



EBC 2030

ESTRATÈGIA
DE LA BIOECONOMIA
DE CATALUNYA 2030

Impacte de la gestió forestal en l'acumulació de carboni al sòl

Maig 2026

GRUP DE TREBALL
**CARBONI
AL SÒL**



Generalitat
de Catalunya

El Govern de
Tothom!!!



Impacte de la gestió forestal en l'acumulació de carboni al sòl

Maig 2026

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

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

© Imatges: imatges lliures de drets de Adobe Stock.

Avís legal

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



Membres del Grup de treball Carboni al sòl



Índex

Introducció	2
Impacte de les pràctiques forestals en l'acumulació de carboni al sòl	3
Aclarides	3
Gestió de residus forestals llenyosos	5
Cremes prescrites	7
Aforestació	9
Ús de maquinària pesada en treballs forestals	10
Bibliografia.....	13

Autoria

Jordi Garcia-Pausas - Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)

Pere Casals - Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)

Citació recomanada

Garcia-Pausas, J., Casals, P. 2025. Impacte de la gestió forestal en l'acumulació de carboni al sòl. CTFC.

Introducció

La conca Mediterrània es considera un punt calent del canvi climàtic, amb taxes de canvi per a la majoria de les variables climàtiques superiors a les registrades globalment (Cramer *et al.*, 2018). Les previsions indiquen que en les dècades vinents l'escalfament a les zones Mediterrànies continuarà sent més ràpid que la mitjana global, amb onades de calor o sequeres més freqüents i llargues que les registrades històricament. Això porta a un estrès hídric més elevat, a una reducció de la productivitat i, en general, a més vulnerabilitat dels ecosistemes mediterranis, així com a un augment del risc d'incendi forestal. Paral·lelament, des de la segona meitat del segle XX, els canvis socioeconòmics ocorreguts, amb la reducció del sector primari de l'economia, han portat a una reducció de l'explotació forestal, i a una expansió de la superfície forestal en detriment de l'agricultura. Aquest fet ha comportat un increment de la continuïtat forestal que facilita la propagació del foc i en dificulta el control i l'extinció. Aquest increment en la vulnerabilitat als incendis i les sequeres fa necessària una gestió forestal, que pot ajudar a reduir la competència per l'aigua i els nutrients i a reduir la continuïtat horitzontal i vertical del combustible. En definitiva, cal construir paisatges més adaptats a les noves condicions ambientals i amb més capacitat de resposta davant de fenòmens cada cop més freqüents, com són les sequeres intenses o els incendis.

Ara bé, la gestió forestal no deixa de ser una pertorbació que, d'una manera o una altra, afecta el paper dels boscos com a embornals de carboni (C, pel símbol químic). Atès que el sòl és l'embornal terrestre de carboni (Amundson, 2001) més gran, és important que les actuacions de gestió forestal minimitzin la pertorbació dels sòls forestals i s'evitin pèrdues significatives de carboni edàfic. Les pràctiques de gestió forestal més comunes i que es preveu que seran cada cop més freqüents són les encaminades a reduir la densitat d'arbres o matolls (figura 1), ja sigui per extreure'n fusta per a finalitats comercials, com per a reduir la competència pels recursos i afavorir la resistència a sequeres intenses, o per limitar la capacitat de propagació del foc i incrementar la resistència davant eventuais incendis forestals. Aclarides, estassades i cremes prescrites són pràctiques que es duen a terme amb aquests objectius i de les quals recopilem aquí informació publicada sobre els seus efectes en el sòl i l'acumulació de C edàfic. L'impacte d'aquestes pràctiques forestals en el carboni del sòl depèn en part de com es gestionen els residus llenyosos que normalment es produeixen amb les estassades i les aclarides. Per això, també analitzem l'impacte de la gestió de residus llenyosos en el carboni del sòl. I, finalment, per dur a terme aquestes pràctiques, també cal utilitzar maquinària pesant, per exemple, per extreure troncs, una pràctica molt habitual (figura 1) que pot causar una pertorbació important en el sòl i el seu funcionalisme.

A banda de les pràctiques forestals encaminades a reduir la biomassa, també és important saber l'impacte en el carboni del sòl de les pràctiques d'aforestació. Si es constata que és una pràctica que afavoreix l'acumulació de carboni al sòl, podria aprofitar-se l'aforestació de terrenys agrícoles abandonats o marginals per contribuir a la mitigació del canvi global, alhora que podríem afavorir la biodiversitat o contribuir a la connectivitat d'espais forestals. Aquí, doncs, he recollit informació de l'impacte de l'aforestació en l'acumulació de carboni al sòl.

