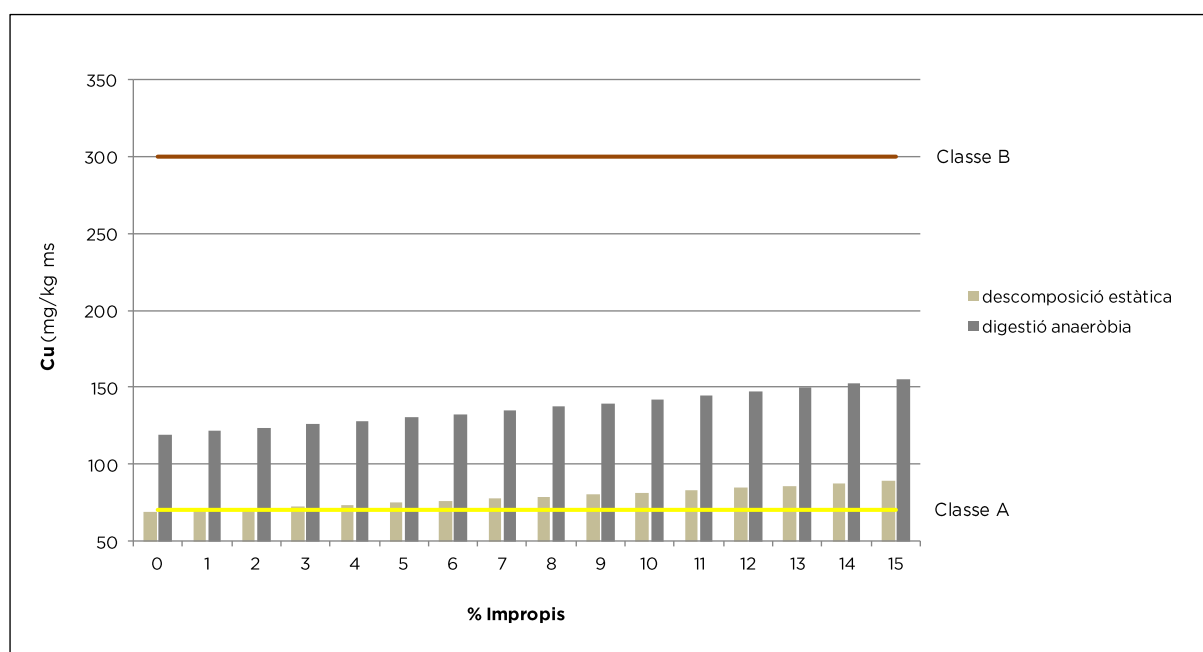
6.2. Relació entre la variació d'impropis totals i el coure

Per a la projecció de l'efecte de la variació dels impropis sobre el Cu s'utilitza el Model 4 i es va fer servir el mateix procediment de la projecció que en l'apartat anterior, amb les mateixes variables independents.

Els valors estimats es comparen amb tres nivells de qualitat del compost definits pel RD506/2013 pel que fa a la presència de coure: Classe A (70 mg/kg ms); Classe B (300 mg/kg ms); i Classe C (400 mg/kg ms). Una diferència en relació als escenaris desenvolupats pel Model 2 del Zn és que pel Cu únicament es presenten els resultats per plantes amb tecnologia de descomposició estàtica i digestió anaeròbia. No es fa la comparació amb les plantes amb tecnologia de descomposició dinàmica perquè els resultats del model de regressió no han estat significatius per aquesta variable.

Els resultats presentats a la Figura 5 indiquen que tots els valors estimats queden per sobre del nivell corresponent a la Classe A de compost, amb l'excepció de plantes de descomposició estàtica que presenten valors de 68,6 i 69,8 mg/kg ms per a nivells d'impropis de 0% i 1%, respectivament.

Figura 5. Escenaris per la variació d'impropis totals en el Model 4 i relació amb el contingut en Cu



Nota: El llindar corresponent a la Classe C (400 mg/kg ms) no es presenta a la figura per facilitar la seva lectura i perquè els valors estimats es posicionen molt per sota d'aquest llindar.

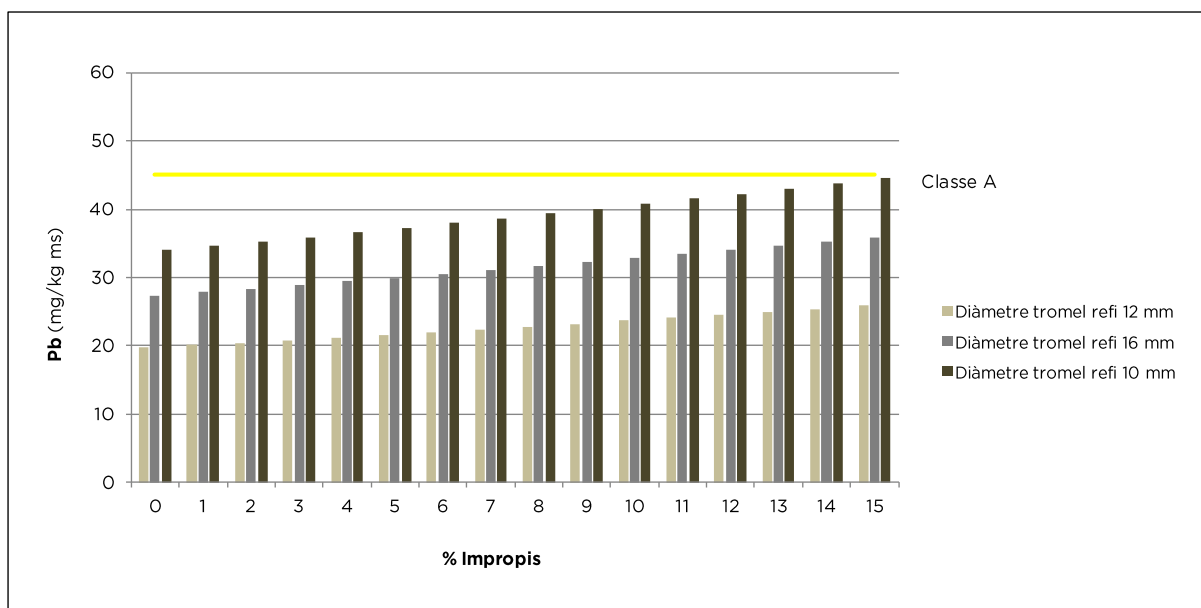
La justificació de la diferència respecte les variables considerades seria la mateixa que en el cas del Zn, però aquí es pot observar un increment major (superior al doble) del compost que ha tingut un tractament previ de digestió anaeròbia.

