

Anàlisi recent i projecció futura dels impactes del canvi climàtic als boscos de les Gavarres

Versió novembre 2019



Autors:

Eduard Pla Ferrer, Mireia Banqué Casanovas, Jordi Vayreda Duran

ÍNDEX

PRIMERA PART. ANÀLISI HISTÒRICA.....	5
INTRODUCCIÓ A LA PRIMERA PART	6
CANVIS EN L'ESTRUCTURA I LA DEMOGRAFIA DELS BOSCOS	8
Comparant les dades dels tres inventaris forestals	8
Comparant les dades de densitat per cada classe diametral	11
Anant a fons en cada tipologia de bosc	13
<i>Suredes</i>	13
<i>Alzinars</i>	13
<i>Pinedes de pinastre</i>	14
<i>Pinedes de pi pinyer</i>	15
<i>Pinedes de pi blanc</i>	16
Taxes de creixement, mortalitat i aprofitament	17
Estocs de Carboni	18
IDONEÏTAT BIOCLIMÀTICA ACTUAL I FAVORABILITAT LITOLÒGICA.....	22
Idoneïtat segons l'Atlas d'idoneïtat topoclimàtica de les espècies llenyoses de la Península Ibèrica (UAB-CREAF)	22
Idoneïtat bioclimàtica segons el Model de Distribució d'Espècies (CTFC-CREAF)	24
Favorabilitat litològica	26
VULNERABILITAT ACTUAL DE LES ESPÈCIES DE LES GAVARRES	27
BASE DE DADES CLIMÀTICA.....	29
CONCLUSIONS DE LA PRIMERA PART	30
SEGONA PART. PROJECCIONS	32
INTRODUCCIÓ A LA SEGONA PART	33
PROJECCIONS CLIMÀTIQUES DISPONIBLES	33
El Tercer Informe de Canvi Climàtic de Catalunya (projecte LIFE MEDACC)	33
Projecte INFORMED (CTFC-CREAF)	34
CANVIS EN LA IDONEÏTAT BIOCLIMÀTICA DE LES ESPÈCIES.....	35
Idoneïtat actual i futura (2031-2050) per les espècies principals a les Gavarres	35
FUNCIONAMENT DELS BOSCOS	40
Dades d'entrada pel cas de les Gavarres	43
Variables de sortida	44
Resultats de les simulacions sota l'escenari RCP4.5	44
CONCLUSIONS DE LA SEGONA PART	52
FONTS D'INFORMACIÓ COMPLEMENTÀRIA	53
ANNEXOS	53

RESUM EXECUTIU

L'estudi que presentem és una primera aproximació a l'avaluació dels impactes del canvi climàtic als boscos de les Gavarres. El treball ha estat elaborat pel CREAM a partir del treball col·laboratiu de reflexió conjunta entre investigadors del CREAM, tècnics del Consorci de les Gavarres i de l'Oficina Catalana de Canvi Climàtic sobre la recopilació d'un seguit de treballs previs i informació disponible referent al massís de les Gavarres.

L'anàlisi d'aquests treballs i dades disponibles l'hem dividida en dues parts: (1) una anàlisi històrica i (2) projeccions futures.

Quan mirem als darrers 25 anys,

- Els boscos de les Gavarres, dominats històricament i majoritàriament per les suredes, partien inicialment d'una situació de descapitalització evident. Boscos joves, no especialment densos, amb pocs individus grans i amb un estoc en peu relativament baix. En els darrers 25 anys, aquests boscos han crescut notablement en àrea basal i, especialment, en volum, que s'ha gairebé duplicat. Alhora, són més diversos i més ben estructurats gràcies, en part, a la gestió promoguda a partir de l'any 2000, sobretot en suredes.
- Una gestió forestal més activa en la darrera dècada lligada a aquesta dinàmica successional també incideixen en una reducció significativa de la quantitat de sotabosc.
- L'alzinar presenta uns millors indicadors de vigor i regeneració, tant en els mateixos alzinars com a regenerat en altres tipus de bosc (suredes). En aquest sentit, i atenent a aquestes dades, l'alzina es revela com un actiu a promocionar en el nou context climàtic i de gestió de les Gavarres.
- En una línia oposada, les pinedes redueixen el seu protagonisme fet observable per la cada vegada menor proporció d'aquestes espècies en les classes diamètriques inferiors i una nul·la o quasi bé nul·la regeneració actual.
- L'anàlisi de la idoneïtat bioclimàtica actual corrobora l'elevada idoneïtat de l'alzina i la poca idoneïtat del pinastre. La surera mostra una idoneïtat elevada o força elevada a tot el massís, així com el pi pinyer. El pi blanc té valors d'idoneïtat baixos a tota la meitat oest de les Gavarres i valors mitjans a la resta de la zona.
- La idoneïtat topoclimàtica i la favorabilitat litològica han estat fortament modelades per l'acció humana històrica en el territori, que pot haver afavorit algunes de les espècies més enllà de les seves preferències d'estació.
- De l'anàlisi de la vulnerabilitat a partir dels episodis de decaïment de les diferents espècies estudiades a escala de massís, podem determinar que la vulnerabilitat dels boscos a tot el massís de les Gavarres és baixa, en relació amb altres massissos muntanyosos forestals de Catalunya. En destaca, la baixa vulnerabilitat del pi blanc.

Quan mirem cap al futur (2050), a partir de models de simulació i les projeccions del canvi climàtic, trobem que:

- S'espera una disminució generalitzada d'idoneïtat de les espècies presents al massís amb les noves condicions climàtiques esperades al massís (escenari lleu de canvi).
- Els boscos perden vigor en el seu creixement i, en la majoria de casos, la situació s'agreuja a la segona part de la simulació (2025-2050).
- Els boscos que creixen en condicions més desfavorables (sòls prims), per un mateix episodi d'eixut, mostren una afectació menor els boscos que creixen en sòls més gruyuts. Aquest resultat suggereix que el fet d'acumular menor biomassa i créixer més moderadament fa

que els efectes dels episodis d'eixut en l'estructura del bosc, en alguns casos, no siguin tan severes.

- La sureda i l'alzinar es mostren, en general, menys vulnerables a l'escenari de canvi climàtic respecte a les pinedes. D'aquestes, les pinedes de pinastre mostren una major vulnerabilitat i les de pi pinyer es mostren més resistents (si avaluem la vulnerabilitat en funció de la mortalitat amb els valors de volum de fusta morta).
- La gestió forestal podria ajudar a anticipar molts d'aquests processos de decaïment que es donaran de forma natural al bosc i minimitzar els riscos.

1a part. Anàlisi històrica

INTRODUCCIÓ A LA PRIMERA PART

En el marc del **Pla Gavarres 2025**, impulsat pel Consorci de les Gavarres i amb la participació de l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic (OCCC), el CREAF rep l'encàrrec de realitzar una diagnosi de l'estat actual dels boscos de les Gavarres i de la seva vulnerabilitat al canvi climàtic, recent i futura.

L'àmbit d'estudi ha estat proporcionat per l'equip tècnic del Consorci de les Gavarres (Annex1): inclou no només la delimitació de l'àrea PEIN sinó també una àrea adjacent (buffer) determinada per les principals vies de comunicació que envolten el massís. Aquesta àrea correspon a unes 39.760 ha, eminentment forestals. Atenent al Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (MCSC4, CREAF 2013), els principals boscos que hi trobem queden recollits a la figura 1, considerant-ne la coberta dominant (Annex2). S'aprecia que trobem molt majoritàriament suredes (*Quercus suber*) amb prop de 20.000 ha, seguides de pinastre (*Pinus pinaster*) i pi pinyer (*Pinus pinea*), amb 4.200 ha i 3.500 ha respectivament; i a les vores de la regió també hi ha pi blanc (*Pinus halepensis*) i alguns alzinars (*Quercus ilex*) a la zona nord, però en els dos casos per sota les 2.000 hectàrees. És important aclarir que la metodologia del MCSC està basada en la fotointerpretació d'ortofotomapes (vista zenital del territori), de manera que el que s'aprecia són les capçades de l'espècie més alta. Així, en el cas d'un bosc mixt d'alzines i pins, per exemple, el MCSC veurà els pins i infravalorarà les alzines, ja que quedaran amagades pels pins.

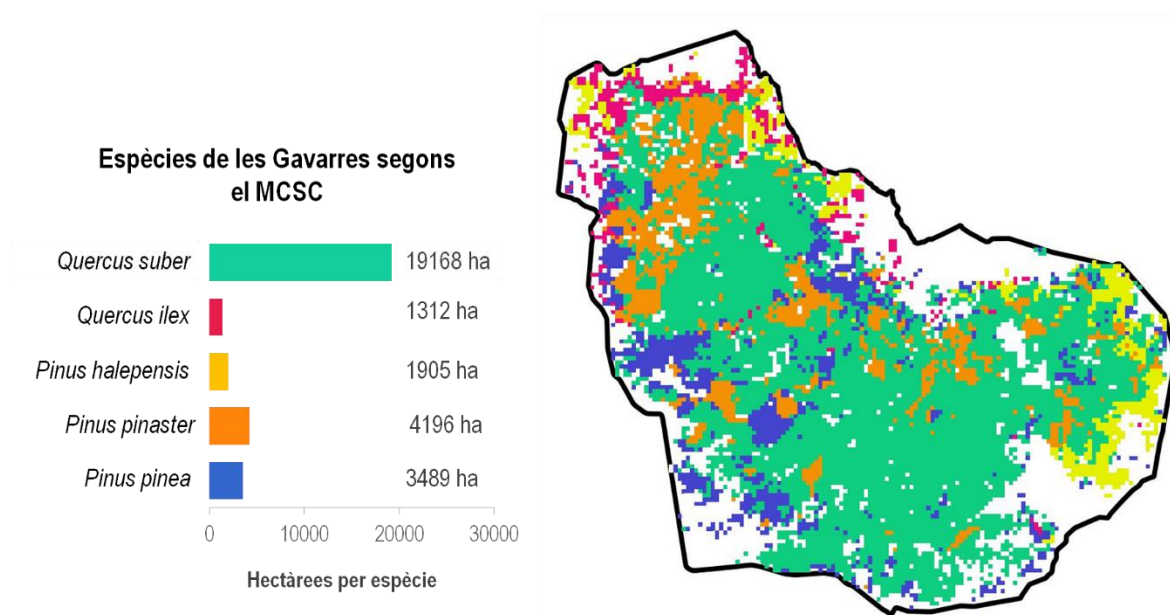
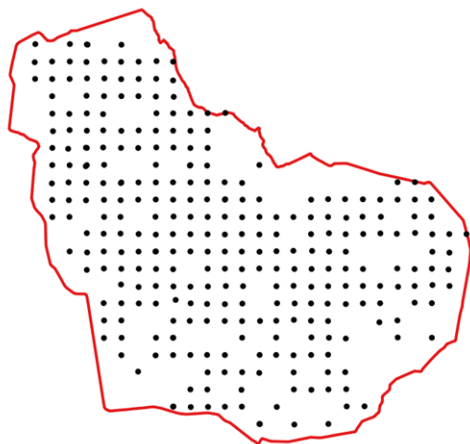


Figura 1: Retall per a l'àmbit d'estudi del Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (4a edició) amb les principals espècies forestals que s'hi troben. La delimitació de les àrees es fa a partir de fotointerpretació.

Els boscos de les Gavarres disposen de dades dels diferents inventaris forestals (**2n, 3r i 4t Inventaris Forestals Nacionals**, <https://www.mapa.gob.es/>) realitzats a la zona (figura 2). A les Gavarres, l'IFN2 va ser dut a terme durant l'any 1989 i consta de 277 parcel·les mostrejades dins l'àmbit d'estudi. L'IFN3 va ser dut a terme l'any 2001 i, tot i que es van visitar les mateixes parcel·les que l'IFN2, n'inclou algunes de noves (291 parcel·les) dins del mateix àmbit. L'inventari més recent (IFN4) va ser realitzat en el període 2014-16, i degut a restriccions pressupostàries, només es van remostrejar la meitat aproximadament de les parcel·les de l'IFN3 (133 parcel·les). Aquesta informació està continguda a una base de dades, que forma part de l'Annex 3 de l'apartat de base de dades d'inventaris inclosa als annexos.