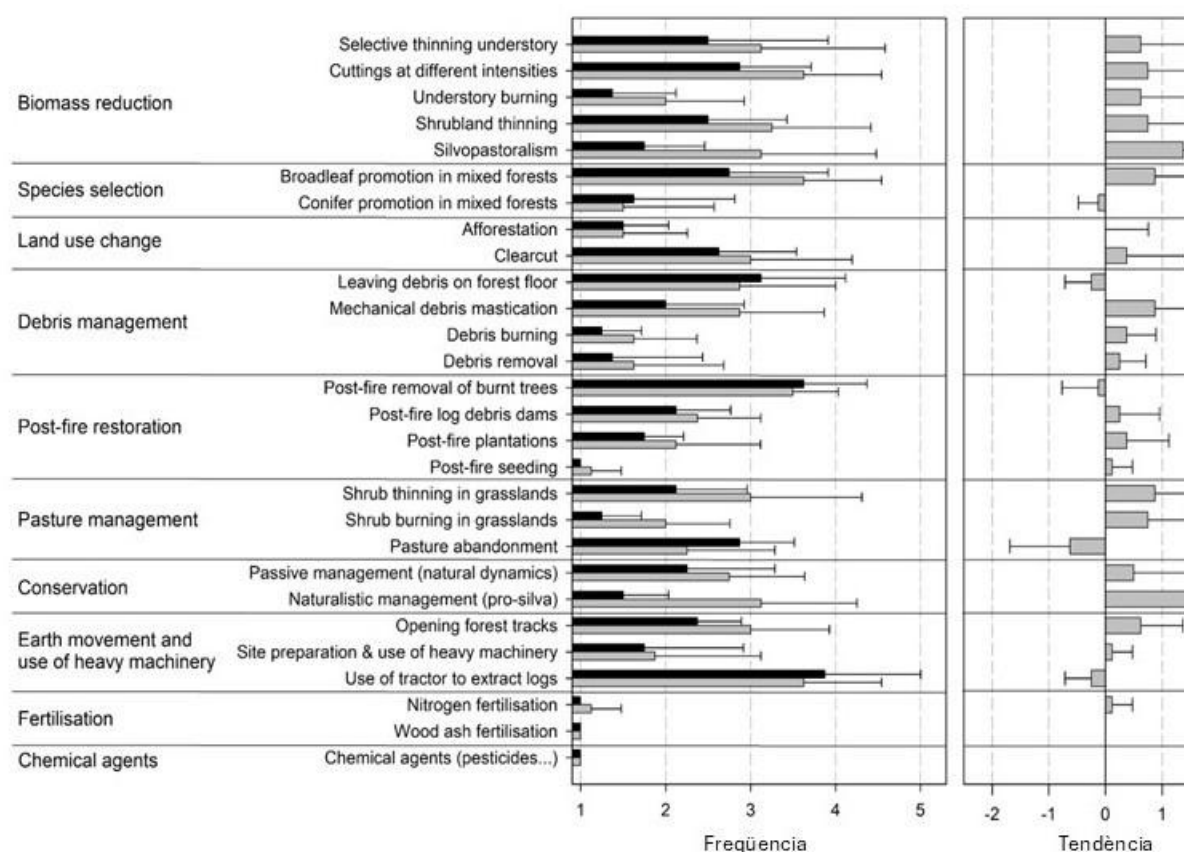


Figura 1. Freqüència present i tendència en el futur de diferents pràctiques forestals amb possible incidència al C del sòl a partir de la puntuació de l'1 al 5 (1 = poc freqüent; 5 = molt freqüent) de vuit experts de diferents àmbits del sector forestal de Catalunya. El panell esquerre indica la freqüència actual (negre) i futura (gris), mentre que el panell dret indica la tendència (diferència entre les freqüències futures i actuals).

Impacte de les pràctiques forestals en l'acumulació de carboni al sòl

Aclarides

Les aclarides, de més o menys intensitat, són, segurament, el tipus de gestió forestal més habitual tant a l'àrea mediterrània com als boscos temperats. La reducció de la biomassa aèria comportarà **menys incorporació de matèria orgànica al sòl**. Per tant, l'impacte de les aclarides en l'acumulació de carboni al sòl dependrà, almenys en part, de la **intensitat de l'aclarida**. Tanmateix, malgrat que en algun estudi s'indica una reducció de més del 30% dels horitzons orgànics del sòl (Ganatsios *et al.* 2021), en la majoria dels estudis no s'obtenen evidències clares de disminució dels estocs de C (Moreno-Fernández *et al.*, 2015; Ruiz-Peinado *et al.*, 2013). En alguns casos, s'observa un augment temporal del C acumulat als horitzons orgànics (Lull *et al.*, 2020; Mazza *et al.*, 2019), segurament com a resultat de deixar les restes de l'aclarida. Lull *et al.* (2020) indiquen que, en boscos mediterranis semiàrids de *Quercus ilex*, aquest efecte detectat cinc mesos després de l'actuació ha desaparegut set anys després. De fet, els models d'Álvarez *et al.* (2016) indiquen un increment dels estocs de carboni al final del període de rotació en boscos de *Pinus sylvestris* i *Quercus pyrenaica* que interpreten com a resultat de la incorporació al sòl dels residus de l'estassada. Així doncs, sembla que **l'impacte a curt o mitjà termini de les estassades en l'acumulació de carboni**

al sòl depèn en part de la gestió de les restes (vegeu més endavant), tot i que sembla un efecte temporal.

Malgrat que els efectes de les aclarides en els estocs de C són difícils de detectar a causa de la magnitud dels canvis en comparació amb els estocs i la inherent variabilitat espacial del sòl, es detecten en alguns aspectes del cicle del C. Depenent de la intensitat d'aclarida, **les condicions microclimàtiques poden canviar** significativament. Una insolació més elevada generalment causa un increment la temperatura i, possiblement, una reducció de la humitat superficial. Això provoca un efecte indirecte en el C del sòl, atès que **pot fer alterar l'activitat microbiana i els processos de descomposició**. Les taxes de descomposició de fullaraca són més baixes després de les aclarides (Blanco *et al.*, 2011), tot i que depèn de la intensitat d'aclarida. Bravo-Oviedo *et al.* (2017) indiquen disminucions de les taxes de descomposició de fullaraca de *Q. pirenaica* i *P. pinaster* quan les aclarides són fortes (reducció de 40% de l'àrea basal), però no era el cas en aclarides més lleus (25%), en què les taxes de descomposició de *P. pinaster* es veien incrementades. Bautista *et al.* (2021) detecten una reducció de la respiració del sòl que s'atribueix als canvis en la temperatura i la humitat del sòl. Tot i això, també s'han observat increments de la respiració del sòl a causa de l'estimulació de l'activitat microbiana causada per les restes de l'aclarida i per la mort i la descomposició d'arrels (Coletta *et al.*, 2017).



Figura 2. Aclarida molt intensa en un bosc de pi roig (*Pinus sylvestris*) al municipi de Soriguera (Pallars Sobirà), efectuada en el marc del Grup de treball del Carboni al sòl per a un seguiment dels efectes a llarg termini. S'hi pot veure que les restes de l'aclarida (branques) s'han escampat per la superfície del sòl. Foto: J. Garcia-Pausas.