6.3. Relació entre la variació d'impropis totals i el Plom

La projecció d'escenaris que simulen l'efecte de la variació d'impropis en la presència de Pb en el compost compta, a diferència dels dos escenaris anteriors, amb la comparació entre plantes que es diferencien pel diàmetre de tromel refí (de 10, 12 i 16 mm) (Model 6). Una vegada més, es comparen els resultats trobats amb els nivells de qualitat del compost en termes de la presència de metalls pesants, en aquest cas plom (Pb) i les classes del RD506/2013: Classe A (45 mg/kg ms); Classe B (150 mg/kg ms); i Classe C (200 mg/kg ms).

A partir de l'anàlisi de la Figura 6, es pot observar que els valors estimats s'ubiquen tots per sobre del nivell de Classe A (45 mg/kg ms), arribant a valors mínims de 19,8 mg/kg ms per plantes amb diàmetre de tromel refí de 12 mm.

Figura 6. Escenaris per la variació d'impropis totals en el Model 6 i relació amb el contingut en Pb



Nota: El llindar corresponent a la Classe B (150 mg/kg ms) i a la Classe C (200 mg/kg ms) no es presenten a la figura per facilitar la seva lectura i perquè els valors estimats es posicionen molt per sota d'aquests llindars.

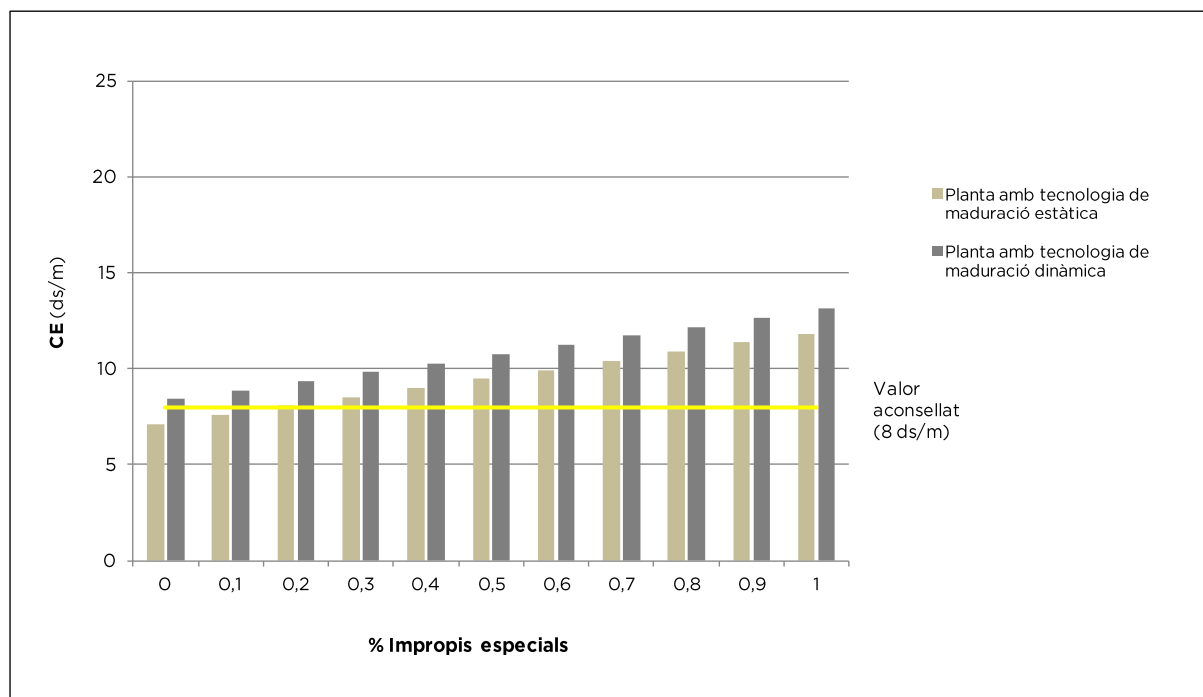
Malgrat que s'observa un augment del contingut en plom amb el percentatge d'impropis per als tres tipus de garbellat, cal tenir en compte que es tracta de valors baixos, ja que es troben per sota del nivell superior de la classe A. Això és especialment important en considerar que el plom és un contaminant i no un micronutrient, i que per tant implica més riscos que el Zn o el Cu.