IFN2, IFN3

277-291 parcel·les



IFN4

133 parcel·les

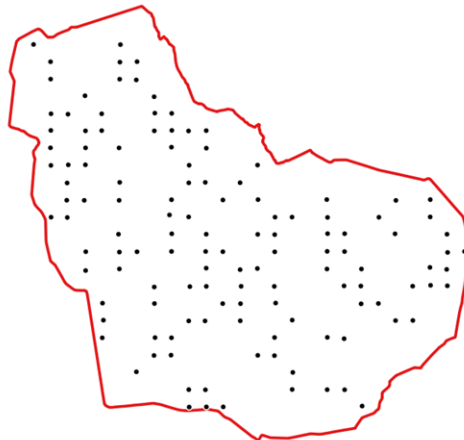


Figura 2: Nombre i posició de les parcel·les dels inventaris forestals duts a terme a terme a l'àmbit d'estudi (IFN2, IFN3 i IFN4). S'hi aprecia la reducció del nombre de parcel·les mostrejades al darrer inventari.

Aquesta primera informació sobre les espècies dominants a l'àmbit d'estudi i d'acord amb l'equip tècnic del Consorci de les Gavarres, determinem quins **boscós seran considerats en l'anàlisi** (figura 3):

- Les suredes
- Els alzinars
- Les pinedes de pinastre
- Les pinedes de pi blanc
- Les pinedes de pi pinyer

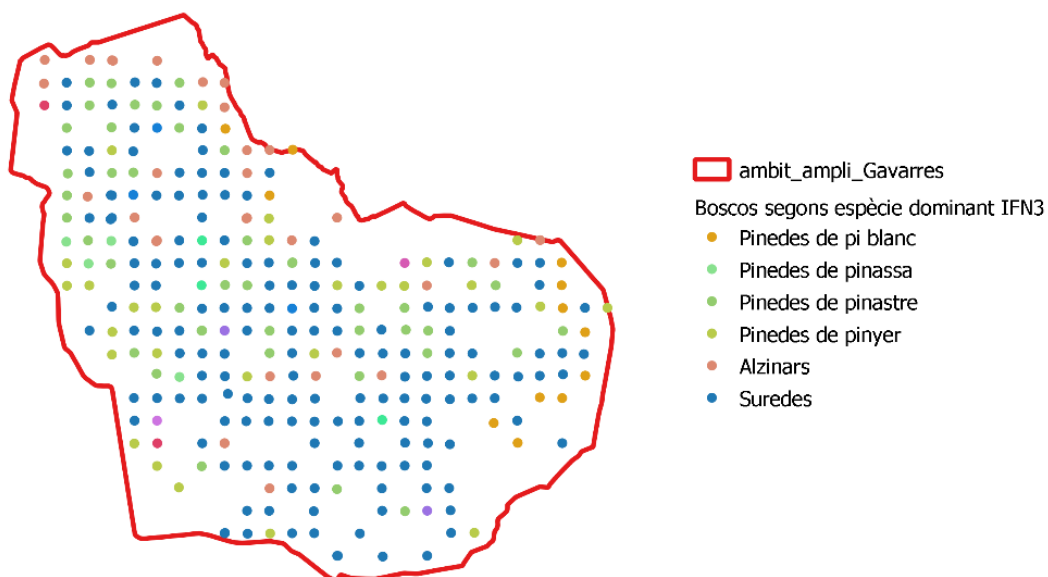


Figura 3: Tipus de bosc a les Gavarres atenent a l'espècie dominant al 3r Inventari Forestal Nacional (IFN3).

CANVIS EN L'ESTRUCTURA I LA DEMOGRAFIA DELS BOSCOS

Comparant les dades dels tres inventaris forestals

Una primera anàlisi duta a terme amb les dades dels inventaris ha estat fer un primer resum d'algunes variables forestals rellevants per als boscos seleccionats, tot comparant-les entre els tres inventaris (Taula 1). L'ordre de les espècies ve determinat pel nombre de parcel·les de l'IFN2 on aquesta espècie era dominant en àrea basal. De cara a la interpretació correcta dels resultats, cal especificar que les variables corresponen a les parcel·les on l'espècie esmentada és dominant però fan referència a tot el bosc present (inclouen altres espècies presents considerant els peus d'almenys 7.5 cm de diàmetre normal).

Un primer cop d'ull dels valors agregats a aquesta taula ens mostra l'evolució temporal d'algunes variables. **En general, els boscos seleccionats i, per l'àmbit d'estudi, han anat augmentant de forma rellevant la seva àrea basal, s'han anat densificant i creixent en biomassa amb el pas del temps.** Aquesta darrera variable gairebé s'ha doblat entre l'IFN2 i l'IFN4. Tanmateix, la dominància de l'espècie principal ha anat disminuint progressivament. En general, els canvis més importants es donen entre el IFN2 i IFN3 en gairebé totes les variables.

Aquest patró és comú als boscos dominats per les diferents espècies, tot i algunes lleugeres diferències en la densificació d'algunes espècies entre l'IFN3 i l'IFN4.

A la taula 2, s'hi mostren les principals espècies acompanyants, diferents a la pròpia espècie dominant, que composen els boscos estudiats i el percentatge en Àrea Basal que representen.

Taula 1. Resum d'algunes de les variables forestals rellevants dels principals boscos seleccionats a l'àmbit d'estudi i la seva evolució al llarg dels inventaris forestals.

IFN2 (1989)					
Espècie dominant	perc AB (%)	N	AB (m ² /ha)	Nre peus/ha	VAE (m ³ /ha)
<i>Pinus halepensis</i>	74.5	11	18.7	602.5	95.4
<i>Quercus ilex</i>	68.5	21	15.7	946.1	67.6
<i>Pinus pinea</i>	70.5	29	17.1	564.3	75.5
<i>Pinus pinaster</i>	75.4	31	15.7	693.6	73.1
<i>Quercus suber</i>	78.2	162	12.1	652.5	39.3
TOTAL	76.1	265	13.5	669.5	51.5
IFN3 (2001)					
Espècie dominant	perc AB (%)	N	AB (m ² /ha)	Nre peus/ha	VAE (m ³ /ha)
<i>Pinus halepensis</i>	61.5	12	23.5	840.0	121.7
<i>Quercus ilex</i>	67.0	27	20.2	1063.6	92.6
<i>Pinus pinea</i>	65.2	29	20.9	651.8	93.8
<i>Pinus pinaster</i>	72.1	41	22.3	842.4	114.1
<i>Quercus suber</i>	72.1	155	17.5	870.7	58.4
TOTAL	69.7	281	19.0	862.8	77.7
IFN4 (2014-16)					
Espècie dominant	perc AB (%)	N	AB (m ² /ha)	Nre peus/ha	VAE (m ³ /ha)
<i>Pinus halepensis</i>	55.9	4	23.2	797.4	105.8
<i>Quercus ilex</i>	60.3	20	19.0	992.6	82.8
<i>Pinus pinea</i>	69.4	17	23.2	612.0	128.3
<i>Pinus pinaster</i>	71.4	15	24.6	898.3	136.8
<i>Quercus suber</i>	69.4	66	20.6	906.5	73.6
TOTAL	66.7	129	21.0	880.1	91.1

N= nombre de parcel·les

AB = Àrea Basal

VAE = Volum amb escorça

Taula 2. Principals espècies acompanyants als boscos estudiats i el percentatge en àrea basal que representen, segons dades de l'IFN3.

Suredes		Alzinars		Pinedes de pinastre	
Espècies presents	percAB (%)	Espècies presents	percAB (%)	Espècies presents	percAB (%)
<i>Quercus ilex</i>	6.88	<i>Quercus suber</i>	10.73	<i>Quercus suber</i>	18.05
<i>Pinus pinea</i>	6.62	<i>Pinus pinea</i>	5.26	<i>Pinus pinea</i>	5.12
<i>Arbutus unedo</i>	6.30	<i>Quercus humilis/cerroides</i>	3.45	<i>Arbutus unedo</i>	1.58
<i>Pinus pinaster</i>	3.95	<i>Pinus halepensis</i>	3.43	<i>Quercus ilex</i>	1.33
<i>Pinus halepensis</i>	1.06	<i>Arbutus unedo</i>	2.85	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0.66
<i>Quercus humilis/cerroides</i>	0.97	<i>Populus nigra</i>	1.59	<i>Castanea sativa</i>	0.51
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0.54	<i>Pinus pinaster</i>	1.48	<i>Pinus halepensis</i>	0.37
<i>Alnus glutinosa</i>	0.45	<i>Castanea sativa</i>	1.27	<i>Quercus humilis/cerroides</i>	0.13
<i>Pinus nigra</i>	0.33	<i>Prunus avium</i>	0.81	<i>Quercus faginea</i>	0.12
<i>Prunus avium</i>	0.26	<i>Celtis australis</i>	0.76	<i>Pinus nigra</i>	0.06
<i>Castanea sativa</i>	0.16	<i>Platanus hispanica</i>	0.38		
<i>Crataegus monogyna</i>	0.14	<i>Quercus robur</i>	0.36		
<i>Salix atrocinerea</i>	0.09	<i>Pinus nigra</i>	0.26		
<i>Fraxinus angustifolia</i>	0.04	<i>Ulmus minor</i>	0.16		
<i>Platanus hispanica</i>	0.03	<i>Ilex aquifolium</i>	0.15		
<i>Pinus sylvestris</i>	0.03	<i>Crataegus monogyna</i>	0.09		
<i>Sorbus aucuparia</i>	0.01				
Pinedes de pinyer		Pinedes de pi blanc			
Espècies presents	percAB (%)	Espècies presents	percAB (%)		
<i>Quercus suber</i>	19.29	<i>Quercus suber</i>	19.94		
<i>Pinus pinaster</i>	5.54	<i>Pinus pinea</i>	9.52		
<i>Quercus ilex</i>	3.88	<i>Quercus ilex</i>	6.48		
<i>Pinus halepensis</i>	2.48	<i>Pinus pinaster</i>	2.30		
<i>Quercus humilis/cerroides</i>	1.47	<i>Arbutus unedo</i>	0.23		
<i>Pinus nigra</i>	1.25				
<i>Arbutus unedo</i>	0.87				

Comparant les dades de densitat per cada classe diametral

Si ens mirem els canvis demogràfics en termes de densitat dels boscos dominats per les espècies seleccionades desagregades per classes diametrals (figura 4), podem observar tendències en les darreres gairebé tres dècades. Tot i que parlem d'una situació de partida de **boscos eminentment joves**, en general, **s'observa un patró de canvi cap a classes diametrals més grans sobretot entre l'IFN2 i l'IFN3 però menys clar entre l'IFN3 i l'IFN4**. La classe diametral de 5 a 15 cm (10) mostra habitualment un major dinamisme, especialment observables en el cas de les pinedes de pi blanc. Tanmateix, la poca representació de les pinedes de pi blanc en aquesta anàlisi (11-12 parcel·les a IFN2/IFN3 i 4 parcel·les a IFN4) fan poca robusta la tendència presentada per aquest tipus de bosc. Per interpretar millor aquestes tendències a la classe més menuda, ens caldrà parar atenció als gràfics de regeneració (peus menors) que acompanyen la descripció de cada tipus de bosc (figures 6-10). Alhora, la comparació de les dades de mortalitat ens poden ajudar també a aquesta interpretació.