D'altra banda, s'ha de tenir en compte que les aclarides redueixen la competència per l'aigua i els nutrients i, per tant, sovint **incrementen el creixement de la vegetació**. Així doncs, la reducció de la productivitat a causa de l'eliminació de biomassa es pot veure compensada en part, a mitjà o llarg termini, per l'increment de la productivitat de la vegetació. Pel que fa a

Q. ilex, una espècie que rebrota després de l'estassada, López *et al.* (2003) mesuren un increment notable de l'assignació a la biomassa subterrània (increments del 100% de la biomassa i del 76% de la producció d'arrels) entre dos i cinc anys després de l'estassada, i, per tant, s'incrementa l'entrada de matèria orgànica al sòl des de les arrels.

Atès que aquesta és una de les pràctiques forestals freqüents i que es preveu que encara ho serà més en el futur als boscos de Catalunya (figura 1), en el marc del **WP3 del Grup de treball de Carboni al sòl** s'han efectuat unes aclarides en dues intensitats diferents en un bosc de pi roig (*P. sylvestris*) per tal de fer un seguiment a llarg termini dels efectes en el carboni al sòl, i en la salut del sòl en general (figures 2 i 3).



Figura 3. Imatge satèl·lit de les aclarides efectuades a Soriguera en el marc del WP3 del Grup de treball del Carboni al sòl per a un seguiment a llarg termini. S'observen les dues intensitats d'aclarida fetes. A l'esquerra de la línia, es va fer una aclarida molt intensa deixant els arbres en grups de quatre a sis peus, mentre que a la dreta es va fer una aclarida convencional i homogènia a tota la superfície.

Gestió de residus forestals llenyosos

La gestió forestal sovint implica una reducció de la densitat d'arbres o matolls, per estassades o aclarides i, per tant, la generació d'uns residus orgànics llenyosos en forma de troncs o branques, entre d'altres. La forma en què aquests residus es gestionen pot tenir una influència destacable en el balanç de carboni d'aquestes actuacions i de la capacitat dels boscos d'actuar com a reservoris que contribueixin a la mitigació del canvi climàtic. Aquesta reducció, almenys temporal, de la biomassa comporta, alhora, una reducció de la quantitat de matèria orgànica que s'incorpora al sòl, tant superficialment (caiguda de virosta) com subterràniament (producció i renovació d'arrels i d'altres òrgans subterranis).



Figura 4. Restes d'aclarida d'un bosc de pi roig (*P. sylvestris*) efectuada en el marc del Grup de Treball del Carboni al sòl. Les restes escampades per la superfície del terra minimitzen o eviten les pèrdues de carboni durant els primers anys després d'una aclarida. Foto: J. Garcia-Pausas.

Escampar restes llenyoses fines (figura 4) **pot contrarestar la pèrdua de C després de les aclarides**, tal com mostren Lull *et al.* (2020) en una aclarida en un alzinar a València. Altres treballs indiquen els beneficis de deixar restes llenyoses en plantacions (Hueso-González *et al.*, 2018) o en la gestió postincendi (Marañón-Jiménez, 2013). En efecte, les restes llenyoses poden fer **que s'incrementi substancialment el contingut de C i N al sòl** i, alhora, poden fer **que augmenti la disponibilitat de nutrients** (Marañón-Jiménez *et al.*, 2013; Brunel *et al.*, 2020), que es redueixi la densitat aparent i que **millori la infiltració** (Hueso-González *et al.*, 2018). Les restes llenyoses, en descompondre's, alliberen nutrients, la qual cosa causa una concentració més gran de C, N i P (Marañón-Jiménez *et al.*, 2013; Brunel *et al.*, 2020). A més, també hi ha més contingut de C i N orgànic dissolt (Marañón-Jiménez *et al.*, 2013), així com compostos aromàtics (Brunel *et al.*, 2020). Tot això fa **incrementar la biomassa i l'activitat microbiana** i també l'activitat enzimàtica al sòl (Marañón-Jiménez *et al.*, 2013; Brunel *et al.*, 2020). A més, deixar restes llenyoses també **protegeix el sòl de l'erosió** després d'incendis o d'intervencions que el poden haver desprotegit. Hueso-González (2018) estima que deixar les restes de *Pinus halepensis* en matollars del sud d'Espanya redueix la pèrdua de sòl un 98%.

Així doncs, deixar restes llenyoses fines o gruixudes **millora la salut del sòl**, evita la pèrdua de C o n'incrementa els estocs, i millora la fertilitat i l'activitat biològica del sòl.

Una altra opció de gestió de restes és la crema. La **crema de restes** permet reduir el risc d'incendi, però pot tenir un impacte en el sòl si el foc és prou intens. Com s'indica tot seguit en l'apartat Cremes prescrites, si el foc és prou intens per **consumir els horitzons orgànics**, pot haver-hi una pèrdua significativa de C, i si es consumeixen del tot, pot haver-hi un impacte en el sòl mineral més superficial. Ara bé, també és cert que **s'incorpora material** pirogènic al sòl, el qual pot ser **molt resistent a la descomposició** i acumular-se a llarg termini.

Per a més detalls de l'efecte de la crema de restes d'estassades o aclarides, vegeu l'apartat següent sobre l'impacte de les cremes prescrites.

Cremes prescrites

El foc s'ha utilitzat tradicionalment per eliminar restes d'aclarides, estassades o podes, però en els darrers anys està agafant importància l'ús del foc per a la gestió forestal (figura 5). Les cremes prescrites permeten reduir el risc d'incendi alhora que poden incrementar la resiliència dels boscos a les sequeres i els incendis forestals (Vilà-Vilardell *et al.*, 2022, 2024). Generalment, els incendis forestals, especialment els de gran intensitat, poden tenir un impacte important en l'acumulació de carboni al sòl (Certini, 2005), atès que **el foc sovint consumeix els horitzons orgànics** (Ferran *et al.*, 1991) i, a més, la reducció de la biomassa fa que hi hagi una **reducció important de l'aportació de matèria orgànica** (fullaraca i arrels, entre d'altres) des de la vegetació. Ara bé, en general, en el cas de les cremes prescrites, el foc és generalment de baixa intensitat, i els efectes poden ser molt més limitats.



Figura 5. Crema de restes d'estassada en un bosc de pi negre (*P. uncinata*) al Port del Comte (Solsonès). Foto: P. Casals.