6.4. Relació entre l'increment d'impropis especials i la conductivitat elèctrica

En aquest apartat se simula l'efecte de la variació dels impropis especials d'entre 0% i 1%, és a dir, valors inferiors a la mitjana observada en les plantes (0,11%; Taula 6) sobre els valors de CE en plantes amb tecnologia de maduració estàtica i dinàmica. A més, es va fer la seva comparació amb el valor aconsellat de CE (8 ds/m). Per les variables d'impropis de bosses i FV respecte a FORM es va assumir un valor constant de 20,61% i 1,52%, respectivament, que són els valors mitjans presentats a les taules 5 i 6. La simulació d'escenaris se ha basat en el Model 8.

Els resultats indiquen que únicament per les plantes amb maduració estàtica i valors d'impropis especials de 0 i 0,1%, les estimacions compleixen amb el valor aconsellat (8 ds/m). A partir dels valors d'impropis especials de 0,3% els valors de CE queden per sobre del valor aconsellat i arriben al màxim de 13,1 ds/m en el cas de plantes amb tecnologia de maduració dinàmica i quantitats d'impropis especials de l'1% (Figura 7).

Figura 7. Escenaris per la variació d'impropis especials en el Model 8 i relació amb la CE



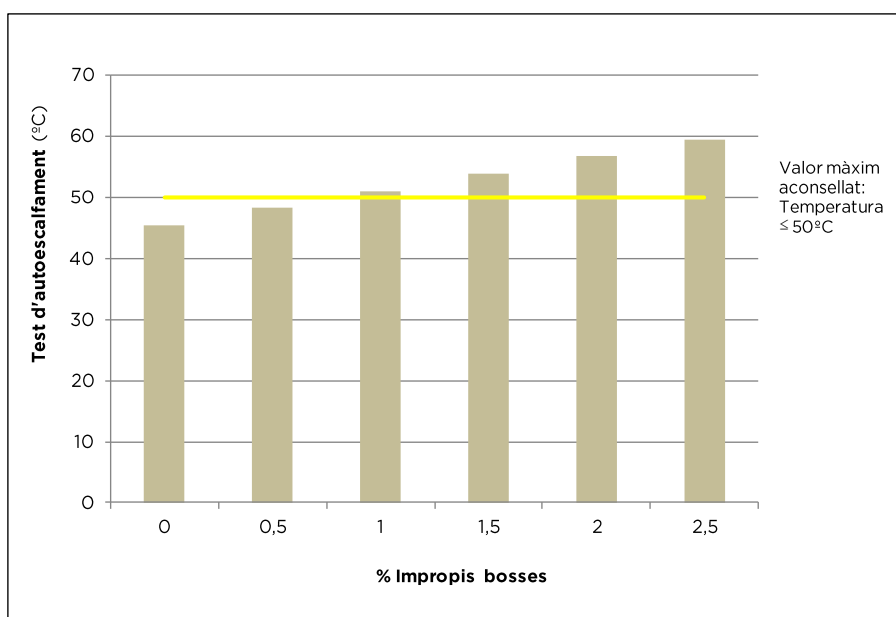
El valor de la CE normalment és elevat en el compost, especialment de FORM, ja que depèn de les matèries primeres; la presència de restes vegetals, de salinitat baixa, pot ajudar a un cert efecte de dilució però que no és suficient i es veu agreujat amb la mineralització que es produeix al llarg del procés i que és major quan més durada té. Com s'ha observat abans (les fases dinàmiques contribuïen a augmentar el contingut en metalls), aquí també s'observa que el volteig augmenta la CE, un comportament atribuïble al trencament de partícules en els sistemes dinàmics que afavoreixen els processos de mineralització i, per tant, l'augment de la salinitat del compost.

6.5. Relació entre l'increment d'impropis de bosses i la temperatura màxima del test d'autoescalfament

L'últim escenari presentat en aquest informe relaciona l'efecte de la variació dels impropis de bosses, per nivells inferiors i superiors a la mitjana (1,52%; **Taula 6**) en el resultat del test d'autoescalfament per plantes amb tecnologia de descomposició estàtica o dinàmica, de diàmetre de tromel refí de 12 o 16 mm i amb saturació mitjana (22,41%; Taula 5). Aquest escenari es relaciona amb el Model 9.

La Figura 8 indica que únicament pels valors d'impropis de bosses de 0% i 0,5%, les projeccions dels valors del test d'autoescalfament estan per sota del màxim aconsellat (Temperatura menor o igual a 50 °C).

Figura 8. Escenaris per la variació d'impropis bosses en el Model 9 i relació amb l'increment de temperatura durant el test d'autoescalfament



Segons el model presentat, un compost produït en absència de bosses i amb les característiques de les plantes estudiades, ja experimentaria una temperatura d'uns 45 °C, que el situaria en classe III, és a dir que es tractaria d'un material no prou acabat. En el cas d'una presència de bosses del 2,5% la temperatura es podria esperar que pugés pràcticament a 60 °C, el que implicaria un material molt inestable (classe II i molt a prop de classe I).



7. Propostes

Aquest apartat presenta un conjunt de propostes que pretenen incidir sobre tres objectius. Primer, s'identifiquen possibilitats de millora de la base de dades utilitzada, integrant suggeriments al respecte de la recol·lecció i tractament de dades que poden ser d'utilitat per a futurs estudis. Segon, s'identifiquen possibilitats de millora de la gestió de la FORM a partir dels resultats del present estudi. Per últim, s'identifiquen possibles línies de recerca futures.