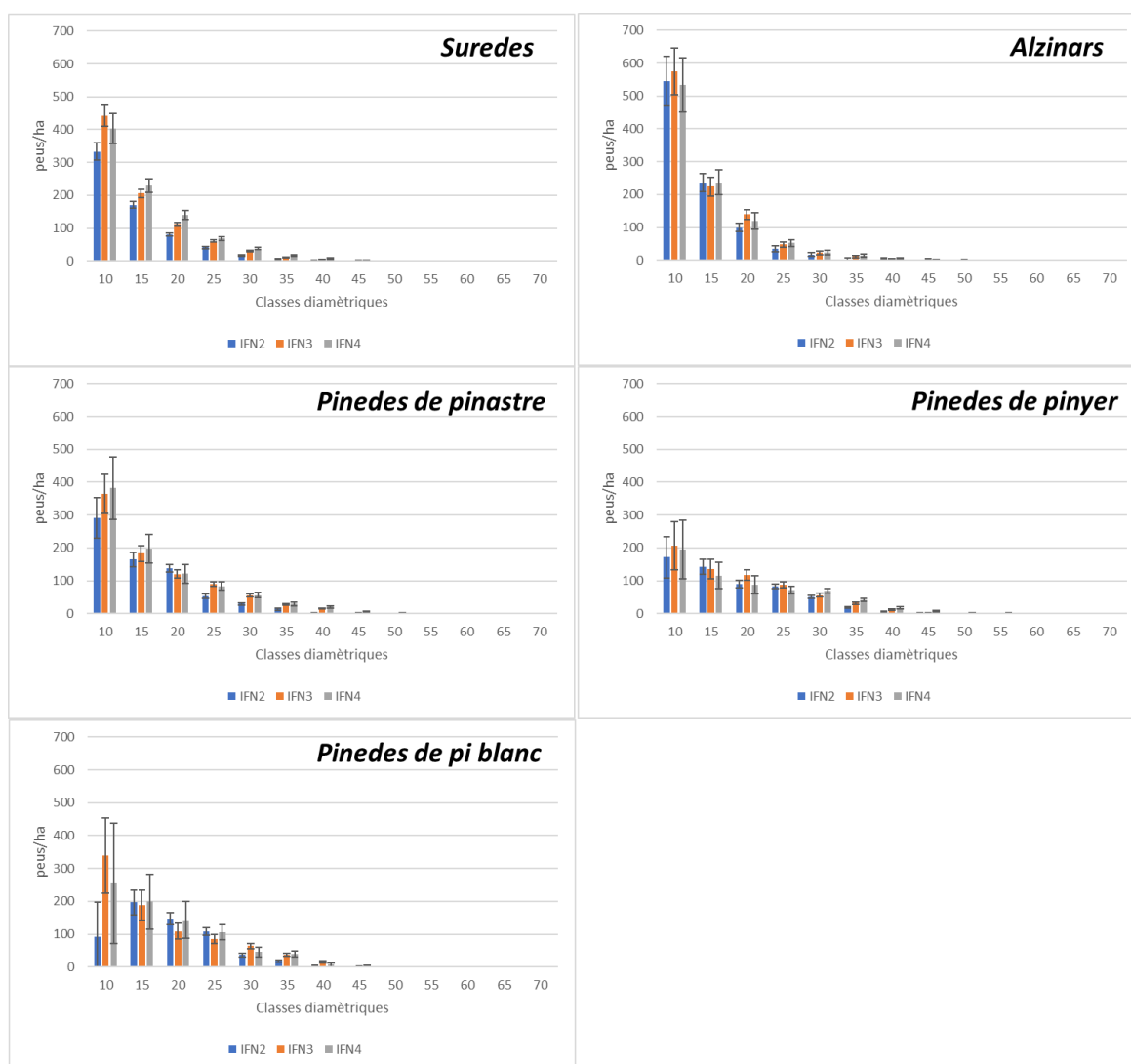


Figura 4: Distribució de la densitat per classes diametrals al llarg dels tres inventaris forestals i per als boscos dominats per les espècies estudiades.

Comparant les dades de mortalitat

Si ens mirem el mateix tipus d'informació, comparant inventaris, però referent a la densitat dels individus que han mort a cada classe diametral entre inventaris (figura 5) observem que la mortalitat s'ha disparat entre l'IFN3 i l'IFN4 (període 2001-2016) respecte el període anterior. Aquesta tendència és comuna a tots els tipus de bosc i classes diametrals, però **especialment rellevant en la primera classe de les pinedes de pinastre i als alzinars**. La dinàmica successional d'aquestes formacions, pot ser un element clau en la interpretació d'aquests resultats: el tancament progressiu de capçades fa que molts dels tanys dominats vagin morint. A més, els extrems climàtics recurrents registrats en la darrera dècada (TICCC 2016, MEDACC 2018) poden haver accelerat aquesta dinàmica, atès que aquests episodis afecten sobretot a les classes diametrals més petites, degut a l'efecte d'una major competència pels recursos dels peus suprimits i dominats fruit de l'abandonament de la gestió.

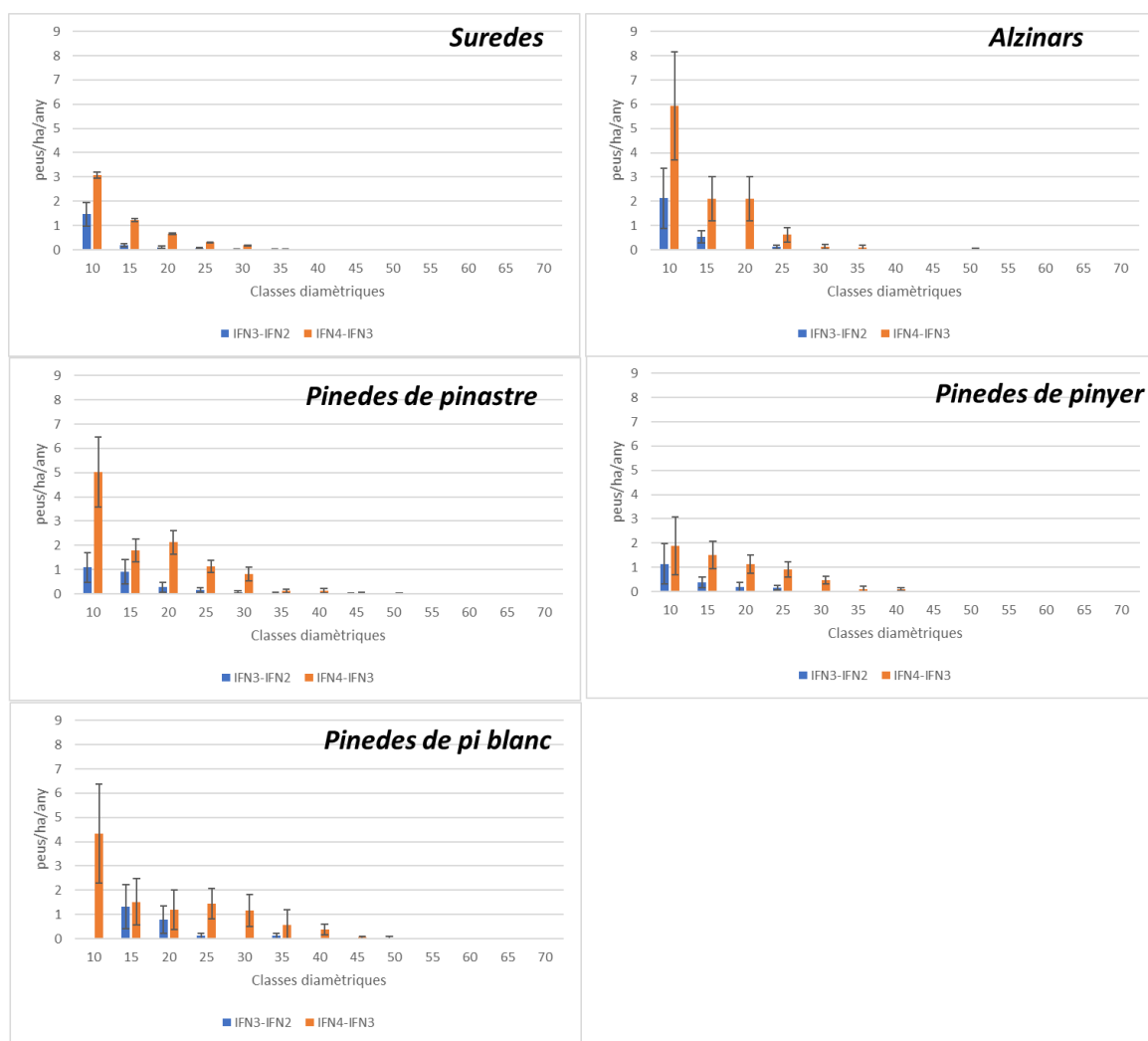


Figura 5: Taxes de mortalitat entre inventaris forestals a cada classe diametral. En blau s'hi mostra la comparació entre el IFN2 i IFN3, en carbassa s'hi mostra la comparació entre IFN3 i IFN4.

Anant a fons en cada tipologia de bosc

Suredes

En el cas de les suredes, una anàlisi més detallada de la seva distribució en classes diametral al llarg dels tres inventaris, ens permet diferenciar quina és la proporció d'individus de la pròpia espècie (*Quercus suber*) en la globalitat de la sureda (figura 6). El mateix, per la regeneració observada (peus menors de 2,5 a 7,5 cm de diàmetre).

Com s'observa en l'evolució de la classe diametral 10, tot i que la densitat total creix i es manté en aquesta classe, **la presència proporcional de nous individus de surera és cada cop més baixa**, mentre es mantenen els individus adults dominant la coberta. Tot i que és un dels tipus de bosc que presenta una major regeneració inicial (individus de diàmetre inferior a 7,5 cm), aquesta disminueix progressivament i de forma rellevant al llarg dels inventaris i, especialment, mostra una **molt baixa contribució dels propis individus de surera**. Aquesta contribució, a més, va disminuint amb el pas del temps.



Figura 6: Distribució de la densitat en suredes per classes diametral al llarg dels tres inventaris forestals (IFN2, IFN3 i IFN4), diferenciant entre la densitat total i la densitat d'individus de *Quercus suber*. El darrer gràfic correspon a la regeneració (peus de diàmetre inferior a 5 cm).

Alzinars

En el cas dels alzinars, una anàlisi més detallada de la seva distribució en classes diametral al llarg dels tres inventaris, ens permet diferenciar quina és la proporció d'individus de la pròpia espècie (*Quercus ilex*) en la globalitat de l'alzinar (figura 7). El mateix, per la regeneració observada (peus menors de 5 cm de diàmetre).

Contràriament a allò que s'observa a les suredes, **als alzinars la proporció de la pròpia espècie en la densitat global és alta i es manté constant al llarg dels inventaris**. És un tipus de bosc que presenta una regeneració inicial força alta (individus de diàmetre inferior a 7,5 cm), tot i aquesta es redueix a menys de la meitat a l'IFN4 respecte l'IFN2. Tanmateix, la **proporció de la pròpia espècie en la regeneració es manté elevada i força constant**.