La part més sensible a l'efecte del foc prescrit són els horitzons orgànics superficials, atès que sovint són consumits parcialment o total pel foc (figura 6), depenent de la intensitat d'aquest. Per exemple, en els boscos de *Pinus nigra* del sistema Ibèric, Fontúrbel *et al.* (2024) indiquen que hi ha una pèrdua del 32,5% del gruix dels horitzons orgànics després d'una crema prescrita, mentre que Merino *et al.* (2019) indiquen unes pèrdues entre el 43% i el 82% del gruix en els boscos de *P. nigra* i *P. pinaster* del centre d'Espanya. En aquest últim cas, els autors indiquen que la magnitud de la pèrdua d'horitzons orgànics depèn en bona part de la humitat en el moment de la crema. Ara bé, potser per les condicions ambientals del moment o per la baixa intensitat del foc, en alguns estudis no es detecta una pèrdua d'horitzons orgànics (p. ex., Inclán *et al.*, 2025). En qualsevol cas, per avaluar l'impacte de les cremes en sòls forestals és important tenir en compte els horitzons orgànics, els quals sovint representen una proporció important del C del sòl.

Pel que fa **al sòl mineral, els efectes** a curt termini de les cremes prescrites **en el contingut de C és generalment poc important o inexistent**. Per exemple, Soria *et al.* (2023) no troben cap efecte de la crema prescrita en el sòl mineral dels boscos mediterranis semiàrids de *P. pinaster*. Els autors indiquen que la crema no ha de suposar un problema si es procura que els temps de residència de la flama i la intensitat del foc no afectin l'horitzó orgànic. Ara bé, quan s'observen amb atenció els primers centímetres de sòl, es poden detectar pèrdues de C. Per exemple, en els boscos de *Pinus halepensis* de Tarragona, Francos *et al.* (2019) indiquen una pèrdua significativa de C en els primers 2,5 cm de sòl, la qual persisteix tretze mesos després del foc. Cal dir que alguns treballs indiquen un increment del contingut de carboni al sòl a curt termini després de la crema (Úbeda *et al.*, 2005; Plaza-Álvarez *et al.*, 2021), que probablement s'explica per la incorporació al sòl de matèria orgànica parcialment cremada (Alcañiz *et al.*, 2016, 2018).



Figura 6. Aspecte de la superfície del sòl després d'una crema experimental de restes d'estassada al Port del Comte. Les cendres blanques ens indiquen que el combustible s'ha consumit, mentre que el color negre és indicatiu d'una combustió parcial, la qual deixa matèria orgànica mig carbonitzada, molt resistent a la descomposició. Foto: J. Garcia-Pausas.

Malgrat que no es detecta fàcilment un efecte de les cremes prescrites en els estocs de carboni al sòl, sí que sovint es registren canvis en alguns aspectes lligats al cicle del C. Amb les cremes **s'incorporen al sòl materials orgànics en diferents graus de carbonització**, derivats tant de la vegetació com dels horitzons orgànics o, si la intensitat del foc ha estat alta, de la matèria orgànica dels horitzons minerals més superficials. Aquests materials pirogènics, depenent del grau de carbonització, poden tenir una qualitat bioquímica molt diferent de la matèria orgànica no carbonitzada, i poden ser **molt resistent a la descomposició**. Francos *et al.* (2019) indiquen un increment de la relació de C i N del sòl més superficial (2,5 cm) immediatament després de la crema prescrita, segurament per la incorporació de material carbonitzat. De fet, s'ha suggerit que l'estabilització de la matèria orgànica producte de focs recurrents de baixa intensitat pot arribar a contrarestar les pèrdues de C de l'ecosistema (Pellegrini *et al.*, 2021).

D'altra banda, també s'han observat **canvis en la composició de les comunitats microbianes del sòl** a conseqüència del foc. Si la temperatura del sòl supera el llindar letal per als microorganismes, el foc pot tenir un efecte immediat en la biomassa microbiana. Atès que la resistència i la resiliència són diferents per als diversos tipus de microorganismes, la diversitat i l'estructura de les comunitats microbianes es poden veure alterades. Per exemple, en boscos mediterranis semiàrids, Soria *et al.* (2023) observen una **reducció de la diversitat microbiana** després d'una crema prescrita, amb canvis en la composició bacteriana del sòl. Això pot tenir un efecte en l'aspecte funcional, en l'activitat enzimàtica (Plaza-Álvarez *et al.*, 2021). S'ha observat experimentalment que la **diversitat funcional** d'un sòl forestal mediterrani **es redueix** significativament quan s'escalfa a 200 °C (Garcia-Pausas *et al.* 2022), és a dir, que el foc altera la capacitat de les comunitats microbianes per degradar els compostos orgànics. En alguns casos, però, s'ha observat que el foc redueix la biomassa i l'activitat microbiana només als horitzons orgànics, mentre que el sòl mineral roman inalterat (Catalanotti *et al.*, 2018).

Ja sigui per la reducció de la qualitat bioquímica del sòl o per canvis en l'estructura i la composició microbiana, s'ha observat en diverses ocasions **una reducció en les taxes de respiració del sòl**. En matollars de la serra de Guadarrama, Inclán *et al.* (2025) indiquen que la crema prescrita va reduir la respiració del sòl un 14% durant el primer any després del foc. A la Sierra Nevada dels EUA, Kobziar *et al.* (2007) van obtenir el mateix resultat, amb un 14% de reducció de la respiració en cremes de pinedes de *P. ponderosa* i *P. jeffreyi* en comparació amb l'àrea no cremada.

En definitiva, doncs, l'efecte de la crema **depèn de la intensitat del foc**. Hi ha el **risc de perdre C si els horitzons orgànics superficials es cremen, però, d'altra banda, s'incorpora C pirogènic, molt estable, que pot acumular-se a llarg termini**.