7.1. Possibilitats de millora en la base de dades

En aquest estudi s'han identificat les següents oportunitats de millora en la base de dades:

- Reduir la manca de dades per algunes plantes de compostatge i períodes d'observació, incrementant la freqüència de recollida de dades i garantint-ne l'harmonització amb l'objectiu d'assegurar dades de panell balancejades i consegüentment facilitar l'anàlisi estadística;
- Identificar noves variables de mesura que permetin caracteritzar la qualitat de la FORM que entra a les plantes de compostatge per període i regió (p.e. indicadors que permeten caracteritzar el tipus de aliments trobats a la FORM així com el seu origen específic);
- Millorar la precisió en la mesura d'aquelles variables que actualment s'expressen solament en termes de si els valors superen o no certs llindars (p.e. pels valors més baixos observats per les variables d'impureses o metalls pesants com el mercuri o cadmi).
- Estudiar les dades per grups de plantes, com per exemple mida de planta, durada de procés, tipus de descomposició o maduració etc. a través de la separació de mitjanes i veure com afecta a la interpretació de resultats.

7.2. Possibilitats de millora en la gestió de la FORM

Els resultats trobats en les anàlisis univariant, bivariant i de regressió permeten suggerir un conjunt de possibilitats de millora en la gestió de la FORM, en concret:

- La necessitat d'afavorir models de recollida selectiva que resultin en baixos percentatges d'impropis per contribuir a la millora de la qualitat del compost. Aquest objectiu pot incloure actuacions a nivell dels productors de residus (p.e. particulars, empreses) a partir del desenvolupament de campanyes de sensibilització públiques sobretot en les zones amb nivells més elevats d'impropis en la FORM, la promoció de l'ús de bosses compostables i cubells airejats a les llars, la promoció del model de recollida selectiva porta a porta, etc.;
- Promoure la millora de la selecció d'impropis, bàsicament pel que fa al moment en el qual efectuar el pretractament i a la velocitat de processament d'aquest a les plantes de compostatge, com a eina secundària i complementària, després del desplegament de mesures per a la millora de la recollida selectiva;
- A partir del Model 1 per la CE, on en termes mitjans s'ha detectat que més durada de maduració contribueix a majors nivells d'aquesta variable, es pot considerar experimentar en reduir la durada de maduració en les plantes amb pitjors resultats en termes de la CE (sempre i quan s'hagin assolit els objectius d'estabilitat del compost), mantenint l'atenció en relació a l'efecte possible en altres indicadors. En aquest sentit cal diferenciar entre la salinitat que té l'origen en el material inicial, i probablement en la relació amb la presència d'impropis (com els especials) de la salinitat deguda a la mineralització pròpia del procés;
- El Model 1 pel Test d'autoescalfament indica, entres altres relacions, un increment d'aquesta variable a causa de l'augment de saturació a les plantes. La saturació s'hauria d'estudiar planta per planta per tal de valorar si aquest dèficit d'estabilitat del compost relacionat amb la saturació de les plantes prové d'una mala praxis en el maneig dels residus o si el problema és degut a l'infradimensionament inicial de la instal·lació o a un augment sobrevingut de la capacitat. Per reduir la saturació a les plantes es pot avaluar la possibilitat d'enviar FORM a plantes amb nivells de saturació més baixos;

7.3. Possibilitats de recerca futures

Aquest apartat presenta diverses possibilitats addicionals de recerca futura:

7.3.1. Noves anàlisis sobre la qualitat de compost

Hi ha possibilitats de continuar l'anàlisi estadística efectuada en aquest estudi a partir de les següents opcions:

- El Model 1 pel Zn presenta una relació causal negativa entre la durada de producció i la presència d'aquest metall pesant. L'explicació d'aquest resultat no tant esperable s'ha centrat en la possibilitat que les plantes amb processos més

llargs poden tenir menor contingut inicial de metalls. Per l'estudi d'aquesta hipòtesi caldria analitzar la composició inicial de la FORM en aquest tipus de plantes;

- Els resultats de diversos models indiquen que, en termes mitjans, les plantes basades en digestió anaeròbia presenten valors més elevats de metalls pesants en comparació amb plantes amb tecnologia de descomposició estàtica o dinàmica. Nous estudis podrien incidir en l'anàlisi més detallada de les raons d'aquests resultats;
- El fet que en el Model 1, la CE augmenti en posar més restes vegetals a la barreja es considera contradictori, encara que podria ser que les plantes amb més restes vegetals puguin tenir processos millor acabats, amb una reducció més forta de matèria orgànica, i consegüentment major mineralització i per tant salinitat més elevada. Noves anàlisis poden verificar aquesta possibilitat amb més detalls;
- L'aplicació de nous models de regressió a partir de la base de dades actual o de bases de dades millorades en el futur. Un exemple és la possibilitat de desenvolupar models de regressió per a l'anàlisi d'algunes variables dependents discretes que poden indicar nivells diferents d'impureses trobades en el compost;
- Hi ha tota una sèrie de dades, sobretot referents a les analítiques de compost (p.e. altres metalls pesants no analitzats, nutrients al compost), que no han estat considerats en els models d'aquest estudi i que es poden considerar en futures anàlisis;
- La focalització en una o dues plantes de compostatge a Catalunya amb la consideració d'un període d'observació més extens. Aquesta idea podria comptar amb la col·laboració dels gestors de les mateixes plantes quant al possible establiment de canvis en els processos de gestió de la FORM per part d'aquests actors i la modelització dels efectes d'aquests canvis sobre la qualitat del compost produït;
- Esbrinar de quins productes provenen els impropis més perjudicials per la qualitat de la FORM;

7.3.2. Anàlisi de preferències dels consumidors al respecte de la qualitat del compost

Aquesta idea surt des de la consideració de la necessitat de garantir la utilització del compost produït en les plantes de compostatge a partir de l'adequació de les característiques del producte a les necessitats dels sectors agrícola, de jardineria i paisatgisme i de restauració i rehabilitació de sòls. Per a aquesta finalitat es proposa la realització d'una anàlisi de les preferències dels potencials consumidors a Catalunya.