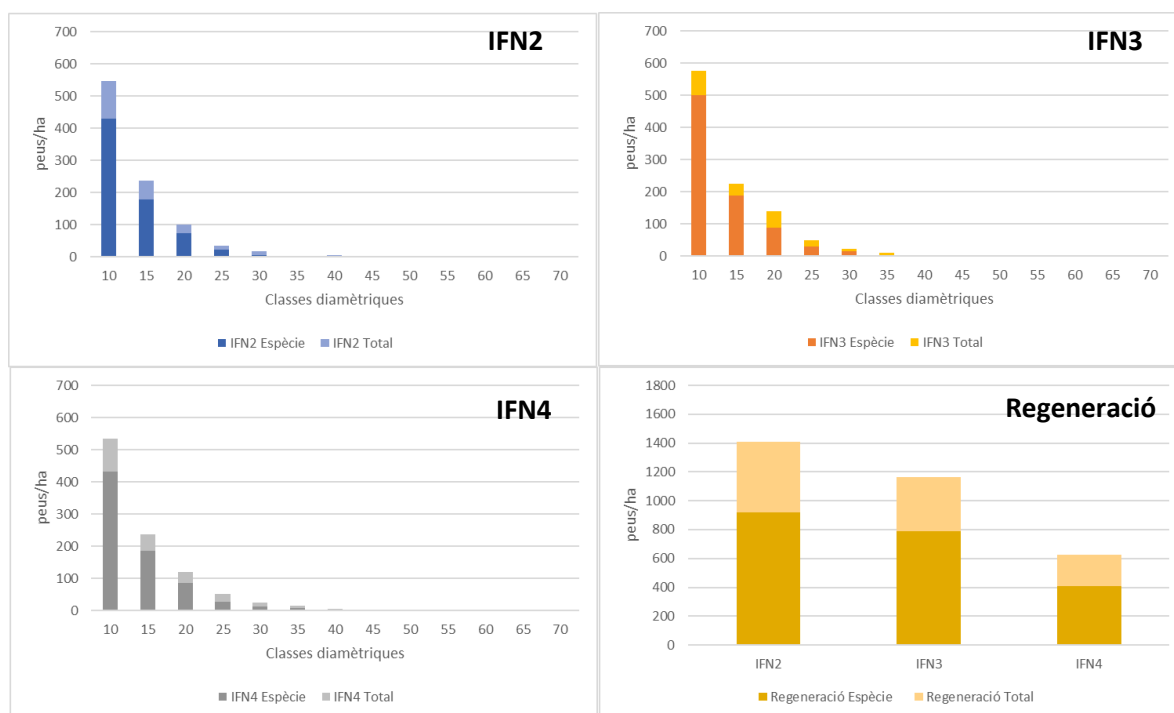


Figura 7: Distribució de la densitat en alzinars per classes diametral al llarg dels tres inventaris forestals (IFN2, IFN3 i IFN4), diferenciant entre la densitat total i la densitat d'individus de *Quercus ilex*. El darrer gràfic correspon a la regeneració (peus de diàmetre inferior a 5 cm).

Pinedes de pinastre

En el cas de les pinedes de pinastre, una anàlisi més detallada de la seva distribució en classes diametral al llarg dels tres inventaris, ens permet diferenciar quina és la proporció d'individus de la pròpia espècie (*Pinus pinaster*) en la globalitat de la pineda (figura 8). El mateix, per la regeneració observada (peus menors de 7.5 cm de diàmetre).

En el cas del pinastre és molt rellevant la **disminució de la proporció de la presència de la pròpia espècie en les classes diametral inferiors**, mentre es mantenen els individus adults dominant la coberta al llarg dels inventaris. El canvi encara és més dràstic en el cas del regenerat. La proporció del pinastre en el reclutament és baixa, però aquesta contribució gairebé desapareix en el darrer inventari.

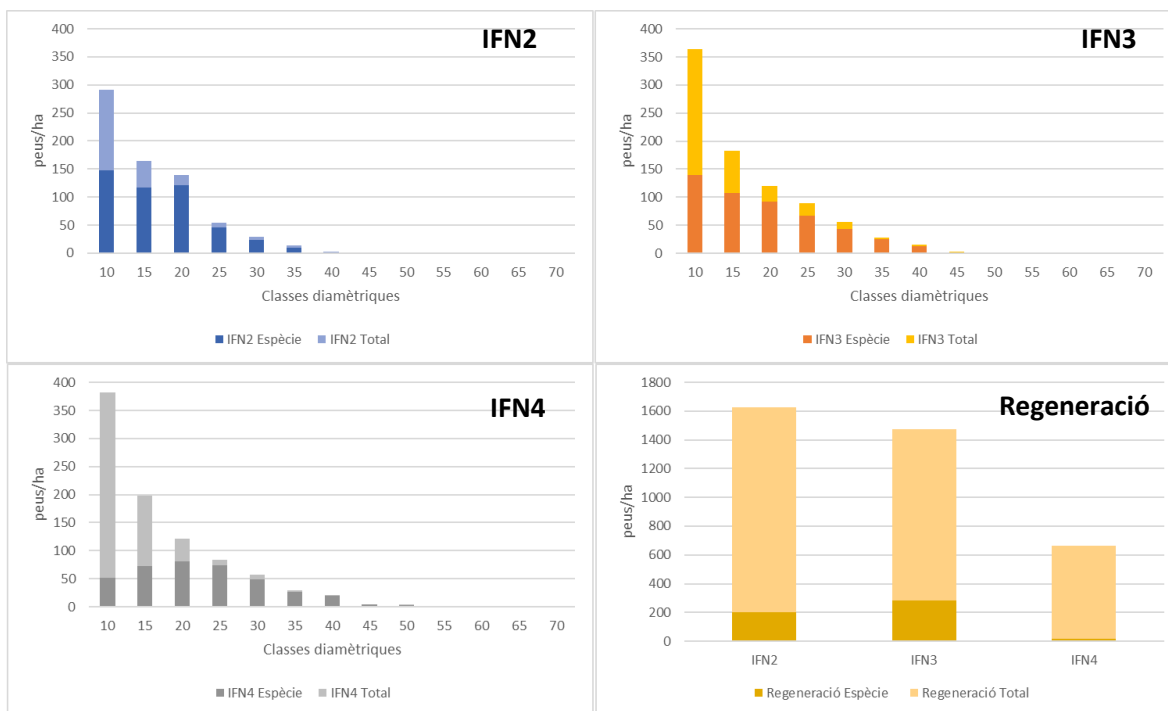


Figura 8: Distribució de la densitat pinedes de pinastre per classes diametral al llarg dels tres inventaris forestals (IFN2, IFN3 i IFN4), diferenciant entre la densitat total i la densitat d'individus de *Pinus pinaster*. El darrer gràfic correspon a la regeneració (peus de diàmetre inferior a 5 cm).

Pinedes de pi pinyer

En el cas de les pinedes de pinyer, una anàlisi més detallada de la seva distribució en classes diametral al llarg dels tres inventaris, ens permet diferenciar quina és la proporció d'individus de la pròpia espècie (*Pinus pinea*) en la globalitat de la pineda (figura 9). El mateix, per la regeneració observada (peus menors de 7.5 cm de diàmetre).

Les pinedes de pinyer, de baixa densitat, mostren un patró força comú al llarg dels tres inventaris. Existeix una coberta amb presència d'individus adults de diàmetres grans, i **una poca presència de pins pinyers a les classes diametral més petites**. Aquesta tendència s'amplifica amb el pas del temps i encara és més dràstica en el cas del regenerat. La contribució de la pròpia espècie en el reclutament és ínfima i desapareix ja a l'IFN3 i a l'IFN4.

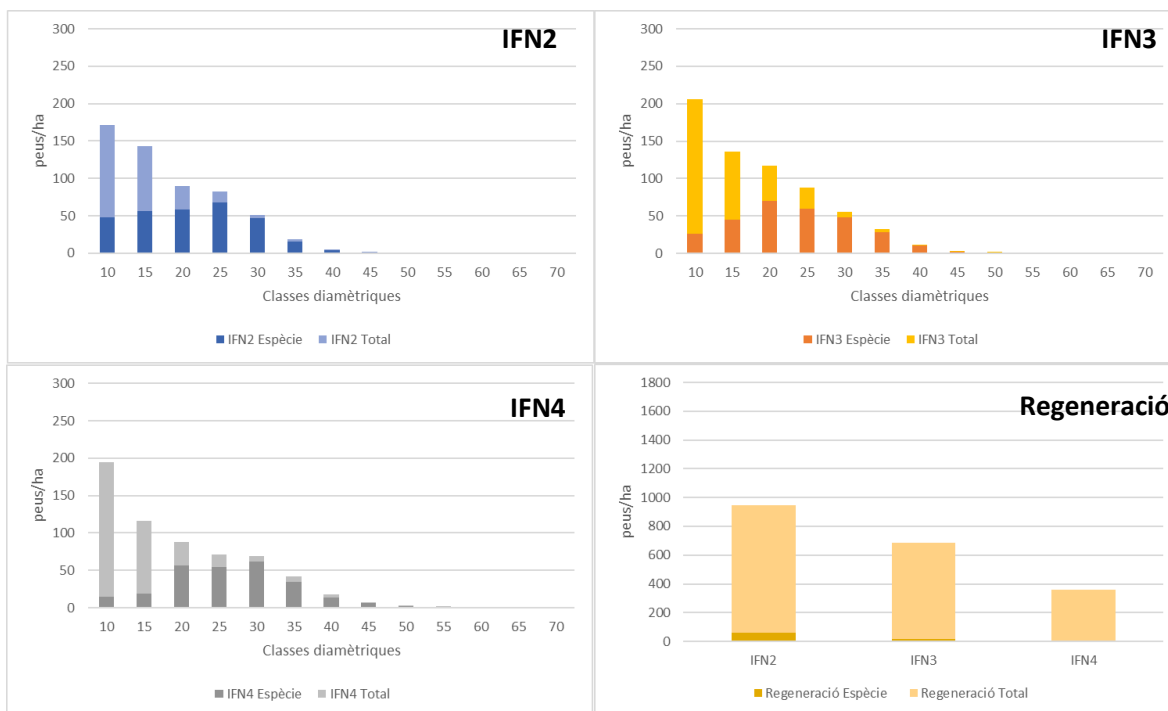


Figura 9: Distribució de la densitat pinedes de pi pinyer per classes diametral al llarg dels tres inventaris forestals (IFN2, IFN3 i IFN4), diferenciant entre la densitat total i la densitat d'individus de *Pinus pinea*. El darrer gràfic correspon a la regeneració (peus de diàmetre inferior a 5 cm).

Pinedes de pi blanc

En el cas de les pinedes de pi blanc, una anàlisi més detallada de la seva distribució en classes diametral al llarg dels tres inventaris, ens permet diferenciar quina és la proporció d'individus de la pròpia espècie (*Pinus halepensis*) en la globalitat de la pineda (figura 10). El mateix, per la regeneració observada (peus menors de 7.5 cm de diàmetre).

Les pinedes de pi blanc, esclarissades, presenten una **forta variació entre inventaris** atès al dinamisme en les classes diametral més menudes i al regenerat. A l'IFN3 (vers 2001) es recull una densitat major a la classe diametral més petita que coincideix amb un regenerat major. Tanmateix, la contribució de la pròpia espècie en aquestes categories és molt baixa. Aquesta tendència a una major densitat en classes menudes es manté tot i que la **presència del pi blanc és irrisòria a la classe 10 de l'IFN4** i desapareix del regenerat en aquest inventari.