Aforestació

Malgrat que alguns estudis no veuen un efecte clar en l'acumulació de carboni al sòl (Hoogmoed *et al.*, 2012; Ortiz *et al.*, 2016; Renna *et al.*, 2024), l'aforestació, en la mesura que implica l'establiment de vegetació arbrada on abans no n'hi havia, generalment implica **més incorporació de matèria orgànica al sòl**. L'aforestació sovint millora la qualitat del sòl i l'acumulació de carboni (Cortijos-López *et al.*, 2024; De Marco *et al.*, 2022; Fernández-Ondoño *et al.*, 2010; Grünzweig *et al.*, 2007; Nadal-Romero *et al.*, 2016; Romanyà *et al.*, 2000; Zethof *et al.*, 2019). Ara bé, segurament l'impacte de l'aforestació depèn en bona part del punt de partida sobre el qual es fan les plantacions. És diferent una aforestació sobre un sòl agrícola empobrit en C d'una sobre sòls més rics amb vegetació seminatural. Per exemple, en una aforestació amb *P. sylvestris* en prats de muntanya mediterrània del sistema Central (Espanya) amb sòls força rics en C, Ortiz *et al.* (2016) no detecten cap increment significatiu en l'acumulació de C en quaranta anys. Tampoc no es detecten efectes de plantacions de *P. halepensis* en màquies mediterrànies semiàrides amb un sòl també força ric en matèria orgànica (Goberna *et al.* 2007).

No obstant això, l'acumulació de C i la millora de la qualitat del sòl sembla que no només es deuen a una aportació més elevada de matèria orgànica al sòl: també hi ha un canvi en l'estabilitat de la matèria orgànica. L'aforestació de terrenys agrícoles o prats aporta la

incorporació d'una matèria orgànica que inclou **material lignificat**, menys susceptible de descomposició i, per tant, amb un període de residència superior al de la matèria orgànica derivada de vegetació herbàcia. En una aforestació amb pins en un matollar mediterrani, De Marco *et al.* (2022) documenten més contingut de compostos aromàtics i compostos O-alquil en els horitzons orgànics superficials i també més concentració de compostos aromàtics en la fracció soluble de la matèria orgànica, la qual cosa suggereix més estabilitat de la matèria orgànica en terrenys aforestats. També s'ha constatat una **reducció important de les taxes de descomposició** de la fullaraca en matollars aforestats amb pins en zones de clima mediterrani semiàrid que s'explica pel canvi en la qualitat bioquímica de la fullaraca (Grünzweig *et al.* 2007). A més, també s'ha constatat un **increment de l'estabilitat dels agregats** en terrenys aforestats en zones mediterrànies humides del Pirineu (Nadal-Romero *et al.*, 2016). Una estabilitat més elevada dels agregats implica una protecció física més efectiva de la matèria orgànica i, per tant, una possibilitat més gran d'acumular C a llarg termini.

S'ha estimat que plantacions de *Pinus radiata* en sòls de vinyes al Vallès Oriental poden acumular uns 10 gC m⁻² any⁻¹ en els 5 cm superficials del sòl i uns 19 gC m⁻² any⁻¹ en els horitzons orgànics (Romanyà *et al.*, 2000). En el cas d'aforestacions en camps de cereals, l'acumulació en els horitzons orgànics pot ser de fins 41 gC m⁻² any⁻¹ (Romanyà *et al.*, 2000). L'acumulació de C en aforestacions amb *P. halepensis* en matollars mediterranis a Israel s'ha estimat en uns 50 gC m⁻² any⁻¹ (Grünzweig *et al.*, 2007). En general, sembla que l'acumulació de C per aforestació pot ser superior al que té lloc en la successió secundària natural (Cortijos-López *et al.*, 2024; Zethof *et al.*, 2019), però no sempre és així (Nadal-Romero *et al.*, 2016). Segurament, aquest diferencial dependrà de condicionants (per exemple, climàtics) en la recuperació de la vegetació per successió natural.

Ús de maquinària pesant en treballs forestals

Els treballs forestals sovint utilitzen **maquinària pesant** (figura 7) **que pot provocar canvis significatius al sòl**. L'efecte de la maquinària pesant dependrà tant de les característiques de la maquinària (el pes i l'àrea de contacte, entre d'altres) com del sòl (la textura, la humitat, el pendent, el contingut orgànic, la presència de pedres, etc.) (Cambi *et al.*, 2017). Latterini *et al.* (2025) indiquen que **les pertorbacions estan més relacionades amb l'alt nombre de passades** que la màquina necessita fer per extreure la fusta **que no pas amb el pes** de la maquinària. La superfície de sòl pertorbada per treballs forestals pot ser important. Venanzi *et al.* (2016) ho quantifiquen en un 26,9% de la superfície en un aprofitament de castanyer (*Castanea sativa*), però en alguns casos pot ser de més del 60% (p. ex., Marchi *et al.*, 2014). En termes generals, els efectes de la maquinària pesant són sobretot en la densitat aparent, l'estructura, la porositat, la conductivitat hidràulica i la biomassa microbiana (Nazari *et al.*, 2021; Gartzia-Bengoetxea *et al.*, 2011).

No hi ha molts treballs sobre el tema en l'àmbit dels boscos mediterranis. La majoria dels estudis avaluen els efectes en les propietats físiques del sòl, les quals determinen algunes característiques químiques i biològiques. L'impacte immediat de la maquinària pesant és la **compactació del sòl**. Aquesta compactació causa un increment de la densitat aparent i una **reducció de la porositat i la infiltració**. En fagedes (*Fagus sylvatica*) mediterrànies a Calàbria, Latterini *et al.* (2025) registren a curt termini un increment del 19% de la densitat

aparent en els 5 cm superficials del sòl. En pinedes de *P. pinea* de la Toscana, Cambi *et al.* (2017) també registren un increment de més del 50% en la densitat aparent del sòl i una reducció del 35% de la porositat. A més, la resistència a la penetració en els sòls pertorbats pot ser el doble o el triple que en els sòls no pertorbats (Latterini *et al.*, 2024, 2025). S'ha observat una **recuperació de les propietats físiques** del sòl al cap de cinc anys (Cambi *et al.*, 2017), però hi ha casos en què el temps necessari per a la recuperació és més llarg (Latterini *et al.*, 2025).