Aquesta anàlisi es basa en un experiment d'eleccions (en anglès, *choice experiment*), que és definit com un mètode de valoració monetària que permet conèixer les preferències dels potencials consumidors sobre un producte i els diversos atributs que el componen. Entre els

atributs del compost es pot incloure, per exemple, la seva classe quant a la composició de metalls pesants, la composició al respecte de nutrients, si disposa (o no) de certificació ecològica, el seu origen i el seu preu de venda. Cada atribut seleccionat es pot caracteritzar en funció de diversos nivells. Per exemple, la classe del compost determinada per la presència de metalls pesants pot variar entre les classes A i B.

Habitualment, en aquests tipus d'experiments es presenten diversos tipus d'alternatives dels béns o serveis ambientals, en aquest cas, del producte compost. Les alternatives surten com a combinacions dels atributs i nivells seleccionats per caracteritzar el producte. Per cada participant en l'estudi es demana que seleccioni la combinació de la seva preferència. La Taula 20 és un exemple d'una targeta d'elecció, on el potencial consumidor ha de seleccionar el producte 1, 2 o cap, en el cas que no tingui preferència evident.

Taula 20. Exemple d'una targeta d'elecció del tipus de compost preferit

	Producte		
	1	2	
Classe metalls pesants	A	B	
Certificació ecològica	No	Sí	Cap de les dues opcions
Origen	Catalunya	Altres països de la UE	
Preu/kg (€)	2	2,5	
Selecció de l'opció preferida	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

A partir de la circulació de targetes diferents per cada participant es poden identificar les preferències mitjanes dels potencials consumidors al respecte del producte i dels seus atributs. Igualment, es poden estimar els valors monetaris que els potencials consumidors estan disposats a pagar per un tipus de producte en comparació amb distintes alternatives.

Els resultats d'aquest tipus d'experiment poden ajudar a comprendre millor les preferències dels potencials consumidors i d'aquesta forma possibilitar el millor ajustament entre producte i consumidor.

7.3.3. Anàlisi de les necessitats del sector productiu de compost de cara a la millora del procés

Es podrien efectuar entrevistes o enquestes amb el sector productiu per conèixer les seves inquietuds respecte de la gestió del procés. L'objectiu d'aquesta consideració seria discernir si a les plantes es fa tot el que es pot amb els recursos que es tenen o si es podria fer millor si hi hagués per exemple una millor formació del personal que hi treballa.

També es pot considerar realitzar sessions informatives i de discussió amb el sector productiu sobre els resultats de l'estudi i els impactes que pot tenir en la gestió de les plantes.



8. Resum i conclusions

Aquest informe ha presentat els resultats d'una anàlisi estadística de les dades de caracterització de FORM a 21 plantes de compostatge de Catalunya, considerant el període de 2010 a 2014, amb una freqüència de dades trimestral. S'ha treballat amb una base de dades original de 92 variables referents a aspectes diversos de disseny i de procés, i de paràmetres de compost a les plantes de compostatge. Aquest nombre es va posteriorment ampliar amb la transformació de variables per facilitar l'anàlisi estadística.

Aquesta anàlisi estadística s'ha centrat en els següents objectius: primer, l'anàlisi univariant, que ha permès caracteritzar les plantes de compostatge en termes de diverses variables referents als impropis presents a la FORM entrant, el maneig del procés i el disseny de les plantes; segon, l'anàlisi bivariant de les dades, amb l'estimació de les taules de correlació i de relació causals entre les variables d'estudi; tercer, el desenvolupament de diversos models de regressió amb l'objectiu principal de quantificar l'efecte dels impropis en varis paràmetres de qualitat de compost com la presència de metalls pesants, la conductivitat elèctrica i la temperatura màxima obtinguda en el test d'autoescalfament. A més, s'han introduït en aquests models altres variables independents com el tipus de tecnologia de descomposició, el diàmetre del tromel de refí, la durada de la producció, etc.; quart, a partir d'aquests models de regressió, s'han simulat alguns escenaris amb el propòsit principal de mesurar com la variació dels impropis, entre nivells inferiors i superiors als valors mitjans observats a les plantes, pot afectar els paràmetres de qualitat anteriorment identificats; per últim, s'han presentat diverses propostes que poden incidir en la millora de la base de dades utilitzada en aquesta anàlisi estadística i en la millora de la gestió de la FORM. També s'han identificat noves línies de recerca. Els principals resultats i conclusions d'aquesta anàlisi s'exposen a continuació.

Les plantes de compostatge analitzades presenten força heterogeneïtat en relació a diverses característiques. Alguns exemples inclouen: la capacitat tècnica anual, que pot variar entre 100 i 90.000 tones/any; el temps fins a la selecció d'impropis, on es troben plantes que no fan selecció degut a la poca quantitat d'impropis en la FORM, i altres que seleccionen a l'inici de la recepció de la FORM o després de diversos dies; el tipus de

tecnologia de descomposició (basada en un sistema de pila dinàmica en el 33,3% de les plantes, seguit de túnel (28,6%), digestió anaeròbia (19,1%), i pila dinàmica ventilada i sitja ventilada (9,5%)); o la durada total del procés de producció, comprès entre 52 i 150 dies.