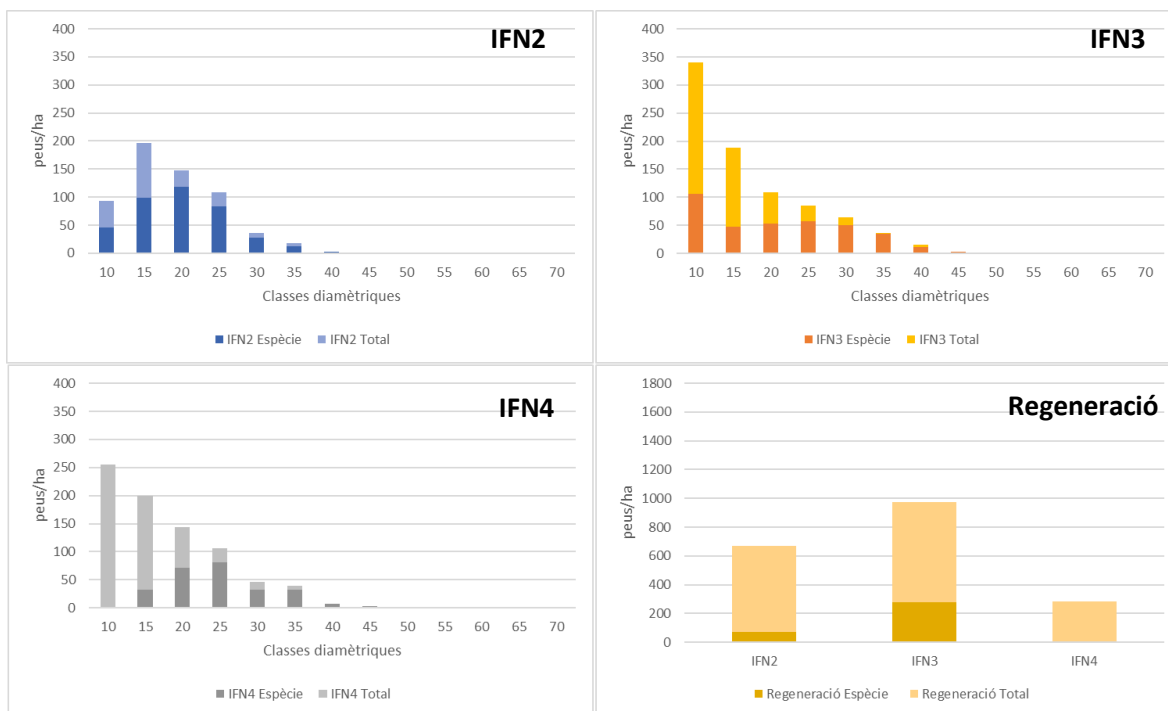


Figura 10: Distribució de la densitat pinedes de pi blanc per classes diamètriques al llarg dels tres inventaris forestals (IFN2, IFN3 i IFN4), diferenciant entre la densitat total i la densitat d'individus de *Pinus halepensis*. El darrer gràfic correspon a la regeneració (peus de diàmetre inferior a 5 cm).

Taxes de creixement, mortalitat i aprofitament

Partint de les mateixes dades dels inventaris forestals i comparant els dos períodes que abasten (IFN2 respecte IFN3 i IFN3 respecte IFN4) podem obtenir informació de taxes de canvi en funció del temps. Aquest tipus d'informació és cabdal per entendre la dinàmica del bosc amb el pas del temps i avaluar-ne les tendències.

Per cada tipus de bosc, hem integrat algunes variables de **creixement o reducció en termes de volum amb escorça (volum del tronc)**, ja que és la unitat comuna a tots tres inventaris. Les variables que s'han considerat són les diferències de creixement entre inventaris i en funció del temps transcorregut, les taxes d'aprofitaments realitzats en el mateix període i la taxa de mortalitat registrada. La comparativa entre aquestes tres variables permet establir un balanç entre guanys i pèrdues de volum (figura 11). Si aquest balanç s'expressés en biomassa o carboni, permetria parlar directament de la capacitat d'embornal del bosc. Expressat en volum, aquest balanç n'és un bon indicador.

En general, **s'observa una tendència comuna a una major mortalitat entre els dos darrers inventaris**, especialment rellevant en els boscos de pi blanc, alzina i pinastre. Els aprofitaments varien entre tipologies de bosc i períodes, essent els més destacats els aprofitaments de pinastre en el període més recent.

La pineda de pinastre és l'únic tipus de bosc que presenta un balanç negatiu pel que fa al darrer període entre inventaris. La taxa de creixement d'aquest període no pot compensar la pèrdua per aprofitaments i mortalitat. Cal precisar, però, que els aprofitaments durant aquest període es poden haver produït posteriorment a la seva mort i que per tant la taxa de mortalitat registrada sigui més baixa de l'ocorreguda realment durant el període.

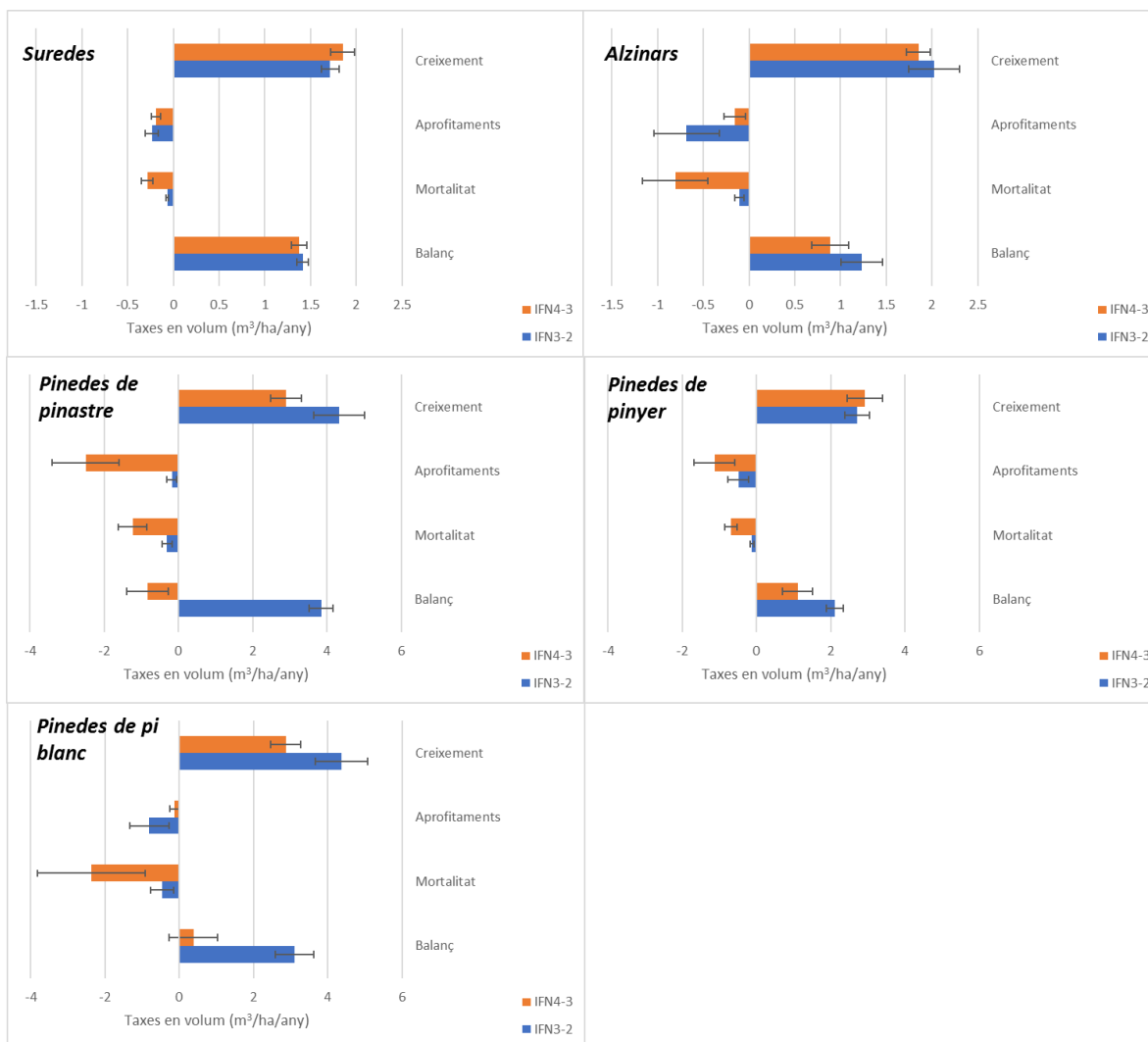


Figura 11: Taxes de creixement, d'aprofitament i mortalitat pels diferents tipus de bosc entre els períodes abastats pels inventaris: entre IFN2 i IFN3 (1989-2001) i entre IFN3 i IFN4 (2001-2016). També s'hi mostra el balanç entre guanys i pèrdues. Les taxes estan expressades en unitats de volum.

Estocs de Carboni

L'anàlisi detallada de les dades dels inventaris forestals també permeten analitzar, no només la capacitat embornal dels boscos, sinó l'assignació i emmagatzematge d'aquest carboni en les diferents fraccions de la biomassa aèria, a més del carboni aeri total CAT (figura 12). Les fraccions considerades són la biomassa de fulles, la biomassa de fusta del tronc, la biomassa de branques i la biomassa d'escorça del tronc. En general, **aquesta assignació entre fraccions mostra un patró similar en tots els boscos, amb lleugeres variacions entre espècies**. Les diferències més significatives es donen en els valors absoluts de carboni emmagatzemat. A les Gavarres, l'alzinar és el tipus de bosc que presenta més carboni en estoc i n'acumula el doble de carboni que la sureda, que és el bosc amb menys carboni acumulat. Per darrera de l'alzinar hi trobem les pinedes de pi blanc i, una mica per sota, la resta de pinedes.

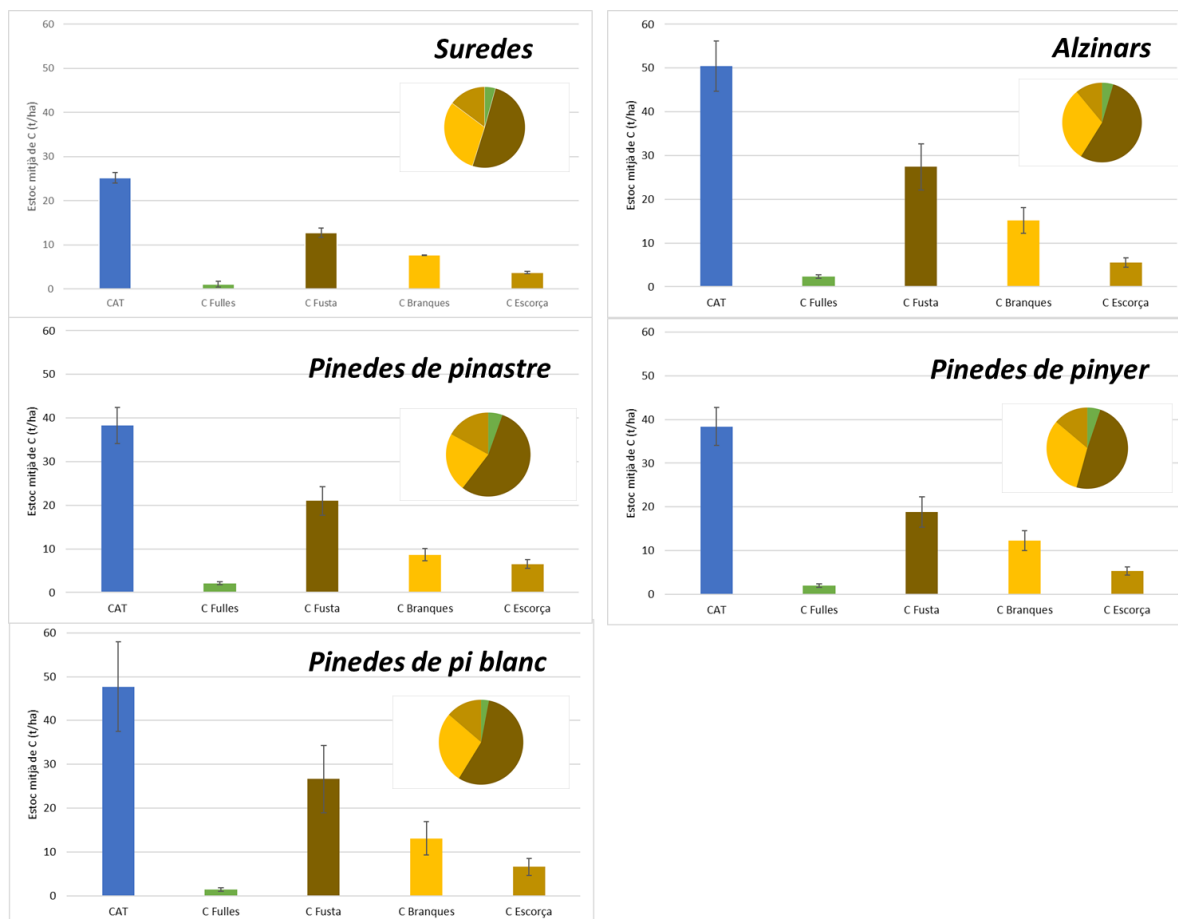


Figura 12: Carboni aeri total (CAT) i carboni emmagatzemat a les diferents fraccions de biomassa aèria (fulles, fusta, branques i escorça) en els diferents boscos considerats en l'estudi (segons dades d'IFN3).