L'impacte de la maquinària en les propietats físiques del sòl pot tenir un efecte rellevant per a l'acumulació de matèria orgànica al sòl. Latterini *et al.* (2025) indiquen una **reducció del 25% del contingut de matèria orgànica al sòl superficial** afectat pel pas de les màquines en comparació amb els sòls no afectats. Així mateix, Gartzia-Bengoetxea *et al.* (2011) estimen una pèrdua de 30 tC ha⁻¹ en els primers 5 cm del sòl, en plantacions de *P. radiata* al País Basc, que expliquen per un increment de l'erosió i de la descomposició microbiana de la matèria orgànica. Aquest mateix estudi indica que hi ha una alteració important de l'estructura, amb menys microagregats i més megaagregats. Els autors expliquen que hi ha un trencament d'agregats, la qual cosa deixa disponible per als microorganismes matèria orgànica que prèviament estava protegida i, alhora, la compactació causa la formació de megaagregats nous (> 5 mm). En definitiva, hi ha una **reducció de la protecció física de la matèria orgànica i, per tant, més vulnerabilitat a la pèrdua de C.**



Figura 7. L'ús de maquinària pesant en les pràctiques forestals sovint té un impacte en el sòl i n'altera les propietats fisicoquímiques i l'acumulació de carboni edàfic. En la foto veiem l'ús d'un tractor per a l'extracció de fusta a un bosc de pi blanc (*P. halepensis*) a Capellades. Foto: P. Casals.

D'altra banda, l'alteració del sòl per la maquinària pesant també té efectes en la biodiversitat edàfica. En boscos de *F. sylvatica*, Latterini *et al.* (2024, 2025) indiquen una **pèrdua significativa de biodiversitat**. Blasi *et al.* (2013) indiquen efectes negatius de diversos grups d'artròpodes (proturs, diplurs, coleòpters, pauròpodes, diplòpodes, símfils, quilòpodes, larves

de dípter i opilions) en la compactació del sòl causada per treballs forestals en diversos tipus de bosc (*F. Sylvatica*, *C. sativa*, *Q. cerris*, *Q. pubescens*, *Q. ilex* i *P. pinea*). Així mateix, Cambi *et al.* (2017) documenten canvis en les comunitats microbianes (la presència i l'abundància de microorganismes fixadors de nitrogen i nitrificadors), les quals no s'han recuperat cinc anys després de la pertorbació causada per la maquinària. Aquests canvis probablement alteren en un grau o un altre el cicle del C en aquests sòls, atès el conegut lligam entre l'estructura de les comunitats microbianes i la mineralització de la matèria orgànica (Garcia-Pausas i Paterson, 2011) o entre diversos aspectes del cicle del C i la fauna del sòl (Osler i Sommerkorn, 2007).

Resum esquemàtic de l'impacte d'algunes pràctiques forestals en l'acumulació de carboni i en la salut del sòl

Pràctiques forestals	Efectes en l'acumulació de carboni i la salut del sòl
<i>Aclarides</i>	- Reducció de l'aportació de carboni al sòl. - Canvis en el microclima: increment de temperatura i reducció de la humitat → canvis en les taxes de descomposició. - L'impacte depèn de la gestió de les restes.
<i>Gestió de restes (restes escampades)</i>	- Aportació de matèria orgànica i nutrients després d'una aclarida. - Aportació de matèria orgànica llenyosa, que roman al sòl durant més temps que la que prové de la fullaraca d'arbres o herbàcies. - Es minimitzen les pèrdues de sòl (i del C) per erosió. - Es manté o millora l'activitat biològica del sòl.
<i>Cremes prescrites (directes o de restes d'estassades o aclarides)</i>	- Perill de pèrdua de carboni, sobretot en els horitzons orgànics del sòl. - Aportació al sòl de matèria orgànica mig carbonitzada, molt resistent a la descomposició → a la llarga podria arribar a compensar les pèrdues.
<i>Aforestació</i>	- Incorporació de matèria orgànica al sòl. - Aportació de matèria orgànica lignificada, més resistent a la descomposició que la que prové de la vegetació herbàcia. - Increment de l'estabilitat dels agregats del sòl → la matèria orgànica està més protegida de la descomposició.
<i>Ús de maquinària pesant</i>	- Compactació del sòl → menys porositat, infiltració i capacitat de retenció d'aigua. - Alteració de l'estructura del sòl i pèrdua de la capacitat de protecció física de la matèria orgànica → matèria orgànica més vulnerable i, per tant, pèrdua de carboni. - Pèrdua de biodiversitat edàfica → possibles implicacions en l'acumulació de carboni al sòl.