Les plantes analitzades presenten valors mitjans de 10,77% d'impropis en la FORM entrant, compresos entre un mínim del 0,13% i un màxim del 30,2%. Entre els tipus d'impropis destaca la presència de plàstic, amb valors mitjans del 3,2%, seguit de les bosses de plàstic (1,52%) i del paper (1,47%). Aquests valors d'impropis resulten inferiors calculats com a mitjana simple per al conjunt de la mostra i per a tot el període, resulten inferiors a les mitjanes ponderades segons la grandària de les plantes degut a que les plantes que reben més tones acostumen a tenir majors nivells d'impropis. Per exemple, la mitjana ponderada d'impropis de tots els circuits l'any 2014 va ser de 13,41%.

En relació a les variables dependents utilitzades en els models de regressió -zinc, coure, plom, conductivitat elèctrica i temperatura màxima trobada al test d'autoescalfament- destaquen els següents aspectes: primer, els nivells de metalls pesants en el compost produït per les plantes són, en termes mitjans, superiors al millor nivell de qualitat (Classe A) en els casos del plom, coure i del zinc, encara que pel plom els valors s'aproximen a aquest nivell; segon, la conductivitat elèctrica presenta valors mitjans de 8,03 ds/m, ben proper al nivell aconsellat (8 ds/m); i tercer, el valor mig trobat pel test d'autoescalfament (46,3 °C) és una mica per sota del valor aconsellat (<50 °C).

Quant a l'anàlisi de regressió, s'han desenvolupat 9 models: 3 pel zinc, 2 pel coure, un pel plom, un per la conductivitat elèctrica i un per la temperatura màxima del test d'autoescalfament. Per tots els models s'ha inclòs al menys una variable independent referent als impropis, en la seva majoria impropis totals trobats en la FORM, però també impropis de bosses, vidre i especials. Una altra variable independent que ha estat molt present en els models de regressió ha estat el tipus de tecnologia de descomposició basada en digestió anaeròbia, descomposició dinàmica i estàtica. Per últim, el conjunt de variables independents s'ha completat amb altres com ara: el diàmetre de tromel refí, la durada de producció, el tipus de tecnologia de maduració, el percentatge de FV respecte a FORM tractada o el nivell de saturació de les plantes.

Els models de regressió han donat resultats consistents amb la teoria. Les estimacions menys clares han derivat en noves hipòtesis, que donen espai per a recerca futura.

Un dels resultats més significatius ha estat la verificació de que l'increment d'impropis a la FORM afecta negativament a la qualitat del compost per a tots els paràmetres analitzats. Aquest resultat és molt rellevant, verificant la múltiple afectació dels impropis en el producte final, aspecte que ajuda a motivar tant la necessària reducció d'impropis que arriben amb la FORM, com la importància de la seva separació a les plantes.

Altres resultats interessants es relacionen amb el fet que, a nivell mig, les plantes de compostatge de digestió anaeròbia semblen estar associades a una major presència de zinc, coure i plom en comparació amb plantes amb tecnologia de descomposició estàtica i dinàmica. L'explicació per aquest resultat rau en la possibilitat de que el procés de digestió anaeròbia pot intensificar la degradació de la matèria orgànica i, de forma conseqüent,

augmentar la concentració de minerals. D'altra banda, seria interessant estudiar les dades per grups de plantes per poder aprofundir i corroborar aquests resultats.

Altres resultats inclouen la relació causal positiva entre la durada de maduració i la conductivitat elèctrica, amb la interpretació de que el procés pot estar més acabat i, per tant, amb més mineralització, que significa major salinitat. A més, s'observa que major saturació pot significar temperatures més elevades del test d'autoescalfament, possiblement degut a una estabilització més baixa de la matèria orgànica. Igualment, s'ha estimat que plantes amb diàmetre de tromel de refí de 12 i 16 mm registren valors més elevats en aquest test, el que pot significar que la mida de partícula més gran està menys degradada i, per aquest motiu, és més inestable.

Per últim, resultats no tan esperables inclouen sobretot la relació causal positiva entre la variable de percentatge de FV respecte a la FORM i la conductivitat elèctrica. Una possible explicació apunta que pot ser que les plantes amb més proporció de FV en la FORM puguin tenir processos més acabats, fet que pot explicar que presentin major mineralització i, per aquesta raó, més salinitat.

A partir dels models de regressió s'han desenvolupat diversos escenaris basats en la simulació de l'efecte de la variació dels impropis en els paràmetres de qualitat de compost estudiats. Els principals resultats indiquen que la reducció d'impropis contribueix a reduir la presència de metalls pesants, així com de la conductivitat elèctrica i la temperatura màxima del test d'autoescalfament. No obstant això, els escenaris suggereixen que per alguns paràmetres possiblement es necessitin més canvis en la gestió de la FORM per arribar als límits de valors aconsellats o als nivells definits com de millor qualitat pel que fa a la presència de metalls pesants (Classe A).

En la darrera secció de l'informe s'han presentat diverses propostes relacionades amb la millora de la base de dades actual, de la gestió de la FORM i amb noves idees de recerca. Respecte del primer punt es conclou que hi ha marge per la millora de la base de dades actual a partir de la reducció de la manca de dades per algunes plantes o la identificació de noves variables que permetin caracteritzar la qualitat de la FORM, etc.

Sobre possibilitats de millora de la gestió de la FORM, destaca la necessitat d'afavorir models de recollida selectiva que resultin en menors nivells d'impropis o la possibilitat d'estudiar planta per planta per tal de valorar l'eficàcia de la gestió i possiblement identificar, si la saturació prové d'una mala praxis en el maneig dels residus.