Biovolum aparent del sotabosc

Tot i que la informació continguda als inventaris amb relació al sotabosc i a les espècies arbustives no és molt exhaustiva, l'anàlisi de la informació relativa al recobriment i alçada màxima de les espècies presents a cada parcel·la permet fer una estimació del biovolum aparent del sotabosc (expressat en m^3/ha) i avaluar-ne els canvis amb el temps. La figura 13 mostra aquesta tendència en el biovolum agregat per totes les parcel·les presents a l'àmbit d'estudi. S'observa, en general, **un creixement del biovolum del sotabosc entre l'IFN2 i l'IFN3 i una reducció rellevant en el darrer inventari (IFN4).**

La figura 14 mostra el mateix tipus d'informació però detallada per cada tipus de bosc analitzat. El patró és similar en tots ells, un lleuger creixement entre l'IFN2 i IFN3 i una reducció a l'IFN4. Cal destacar que aquesta **reducció és molt rellevant en les suredes**, amb una reducció del biovolum a gairebé a la meitat en el darrer inventari respecte a l'IFN3.

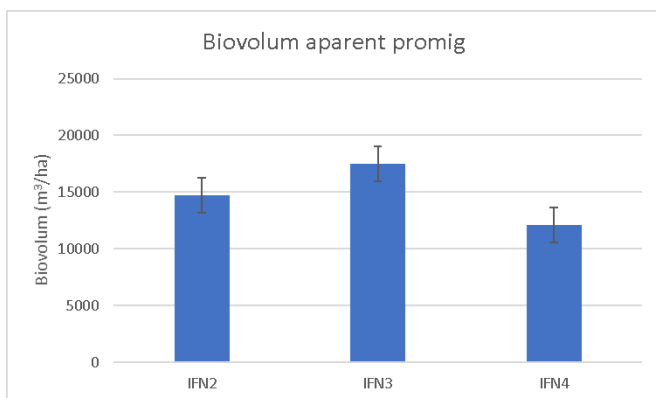


Figura 13: Biovolum aparent (m³/ha) de les espècies de sotabosc presents a totes les parcel·les dels diferents inventaris forestals, com a expressió del producte del seu recobriment i la seva alçada màxima.

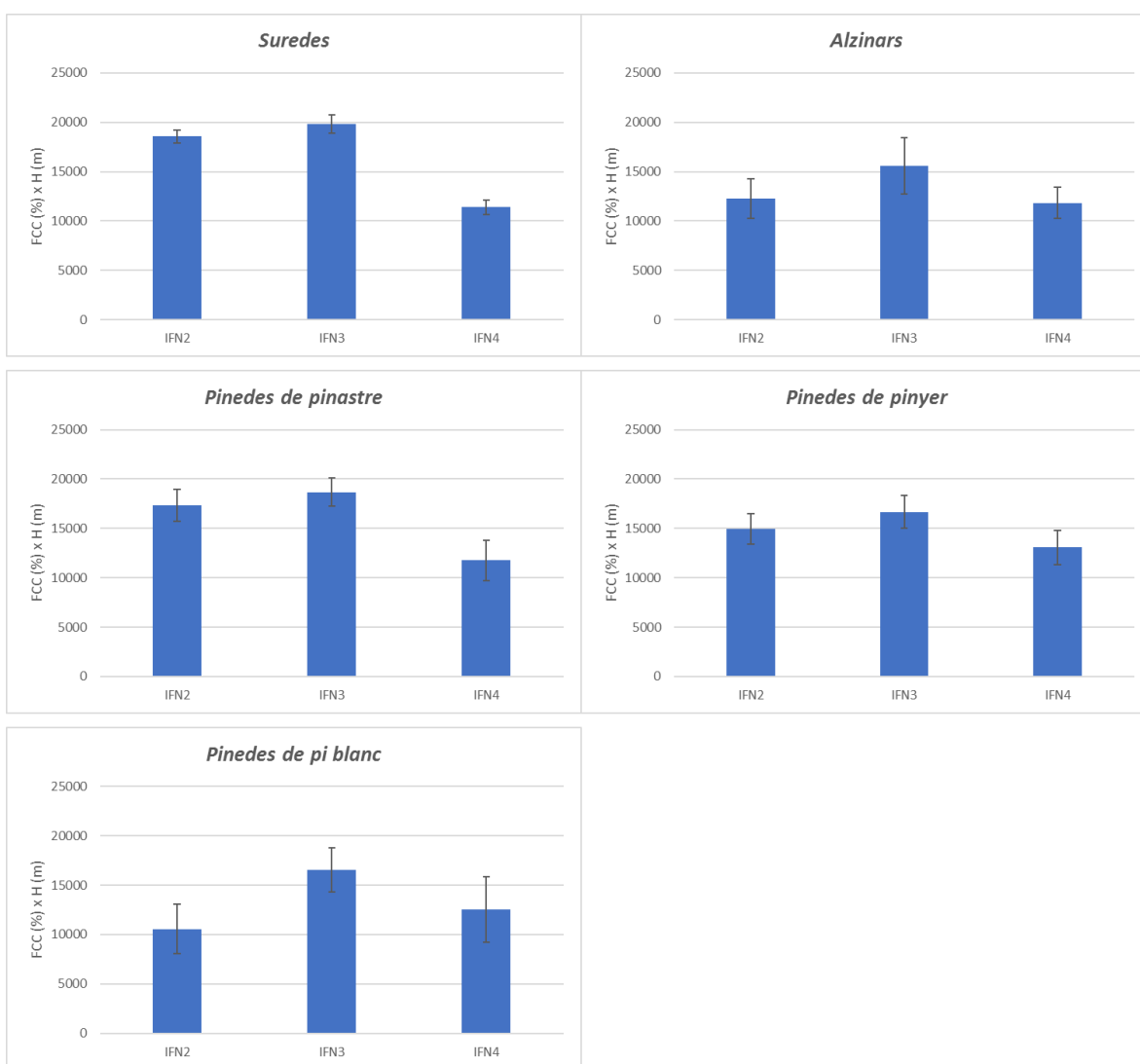


Figura 14: Biovolum aparent (m³/ha) en cada inventari de les espècies de sotabosc presents als diferents tipus de bosc analitzats, com a expressió del producte del seu recobriment i la seva alçada màxima.

Els boscos amb més biovolum aparent de sotabosc inicial són les suredes, seguides dels boscos de pinastre. El caràcter esclarissat d'aquest tipus de bosc explica aquesta major presència inicial d'espècies arbustives al sotabosc.

Si ens fixem en les espècies principals presents als boscos de les Gavarres (taula 3) hi observem **l'aclaparador protagonisme** (tant en presència com en biovolum) del **bruc boal** (*Erica arborea*). Si mirem, per cada tipus de bosc, quin percentatge del biovolum representa el bruc (taula 4) podem confirmar aquesta preponderància i, alhora, el seu canvi en el temps. En general, la **contribució del bruc al biovolum del sotabosc va disminuint lleugerament amb el pas del temps** (sempre mantenint-se per damunt del 60%, excepte en el cas dels alzinars, on pateix una dràstica davallada a l'IFN3, que es manté en el darrer inventari.

Taula 3. Espècies arbustives principals al sotabosc de les Gavarres per cada inventari, atenent al nombre de parcel·les on hi són presents. S'hi mostra el biovolum promig, la desviació estàndard i la n de cada categoria.

IFN2	Biovolum m³/ha	DE	n	IFN3	Biovolum m³/ha	DE	n	IFN4	Biovolum m³/ha	DE	n
<i>Erica arborea</i>	14770	8963	250	<i>Erica arborea</i>	13744	8805	258	<i>Erica arborea</i>	7237	5803	117
<i>Cistus salvifolius</i>	1058	1494	186	<i>Smilax aspera</i>	3152	4938	153	<i>Smilax aspera</i>	1370	2679	96
Papil·lionàcia alta > 1.5 m	1372	2049	152	<i>Cistus salvifolius</i>	454	1497	147	<i>Cistus salvifolius</i>	353	417	93
<i>Phillyrea angustifolia</i>	529	584	114	<i>Phillyrea angustifolia</i>	606	560	119	<i>Viburnum tinus</i>	2034	2755	74
<i>Calluna vulgaris</i>	611	733	101	<i>Viburnum</i>	1641	1991	117	<i>Ruscus aculeatus</i>	258	368	73
<i>Viburnum</i>	1418	2642	84	<i>Ruscus aculeatus</i>	405	566	115	<i>Phillyrea angustifolia</i>	520	760	71
<i>Pistacia lentiscus</i>	945	1661	57	<i>Hedera helix</i>	538	1829	96	<i>Lonicera sp.</i>	213	210	62
<i>Quercus coccifera</i>	451	820	38	<i>Lonicera etrusca</i>	967	1282	89	<i>Hedera helix</i>	119	145	55
<i>Thymus</i>	380	305	19	<i>Calluna vulgaris</i>	828	1198	83	<i>Ulex parviflorus</i>	230	354	48
<i>Rosmarinus officinalis</i>	439	454	12	<i>Rubus</i>	2047	3669	67	<i>Rubus</i>	1015	2107	47
Total	21973	19703	1013		24381	26335	1244		13349	15599	736

Taula 4. Contribució de l'*Erica arborea* en el biovolum aparent de sotabosc dels diferents tipus de bosc.

Tipus de bosc	% Erica IFN2	% Erica IFN3	% Erica IFN4
<i>Pinedes de pi blanc</i>	70	61	62
<i>Pinedes de pinastre</i>	86	77	76
<i>Pinedes de pinyer</i>	79	76	71
<i>Alzinars</i>	73	34	33
<i>Suredes</i>	84	70	61

IDONEÏTAT BIOCLIMÀTICA ACTUAL I FAVORABILITAT LITOLÒGICA

Idoneïtat segons l'Atles d'idoneïtat topoclimàtica de les espècies llenyoses de la Península Ibèrica (UAB-CREAF)

Totes les espècies tenen requeriments ambientals concrets per poder viure. En el cas de les espècies forestals, els condicionants són principalment el lloc on es troba l'espècie (orientació, radiació solar que rep, pendent, etc.), la quantitat d'aigua i nutrients de la qual pot disposar per fer les seves funcions vitals, que vindrà determinada principalment per la precipitació, però també pel tipus de sòl, la seva profunditat, la litologia, etc. i finalment de la temperatura, que és la que marca el seu cicle vital.

L'Atles d'Idoneïtat topoclimàtica de les espècies llenyoses de la Península Ibèrica és un projecte que va ser desenvolupat per un equip d'investigadors de la UAB (Universitat Autònoma de Barcelona) en col·laboració amb el CREAF. Aquest Atles, que té una resolució espacial de 200m, mostra el grau **d'adequació a les condicions climàtiques i topològiques de les principals espècies** llenyoses. Així, donades unes condicions topogràfiques concretes (orientació, pendent, posició a la conca, etc.) i unes condicions climàtiques (temperatura, precipitació, PPET, radiació, etc.) mostra quina adequació té cadascuna de les espècies en un rang de [0,1], essent 0 les zones molt poc adequades i 1 les més adequades. No obstant, els valors alts no indiquen forçosament que hi hagi presència de l'espècie, sinó que segons el criteri topoclimàtic aquesta podria ser-hi.