Bibliografia

- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., Farguell, J., Úbeda, X. 2016. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). *Science of the Total Environment* 572: 1329–1335.
- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., Úbeda, X. 2018. Effects of prescribed fires on soil properties. *Science of the Total Environment* 613-614: 944–957.
- Alvarez, S., Ortiz, C., Díaz-Pinés, E., Rubio, A. 2016. Influence of tree species composition, thinning intensity and climate change on carbon sequestration in Mediterranean mountain forests: a case study using the CO2Fix model. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 21: 1045–1058.
- Amundson, R. 2001. The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 29: 535–562.
- Bautista, I., Lidón, A., Lull, C., González-Sanchís, M., del Campo, A. D. 2021. Thinning decreased soil respiration differently in two dryland Mediterranean forests with contrasted soil temperature and humidity regimes. *European Journal of Forest Research* 140: 1469–1485.
- Blanco, J. A., Bosco Imbert, J., Castillo, F. J. 2011. Thinning affects *Pinus sylvestris* needle decomposition rates and chemistry differently depending on site conditions. *Biogeochemistry* 106: 397–414.
- Blasi, S., Menta, C., Balducci, L., Delia Conti, F., Petrini, E., Piovesan, G. 2013. Soil microarthropod communities from Mediterranean forest ecosystems in Central Italy under different disturbances. *Environmental Monitoring and Assessment* 185: 1637–1655.
- Bravo-Oviedo, A., Ruiz-Peinado, R., Onrubia, R., del Río, M. 2017. Thinning alters the early-decomposition rate and nutrient immobilization-release pattern of foliar litter in Mediterranean oak-pine mixed stands. *Forest Ecology and Management* 391: 309–320.
- Brunel, C., Gros, R., Lerch, T. Z., Farnet da Silva, A. M. 2020. Changes in soil organic matter and microbial communities after fine and coarse residues inputs from Mediterranean tree species. *Applied Soil Ecology* 149: 103516.
- Cambi, M., Paffetti, D., Vettori, C., Picchio, R., Venanzi, R., Marchi, E. 2017. Assessment of the impact of forest harvesting operations on the physical parameters and microbiological components on a Mediterranean sandy soil in an Italian stone pine stand. *European Journal of Forest Research* 136: 205–215.
- Catalanotti, A. E., Giuditta, E., Marzaioli, R., Ascoli, D., Esposito, A., Strumia, S., Mazzoleni, S., Rutigliano, F. A. 2018. Effects of single and repeated prescribed burns on soil organic C and microbial activity in a *Pinus halepensis* plantation of southern Italy. *Applied Soil Ecology* 125: 108–116.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143: 1–10.
- Coletta, V., Pellicone, G., Bernardini, V., De Cinti, B., Froio, R., Marziliano, P. A., Matteucci, G., Ricca, N., Turco, R., Veltri, A. 2017. Short-time effect of harvesting methods on soil respiration dynamics in a beech forest in southern Mediterranean Italy. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 10: 645–651.
- Cortijos-López, M., Sánchez-Navarrete, P., Lasanta, T., Cammeraat, E. L. H., Nadal-Romero, E. 2024. Afforestation, natural secondary forest or dehesas? Looking for the best post-abandonment forest management for soil organic carbon accumulation in Mediterranean mountains. *Forests* 15: 166.
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J. P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toret, A., Tsimplis, M. N., Xoplaki, E. 2018. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change* 8: 972–980.
- De Marco, A., Panico, S. C., Memoli, V., Santorufo, L., Zarrelli, A., Barile, R., Maisto, G. 2022. Differences in soil carbon and nitrogen pools between afforested pine forests and natural shrublands in a Mediterranean area. *Applied Soil Ecology* 170: 104262.
- Fernández-Ondoño, E., Rojo Serrano, L., Jiménez, M. N., Navarro, F. B., Díez, M., Martín, F., Fernández, J., Martínez, F. J., Roca, A., Aguilar, J. 2010. Afforestation improves soil fertility in south-eastern Spain. *European Journal of Forest Research* 129: 707–717.
- Ferran, A., Castell, C., Farràs, A., López, L., Vallejo, V. R. 1991. Els efectes del foc en pinedes de la Catalunya central. *Butlletí de la Institució Catalana d'Història Natural* 59: 129–143.

- Fontúrbel, M. T., Jiménez, E., Merino, A., Vega, J. A. 2024. Contrasting immediate impact of prescribed fires and experimental summer fires on soil organic matter quality and microbial properties in the forest floor and mineral soil in Mediterranean black pine forest. *Science of the total Environment* 907: 167669.
- Francos, M., Stefanuto, E. B., Úbeda, X., Pereira, P. 2019. Long-term impact of prescribed fire on soil chemical properties in a wildland-urban interface. Northeastern Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment* 689: 305–311.
- Ganatsios, H. P., Tsiaras, P. A., Papaioannou, A. G., Blinn, C. R. 2017. Short-term impacts of harvesting operations on soil chemical properties in a Mediterranean oak Ecosystem. *Croatian Journal of Forest Engineering* 42: 463–476.
- García-Pausas, J., Paterson, P. 2011. Microbial community abundance and structure are determinants of soil organic matter mineralization in the presence of labile carbon. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1705–1713.
- García-Pausas, J., Romanyà, J., Casals, P. 2022. Post-fire recovery of soil microbial functions is promoted by plant growth. *European Journal of Soil Science* 73: e13290.
- Gartzia-Bengoetxea, N., Camps Arbestain, M., Mandiola, E., Martínez de Arano, I. 2011. Physical protection of soil organic matter following mechanized forest operations in *Pinus radiata* D. Don plantations. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 141–149.
- Goberna, M., Sánchez, J., Pascual, J. A., García, C. 2007. *Pinus halepensis* Mill. plantations did not restore organic carbon, microbial biomass and activity levels in a semi-arid Mediterranean soil. *Applied Soil Ecology* 36: 107–115.
- Grünzweig, J. M., Gelfand, I., Fried, Y., Yakir, D. 2007. Biogeochemical factors contributing to enhanced carbon storage following afforestation of semi-arid shrubland. *Biogeosciences* 4: 891–904.
- Hoogmoed, M., Cunningham, S. C., Thomson, J. R., Baker, P. J., Beringer, J., Cavagnaro, T. R. 2012. Does afforestation of pastures increase sequestration of soil carbon in Mediterranean climates? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 159: 176–183.
- Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J. F., Ruiz-Sinoga, J. D. 2018. Benefits of adding forestry clearance residues for the soil and vegetation of a Mediterranean mountain forest. *Science of the Total Environment* 615: 796–804.
- Inclán, R., Pérez-Pastor, R., Clavero, M. A., Cicuéndez, V., Cobos, J., Remedios, E., Sánchez-Ledesma, D. M. 2025. Soil carbon responses to prescribed burning, nitrogen addition, and their interactions in a Mediterranean shrubland. *Biogeochemistry* 168: 29.
- Kobziar, L. N. 2007. The role of environmental factors and tree injuries on soil carbon respiration response to fire and fuels treatments in pine plantations. *Biogeochemistry* 84: 191–206.
- Latterini, F., Dyderski, M. K., Horodecki, P., Venanzi, R., Picchio, R., Jagodzinski, A. M. 2024. Evaluating small-scale harvesting disturbance to the forest soil in Mediterranean beech high forests. *Land Degradation and Development* 35: 4419–4427.
- Latterini, F., Venanzi, R., Picchio, R., Schweier, J. 2025. Soil recovery after forest operations in *Fagus sylvatica* L. stands: Is a 5-year interval long enough? *JGR Biogeosciences* 130: e2025JG009078.
- López, B. C., Sabate, S., Gracia, C. A. 2003. Thinning effects on carbon allocation to fine roots in a *Quercus ilex* forest. *Tree Physiology* 23: 1217–1224.
- Lull, C., Bautista, I., Lidón, A., del Campo, A. D., González-Sanchís, M., García-Prats, A. 2020. Temporal effects of thinning on soil organic carbon pools, basal respiration and enzyme activities in a Mediterranean Holm oak forest. *Forest Ecology and Management* 464: 118088.
- Marañón-Jiménez, S., Castro, J. 2013. Effect of decomposing post-fire coarse woody debris on soil fertility and nutrient availability in a Mediterranean ecosystem. *Biogeochemistry* 112: 519–535.
- Marchi, E., Picchio, R., Spinelli, R., Verani, S., Venanzi, R., Certini, G. 2014. Environmental impact assessment of different logging methods in pine forests thinning. *Ecological Engineering* 70: 429–436.
- Mazza, G., Agnelli, A. E., Cantiani, P., Chiavetta, U., Doukalianou, F., Kitikidou, K., Orfanoudakis, M., Radoglou, K., Lagomarsino, A. 2019. Short-term effects of thinning on soil CO₂, N₂O and CH₄ fluxes in Mediterranean forest ecosystems. *Science of the Total Environment* 651: 713–724.