Per últim, com a idees de recerca futura es plantegen nous tipus d'anàlisi estadística sobre la qualitat del compost (p.e. una anàlisi més detallada de la relació causal positiva trobada entre el percentatge de FV respecte a la FORM i la conductivitat elèctrica; la continuació d'aquest estudi per una o dues plantes de compostatge a Catalunya, considerant un període més extens, etc.) així com poder explorar possibilitats de treball de camp.

Aquest estudi ha permès, d'una banda, ratificar de manera quantitativa percepcions que ja es tenien sobre la incidència dels impropis sobre el producte de les plantes de tractament de FORM, i d'altra, apuntar noves interrelacions sobre les quals caldrà seguir investigant. En

base als resultats obtinguts, es poden prendre decisions sobre el tipus de models de recollida i tractament a promoure, les quals haurien d'acabar revertint en una millor gestió de la FORM i en l'obtenció d'un compost de millor qualitat.



9. Annexos

Taula A1. Llistat de variables incloses en la base de dades original

	Variable	Descripció
Identificació de la observació, període, planta de compostatge	Any	Any de la dada
	Trim	Trimestre
	Planta	Planta de compostatge
Aspectes de planta	GesPI	Gestió de la planta
	TecD	Tecnologia descomposició
	TecDV	Tecnologia descomposició respecte ventilació
	TecDM	Tecnologia descomposició respecte moviment
	TecM	Tecnologia maduració
	TecMV	Tecnologia maduració respecte ventilació
	TecMM	Tecnologia maduració respecte moviment
	CtecA	Capacitat tècnica anual
	CtecT	Capacitat tècnica trimestral
	Tini	Temps inici tractament
	Tdesc	Durada descomposició
	Tmad	Durada maduració
	Ttotal	Durada total (Tdesc+Tmad)
	Tsel	Temps fins a selecció d'impropis
	DiamPret	Diàmetre tromel pre-tractament
	DiamRefi	Diàmetre tromel refí
	Entrades i sortides	EntFO
SorFO		Sortides de FORM (t)
FOtrac		FORM tractada (EntFO-SorFO) (t)
EntFV		Entrades FV (t)
FVFOtrac		FV respecte FORM tractada (%)
SorReb		Sortides rebuig (t)
SorComp		Sortides compost expedit (t)
ImpTotT		Impropis totals tones (t)
RebImp		Rebuig generat respecte impropis totals tones (-)
RebFO		Rebuig respecte FORM tractada (Fotrac) (-)
Rto		Rendiment. Compost respecte FORM tractada
Sat		Saturació. FORM tractada respecte Capacitat tècnica (%)
Impropis		Poda
	Vidre	Vidre (%)
	Paper	Paper (%)

Variable	Descripció
Plàstic	Plàstics (inclou tetrabrik) (%)
Bosses	Bosses (%)
PITot	Plàstics totals (suma plastic + bosses) (%)
Metfer	Metall fèrric (%)
MetNfer	Metall no fèrric (%)
MetTot	Metalls total (suma fèrric i no fèrric) (%)
Mpv	Suma vidre+ metall+ plastic (%)
Tex	Tèxtil (%)
Texsan	Tèxtil sanitari (%)
Esp	Especials (%)
Vol	Voluminosos (%)
Alt	Altres (%)
ImpTot	Impropis totals percentatge (%)
DataMos	Data mostreig compost
Tprod	Durada procés de producció
TrimProd	Trimestre de producció
IniProd	Data inici de procés
MS	Matèria seca (%)
H	Humitat (%)
pH	pH
CE	Conductivitat elèctrica
MOT	Matèria orgànica total (%)
MOTh	Matèria orgànica total sobre mostra humida
MOR	Matèria orgànica resistent (%)
GE	Grau d'Estabilitat (MOR/MOT) (%)
TEMP	Temperatura test autoescalfament (°C)
IRD	Índex de Respiració Dinàmica (mg O ₂ /kg MO)
AT4	Respiració als 4 dies (mg O ₂ /g MS)
HUMICS	Àcids húmics (%)
SOLVITA	Test Solvita
ECOLI	Escherichia coli
SALM	<i>Salmonella</i>
Nt	Nitrogen total (%)
NH4	Nitrogen amoniacal (%)
CN	Relació C/N (-)
P	Fòsfor (%)
K	Potassi (%)
Ca	Calci (%)
Fe	Ferro (%)
Mg	Magnesi (%)
Na	Sodi (%)
Cr	Crom (mg/kg)
Ni	Níquel (mg/kg)
Pb	Plom (mg/kg)
Cu	Coure (mg/kg)
Zn	Zinc (mg/kg)
Cd	Cadmi (mg/kg)
Hg	Mercuri (mg/kg)
GR20	Fracció granulomètrica > 20mm
GR10_20	Fracció granulomètrica entre 10 i 20 mm
GR10	Fracció granulomètrica < 10mm
TMH	Test de males herbes
%GERM	% germinació
iM	Metalls (%)
iPG	Pedres i graves (%)
iP	Plàstics (%)

Dades de compost

Variable	Descripció
iV	Vidre (%)
iMVP	Suma metall+vidre+plàstic (%)