És important fer notar que, la idoneïtat que modelitza aquest Atles d'Idoneïtat topoclimàtica per cada espècie fa servir uns valors climàtics de referència que arriben fins l'any 2000. A més a més, el model no inclou els efectes que la gestió forestal pot tenir sobre la idoneïtat de la vegetació, ni les anomalies climàtiques concretes succeïdes en els darrers anys (episodi de sequera del 2005, etc.), ni el canvi climàtic. El model es **basa en la topografia i el clima de referència** i respon a aquestes variables. No obstant, la formació i la dinàmica dels boscos que determinen si un lloc és més o menys apte per una espècie determinada tenen importants influències com ara l'acció antròpica, la profunditat del sòl etc. És per això que en alguns casos la idoneïtat predita pel model podria no ajustar-se a la que, de forma empírica, s'observa al territori.

A la figura 15 es presenta la idoneïtat topoclimàtica per les espècies majoritàries al massís de les Gavarres. S'aprecia que hi ha dues espècies que destaquen molt respecte la resta: l'alzina (*Quercus ilex*), que presenta una idoneïtat molt elevada a gairebé tot el territori del massís; i el pinastre (*Pinus pinaster*), que mostra el patró contrari, mostrant valors molt baixos a tota la superfície de les Gavarres. Així doncs, aquesta idoneïtat topoclimàtica confirma també que el pinastre que viu en aquesta zona es troba fora del seu rang de distribució. Això explica per què és una espècie que pateix episodis de decaïment en determinades localitats.

Pel que fa la resta de les espècies, la idoneïtat de la surera (*Quercus suber*) és elevada o força elevada a tot el massís, amb l'excepció de les petites zones de les carenes del nord-oest del massís, on la idoneïtat és menor. Quant al pi pinyer (*Pinus pinea*) la idoneïtat és, en general força elevada, excepte algunes zones una mica més elevades de la part central del massís. I finalment el pi blanc (*Pinus halepensis*) té valors d'idoneïtat baixos a tota la meitat oest de les Gavarres i valors mitjans a la resta de la zona.

Aquests mapes els trobareu disponibles a l'Annex 4 de l'apartat de cartografia inclosa als annexos.

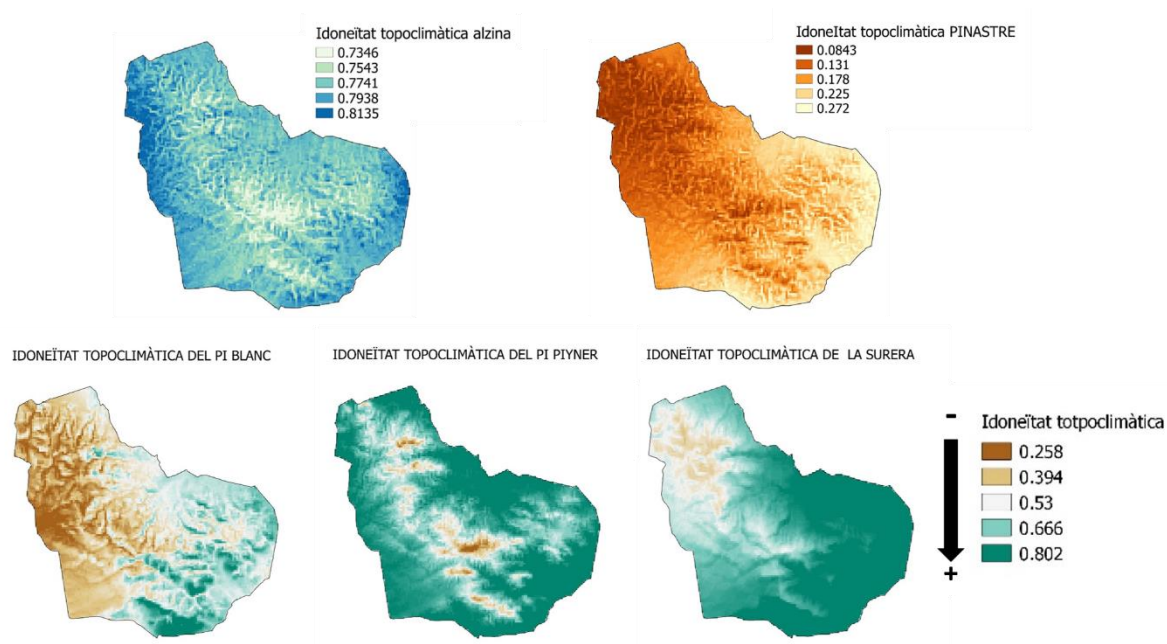


Figura 15: Idoneïtat topoclimàtica pel massís de les Gavarres de les espècies: alzina (*Quercus ilex*), pinastre (*Pinus pinaster*), pi blanc (*Pinus halepensis*), pi pinyer (*Pinus pinea*) i surera (*Quercus suber*). Per aquestes tres darreres espècies els valors van de [0, 1], sent 0 la idoneïtat menor i 1 la idoneïtat major. **Noteu** que s'ha estirat la llegenda de l'alzina fent que els valors vagin de [0.73, 0.81] ja que la idoneïtat és alta a tots el massís i la llegenda quedava saturada. Per contra, la llegenda del pinastre s'ha estirat per sota, de manera que els valors van de [0.08, 0.27], ja que la idoneïtat és baixa de forma global a tot el massís.

La taula 5 recull les variables utilitzades en l'anàlisi que han estat rellevants per a determinar, en cada cas, la idoneïtat de cada espècie d'interès.

El fet que es tracti d'un retall per les Gavarres d'un Atlas d'abast geogràfic molt superior (tota la Península Ibèrica), mostra certes limitacions a l'hora de recollir patrons microtopoclimàtics que es donen a escala de massís, tot i que la tendència global pugui ser suficientment robusta. Així, l'elevada influència de la distància al mar en podria ser una mostra. En aquest sentit, hem mirat de complementar aquesta aproximació amb altres treballs que tot i adreçar la idoneïtat bioclimàtica de les espècies, parteixin d'altres algoritmes i, alhora, d'altres fonts d'informació climàtica. En aquest sentit, hem recollit el treball que es va fer per Catalunya pel CTFC en col·laboració amb el CREA.

Taula 5. En verd, variables rellevants en la determinació de l'adequació topoclimàtica de cadascuna de les espècies d'interès, segons Mapa Idoneïtat topoclimàtica d'espècies llenyoses de la Península Ibèrica. En alguns casos, s'indica si es va prendre en consideració aquell variable per a un període en concret (estiu, hivern, etc.) o bé si es van prendre els valors més baixos de la sèrie analitzada.

VARIABLES INCLOSES EN L'ANÀLISI	<i>Quercus suber</i>	<i>Quercus ilex</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus pinea</i>	<i>Pinus halepensis</i>
Disponibilitat hídrica	Menor/Hivern	Menor/Hivern	Menor/Hivern	Menor/Hivern	Primavera
Temperatures mitjanes de les mínimes més baixes	Hivern	Hivern	Hivern	Hivern	Hivern
Curvatura del terreny. Aquest valor és 0 per a zones planes, és negatiu per zones convexes, positiu per zones còncaves.					
Distància al mar amb el pendent com a cost de fricció					
Pendent					
Radiació solar potencial		Estiu	Estiu		
Graus dia de creixement (T>0°C)					
Temperatura mitjana de les màximes					

Idoneïtat bioclimàtica segons el Model de Distribució d'Espècies (CTFC-CREAF)

En el marc del projecte MEDFIRE (<https://sites.google.com/site/medfireproject/medfire>) del CTFC, s'ha elaborat un model distribució d'espècies (SDM, model lineal generalitzat amb distribució d'errors binomials) a partir dels registres d'absència i de presència extrets de l'IFN3. Es van considerar un total de 15.828 parcel·les per a la construcció del model. L'àrea geogràfica s'estén més enllà dels límits de la zona d'estudi, que inclou Catalunya i també territoris contigus.

S'ha modelat la probabilitat de presència de les principals espècies arbòries a Catalunya com a funció únicament de descriptors climàtics. Les anàlisis han considerat la temperatura mitjana anual de les mínimes mensuals, la temperatura mitjana anual de les màximes mensuals, la temperatura mitjana anual, la precipitació anual i la radiació solar potencial anual.

Per al període de calibració s'han utilitzat dades diàries del període 1990-1999 interpolades de les estacions meteorològiques. No s'ha considerat la topografia perquè està fortament correlacionada amb els usos del sòl que han configurat la majoria de les distribucions actuals d'espècies a la Mediterrània..

Per al conjunt de variables climàtiques mensuals seleccionades a llarg termini, s'han calculat models de regressió tenint en compte un conjunt reduït de predictors climàtics amb baixa correlació en correlacions de rang Spearman $\leq 0,7$ a la regió objectiu (Catalunya). Per a cada espècie s'han calculat prèviament **Models Additius Generalitzats (GAMs)** tenint en compte tota l'àrea de calibració (Catalunya i territoris circumdants) i s'ha seleccionat la variable més explicativa que sovint es relaciona amb la temperatura. Posteriorment, s'han seleccionat variables mensuals no correlacionades de precipitació o temperatura i la radiació mensual més explicativa. Atès que algunes de les respostes ajustades segons els GAM no eren lineals, es va realitzar una regressió logística per passos amb els tres descriptors de clima, provant relacions no lineals per a totes les variables a través de termes quadràtics. La precisió de predicció es va avaluar a través de l'Àrea sota la corba (AUC), que s'ha mostrat satisfactòria en tots els casos en el procés de validació.

A la figura 16 es presenta la idoneïtat bioclimàtica per les espècies majoritàries al massís de les Gavarres. Com a l'anterior mapa (figura 15) s'aprecia també que l'**alzina** (*Quercus ilex*), presenta una **idoneïtat molt elevada** a gairebé tot el territori del massís, especialment a la zona central i nordoccidental; i el **pinastre** (*Pinus pinaster*), que mostra el patró contrari, mostrant valors molt **baixos** a tota la superfície de les Gavarres. Tot i la més baixa resolució, aquests patrons presenten **matisos espacials** rellevants respecte al mapa d'idoneïtat topoclimàtica de l'apartat anterior, especialment pel que fa a la influència de la distància al mar en la idoneïtat de les espècies que es fa especialment evident, tot i la baixa idoneïtat, en el patró espacial del pinastre.

Pel que fa la resta de les espècies, la idoneïtat de la **surera** (*Quercus suber*) és elevada en algunes **zones centrals, nord i sud del massís**, però mostra idoneïtats més baixes a la **banda oriental i occidental** del massís respecte al mapa topoclimàtic. Quant al **pi pinyer** (*Pinus pinea*) la idoneïtat és, en general, **menor** que en el mapa anterior, llevat de les **parts baixes dels vessants sud i nord**. I finalment el **pi blanc** (*Pinus halepensis*) té valors d'idoneïtat **baixos** especialment a tota la **meitat oest** de les Gavarres i valors **mitjans** a les **parts baixes de la zona oriental** del massís.

Aquests mapes els trobareu disponibles a l'Annex 4 de l'apartat de cartografia inclosa als annexos. Aquesta aproximació serà utilitzada en la 2a fase d'aquest treball (projeccions de la idoneïtat) ja que es basa en models climàtics que incorporen **projeccions a mig termini**, com pot ser el 2050 (escenari RCP 4.5).