- Merino, A., Jiménez, E., Fernández, C., Fontúrbel, M. T., Campo, J., Vega, J. A. 2019. Soil organic matter and phosphorus dynamics after low intensity prescribed burning in forests and shrubland. *Journal of Environmental Management* 234: 214–225.
- Moreno-Fernández, D., Díaz-Pinés, E., Barbeito, I., Sánchez-González, M., Montes, F., Rubio, A., Cañellas, I. 2015. Temporal carbon dynamics over the rotation period of two alternative management systems in Mediterranean mountain Scots pine forests. *Forest Ecology and Management* 348: 186–195.
- Nadal-Romero, E., Cammeraat, E., Pérez-Cardiel, E., Lasanta, T. 2016. Effects of secondary succession and afforestation practices on soil properties after cropland abandonment in humid Mediterranean mountain areas. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 228: 91–100.
- Nazari, M., Eteghadipour, M., Zarebanadkouki, M., Ghorbani, M., Dippold, M. A., Bilyera, N., Zamanian, K. 2021. Impacts of logging-associated compaction on forest soils: A meta-analysis. *Frontiers in Forests and Global Change* 4: 780074.
- Ortiz, C., Vázquez, E., Rubio, A., Benito, M., Schindlbacher, A., Jandl, R., Butterbach-Bahl, K., Díaz-Pinés, E. 2016. Soil organic matter dynamics after afforestation of mountain grasslands in both a Mediterranean and a temperate climate. *Biogeochemistry* 131: 267–280.
- Osler, G. H. R., Sommerkorn, M. 2007. Toward a complete soil C and N cycle: incorporating the soil fauna. *Ecology* 88: 1611–1621.
- Pellegrini, A. F. A., Caprio, A. C., Georgiou, K., Finnegan, C., Hobbie, S. E., Hatten, J. A., Jackson, R. B. 2021. Low-intensity frequent fires in coniferous forests transform soil organic matter in ways that may offset ecosystem carbon losses. *Global Change Biology* 27: 3810–3823.
- Plaza-Álvarez, P. A., Moya, D., Lucas-Borja, M. E., García-Orenes, F., González-Romero, J., Rossa, C., Peña, E., De las Heras, J. 2020. Early spring prescribed burning in mixed *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus pinaster* Ait. stands reduced biological soil functionality in the short term. *Land Degradation and Development* 32: 1312–1324.
- Renna, V., Martín-Gallego, P., Julián, F., Six, J., Cardinael, R., Laub, M. 2024. Initial soil carbon losses may offset decades of biomass carbon accumulation in Mediterranean afforestation. *Geoderma Regional* 36: 00768.
- Romanyà, J., Cortina, J., Falloon, P., Coleman, K., Smith, P. 2000. Modelling changes in soil organic matter after planting fast-growing *Pinus radiata* on Mediterranean agricultural soils. *European Journal of Soil Science* 51: 627–641.
- Ruiz-Peinado, R., Bravo-Oviedo, A., López-Senespleda, E., Montero, G., Río, M. 2013. Do thinnings influence biomass and soil carbon stocks in Mediterranean maritime pinewoods? *European Journal of Forest Research* 132: 253–262.
- Soria, R., Tortosa, A., Rodríguez-Berbel, N., Lucas-Borja, M. E., Ortega, R., Miralles, I. 2023. Short-term response of soil bacterial communities after prescribed fire in semi-arid Mediterranean forests. *Fire* 6: 145.
- Úbeda, X., Lorca, M., Outeiro, L. R., Bernia, S., Castellnou, M. 2005. Effects of prescribed fire on soil quality in Mediterranean grassland (Prades Mountains, north-east Spain). *International Journal of Wildland Fire* 14: 379–384.
- Venanzi, R., Picchio, R., Piovesan, G. 2016. Silvicultural and logging impact on soil characteristics in Chestnut (*Castanea sativa* Mill.) Mediterranean coppice. *Ecological Engineering* 92: 82–89.
- Vilà-Vilardell, L., De Cáceres, M., Piqué, M., Casals, P. 2023. Prescribed fire after thinning increased resistance of sub-Mediterranean pine forests to drought events and wildfires. *Forest Ecology and Management* 527: 120602.
- Vilà-Vilardell, L., Valor, T., Hood-Nowotny, R., Schott, K., Piqué, M., Casals, P. 2024. Thinning followed by slash burning enhances growth and reduced vulnerability to drought for *Pinus nigra*. *Ecological Applications* 34: e3030.
- Zethof, J. H. T., Cammeraat, E. L. H., Nadal-Romero, E. 2019. The enhancing effect of afforestation over secondary succession on soil quality under semiarid climate conditions. *Science of the Total Environment* 652: 1090–1101.



GRUP DE TREBALL
**CARBONI
AL SÒL**



Generalitat
de Catalunya

tot hom El Govern de