Taula A2. Variables transformades utilitzades en l'anàlisi estadística

Variable	Descripció	
Aspectes de planta	TecDME ¹	Transformació de la variable TecDM en la variable "Tecnologia descomposició estàtica respecte moviment". Aquesta representa una variable <i>dummy</i> al respecte de la variable de referència de tecnologia basada en digestió anaeròbia.
	TecDMD ¹	Transformació de la variable TecDM en la variable "Tecnologia descomposició dinàmica respecte moviment". Aquesta representa una variable <i>dummy</i> al respecte de la variable de referència de tecnologia basada en digestió anaeròbia.
	TecDMA	Representa una variable <i>dummy</i> composta per les tecnologies de descomposició respecte moviment, és a dir, estàtica i dinàmica, en comparació a la variable de referència de tecnologia basada en digestió anaeròbia.
	TecMMD	Transformació de la variable de tecnologia maduració (TecMMD) en una variable <i>dummy</i> representada pel valor "0" per "estàtica" i "1" per "dinàmica".
	DiamrefiD	Transformació de la variable Diamrefi en una variable <i>dummy</i> que compara els valors de diàmetre de 10mm (variable assumeix el valor "0") amb els diàmetres de 12 i 16 mm (variable assumeix el valor "1").
	Diamrefi12 ¹	Transformació de la variable Diamrefi en la variable "Diàmetre de refi de 12 mm". Aquesta representa una variable <i>dummy</i> al respecte de la variable de referència de Diàmetre refi de 10 mm.
	Diamrefi16 ¹	Transformació de la variable Diamrefi en la variable "Diàmetre de refi de 16 mm". Aquesta representa una variable <i>dummy</i> al respecte de la variable de referència de Diàmetre refi de 10 mm.
Entrades i sortides	FVFOtraclierA	Variable FVFOtrac sense valors atípics (<i>outliers</i>) amb la selecció d' <i>outliers</i> basada en l'observació dels valor més extrems trobats al gràfic de dispersió (<i>boxplots</i>). FV respecte a FORM tractada
	AT4A	Transformació de les observacions que es presentaven en la variable original AT4 com "<1" pel valor "1".
	ECOLIA	Transformació de les observacions que es presentaven en la variable original ECOLI com "<10" pel valor "10" i com "<40" pel valor "40".
	CaA	Transformació de les observacions que es presentaven en la variable original Ca com ">15" pel valor "15".
	CrA	Transformació de les observacions que es presentaven en la variable original Cr com "<10" pel valor "10".
	CdA	Transformació de les observacions que es presentaven en la variable original Cd com "<0,500" pel valor "0,500".
	HgA	Transformació de les observacions que es presentaven en la variable original Hg com "<40" pel valor "40".
	LnPb	Logaritme natural de la variable Pb.
	LnCu	Logaritme natural de la variable Cu.
	Znlier	Variable Zn sense valors atípics (<i>outliers</i>) amb la selecció d' <i>outliers</i> basada en Hoaglin et al. (1987).
	iMA	El valor corresponent a <0,10 en la variable original iM es va considerar com 0,10.
	iPA	El valor corresponent a <0,10 en la variable original iP es va considerar com 0,10.
	iVA	El valor corresponent a <0,10 en la variable original iV es va considerar com 0,10.
	iMVPA	El valor corresponent a <0,10 en la variable original iMVP es va considerar com 0,10.

Notes: Aquest llistat representa variables transformades a partir de les variables presentades en la Taula A1; ¹ Aquestes són variables *dummy* que es llegeixen en parelles.



10. Referències

Hoaglin, D. C., Iglewicz, B. (1987). Fine tuning some resistant rules for outlier labeling. *Journal of American Statistical Association*, 82, 1147-1149.

Huerta, O., López, M., Soliva, M., Zaloña, M. (2010). Compostatge de residus municipals: control del procés, rendiment i qualitat del producte obtingut. Agència de Residus de Catalunya. 334pp.

Huerta-Pujol, O., Soliva, M., Giró, F., López, M. (2010). Heavy metal content in rubbish bags used for separate collection of biowaste. *Waste Management*, 30: 1450-1456.

LAGA Merkblatt 10 (1984). Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, working group 'Compost Quality Criteria', 1984, issued by the German Department of the Environment to clarify compost quality criteria within the Sewage Sludge Order, 1982 (AbfKlärV, BGBl, IS. 734).

López, M., Soliva, M., Martínez-Farré, F.X., Fernández, M., Huerta-Pujol, O. (2010a). Evaluation of MSW organic fraction for composting: Separate collection or mechanical sorting. *Resources, Conservation and Recycling*, 54: 222-228.

López, M., Soliva, M., Martínez-Farré, F.X., Bonmatí, A., Huerta-Pujol, O. (2010b). An assessment of the characteristics of yard trimmings and recirculated yard trimmings used in biowaste composting. *Bioresource Technology*, 101: 1399-1405

López, M., Huerta-Pujol, O., Martínez-Farré, F.X., Soliva, M. (2010c). Approaching compost stability from Klason lignin modified method: Chemical stability degree for OM and N quality assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 55 (2): 171-178.

Puig-Ventosa, I., Freire González, J., Jofra-Sora, M. (2013). Determining factors for the presence of impurities in selectively collected biowaste. *Waste Management & Research*, 31: 510-517.

Seelsaen, N., McLaughlan, R., Moore, S., Ball, J.E., Stuetz, R.M. 2006. Pollutant removal efficiency of alternative filtration media in stormwater treatment. *Water Sci Technol*, 54(6-7):299-305.



ENT environment & management

És una marca registrada de:
Serveis de Suport a la Gestió, S.L.
CIF: B62795372
C/ Sant Joan, 39, primer pis
08800 Vilanova i la Geltrú



@ENTmediambient



ENTmediambient



ENT Environment & Management



Grup de Recerca ASQUAS

Universitat Politècnica de Catalunya

Campus del Baix Llobregat
C/ Esteve Terradas 8 Ed. D4
08860 Castelldefels