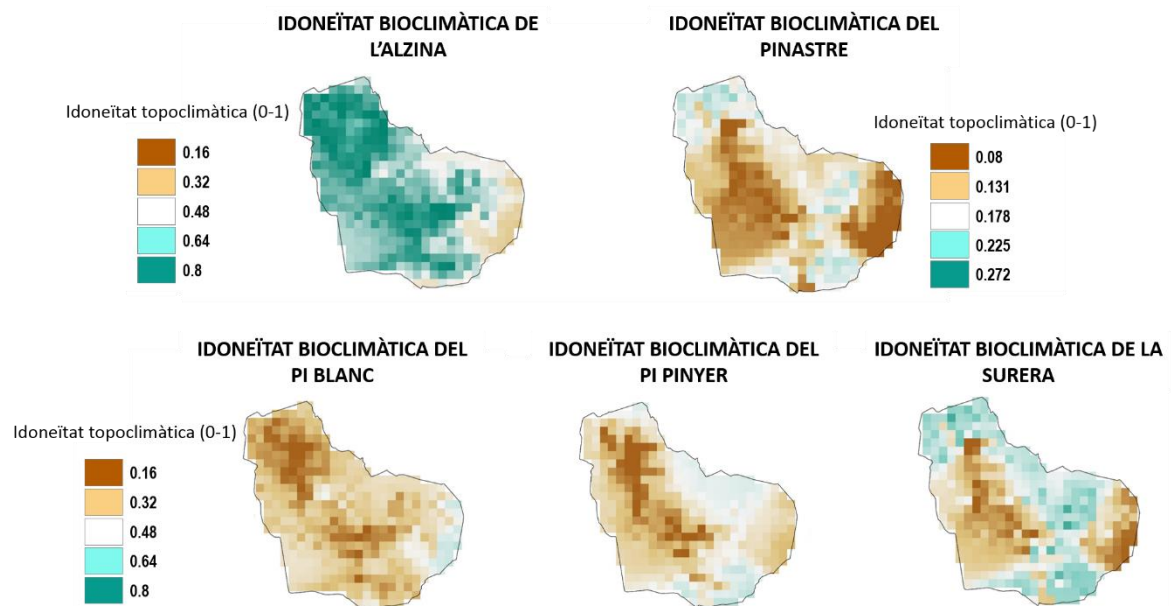


Figura 16: Idoneïtat bioclimàtica pel massís de les Gavarres de les espècies: alzina (*Quercus ilex*), pinastre (*Pinus pinaster*), pi blanc (*Pinus halepensis*), pi pinyer (*Pinus pinea*) i surera (*Quercus suber*). Per aquestes tres darreres espècies els valors van de [0, 1], sent 0 la idoneïtat més baixa i 1 la idoneïtat màxima.

Favorabilitat litològica

La favorabilitat litològica fa referència a la mesura en la qual una categoria litològica concreta és favorable o desfavorable per cadascuna de les espècies que sustenta o simplement li és indiferent. Donat que per algunes espècies no tots els substrats són adients, la favorabilitat litològica és una mesura d'aquesta adequació.

El Consorci de les Gavarres ha facilitat el mapa de les categories litològiques simplificades del massís de les Gavarres, conformat per 6 categories que són les que es mostren a la figura 17. S'aprecia que el paleozoic i les roques ígnies són les categories més abundants, amb 13 mil i 10 mil hectàrees respectivament. Per altra banda, el paleògen i el neògen són les menys presents al massís, amb superfície al voltant de 1.600 hectàrees. El quaternari i les roques metamòrfiques ocupen aproximadament 7.000 hectàrees del massís respectivament.

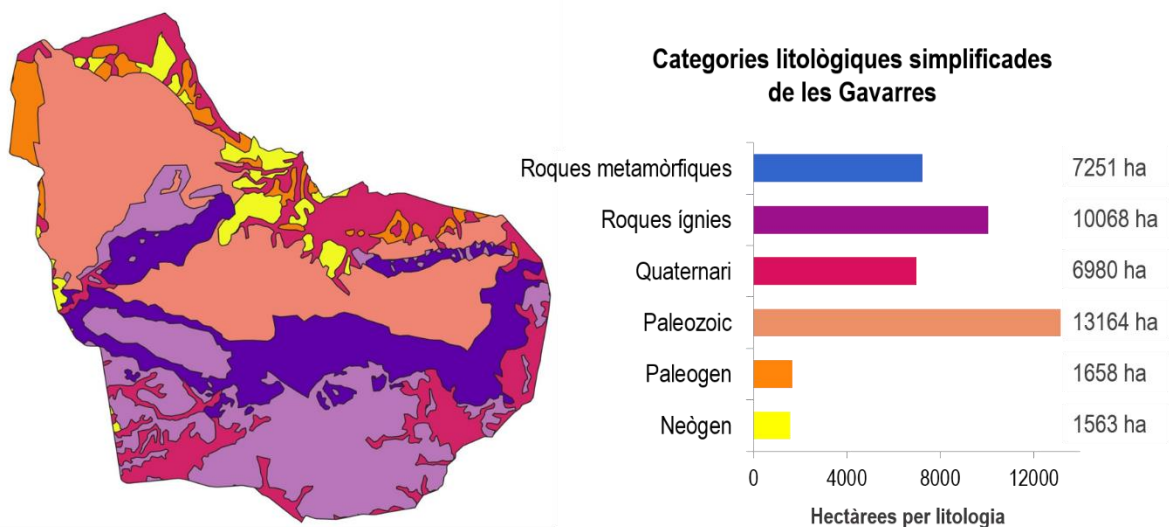


Figura 17: Categories litològiques simplificades del massís de les Gavarres i la superfície (en hectàrees) que ocupada cadascuna d'elles.

Per tal de determinar quina és la favorabilitat litològica de les espècies de les Gavarres, s'ha fet servir aquest mapa litològic simplificat i s'ha creuat amb la informació de les espècies forestals segons el Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya.

Del resultat d'aquesta anàlisi s'observa (figura 18) que la categoria del **neògen** no beneficia especialment cap de les espècies presents al massís de les Gavarres, ja que totes hi són presents en major o menor mesura. No obstant, la surera i l'alzina són les més representades, ja que es troben en bona part de la superfície que ocupa aquesta categoria, però que tal i com es veu a la figura 17 és molt minoritària en el global del massís. A la categoria del **paleògen**, que també és minoritària a les Gavarres (figura 17), hi trobem especialment alzines i pi blanc (figura 18). La resta de les espècies hi són menys presents. A la categoria del **paleozoic** hi ha una presència majoritària d'alzina surera i en menor mesura de pinastre. La resta de les espècies són molt poc presents en aquesta litologia. Pel que fa a la categoria del **quaternari**, la presència de les diferents espècies està força repartida, malgrat que s'aprecia una major presència d'alzines sureres, probablement degut a què aquesta espècie és la més abundant al massís. La surera mostra una clara preferència per les **roques metamòrfiques** i **ígnies** ja que és l'espècie clarament majoritària. Per contra, no trobem presència

d'alzines sobre aquestes dues categories. En el cas de les roques ígnies el pi blanc també és molt minoritari.

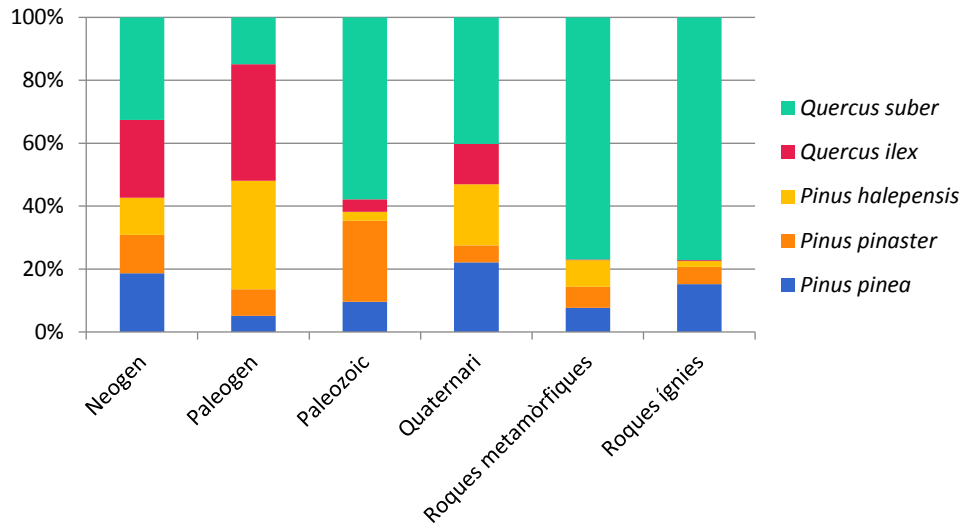


Figura 18: Proporció de la presència de cada espècie sobre cadascuna de les categories de la litologia simplificada.

Així doncs, s'aprecia que la surera (*Quercus suber*) és present en totes les categories litològiques, però amb una clara preferència per les roques ígnies i metamòrfiques i a la categoria del paleozoic. Les alzines (*Quercus ilex*) són presents sobre el neògen, el paleògen, el quaternari i en menor mesura sobre la categoria del paleozoic. El pi blanc (*Pinus halepensis*) es troba en totes les categories, però especialment sobre el paleògen i el quaternari. El pinastre (*Pinus pinaster*) també és present en totes les categories, però amb preferència al paleozoic. I finalment el pi pinyer (*Pinus pinea*) també és present a totes les tipologies de litologia, amb una major presència al neògen i al quaternari.

Aquesta favorabilitat litològica és un reflex d'on es troben i viuen cadascuna de les espècies estudiades. No obstant, el massís de les Gavarres actualment té i ha tingut històricament una important influència antròpica. Les diferents accions antròpiques que s'hi han desenvolupat (plantacions, explotacions, gestió forestal, etc.) poden haver afavorit o desafavorit les espècies més enllà de les seves preferències d'estació. No obstant, el fet que trobem una determinada espècie sobre un tipus de litologia ja és indicador que aquesta espècie pot viure-hi i que si bé podria ser un substrat concret no fos el més idoni per l'espècie, és suficientment bo com per a què hi visqui. Convé recordar de nou que algunes espècies, com l'alzina o el pi blanc, no mostren preferència per cap tipus de substrat litològic.

VULNERABILITAT ACTUAL DE LES ESPÈCIES DE LES GAVARRS

En el marc del projecte Vulnemap, impulsat per la Diputació de Girona l'any 2018, es va calcular la vulnerabilitat dels boscos de Catalunya, a partir d'un model logístic. El model prediu la vulnerabilitat, mesurat com una probabilitat entre 0 i 1, dels boscos a partir d'informació real de les zones boscoses afectades per decaïment forestal provinent del projecte DEBOSCAT (variable resposta). El DEBOSCAT és un projecte de seguiment de l'estat dels boscos de Catalunya que registra anualment els episodis de decaïment forestal (decoloració, defoliació i mortalitat) ocorreguts. Es van utilitzar les dades dels anys 2012 i 2016, ja que aquests anys concentren bona part de les ocurrences de decaïment forestal registrades des de l'inici del programa el 2010.

Paral·lelament es van obtenir les variables potencialment predictives d'aquests episodis de defoliació, decoloració i mortalitat. Es van escollir variables climàtiques: radiació solar mitjana anual, precipitació mitjana anual, PPET (Precipitació/Evapotranspiració potencial) i temperatura mitjana anual; variables meteorològiques (dels anys en curs): anomalies de temperatura de l'estiu (juny-juliol-agost) i índex de sequera (SPEI) a 3 i 24 mesos; variables d'estructura forestal: biomassa aèria total; variables topogràfiques: top índex; i finalment variables geològiques: la litologia. Totes elles es van obtenir o adaptar a ràsters de 180m de resolució, excepte les anomalies, amb les que es va treballar a 1 km de resolució.

El resultat principal del Vulnemap són mapes de vulnerabilitat a una sèrie d'escenaris de **sequera determinats**. Aquesta vulnerabilitat es mesurada com una probabilitat que va de 0 (probabilitat nul·la) a 1 (màxima probabilitat). Els boscos on s'aprecia una probabilitat de vulnerabilitat més alta són els del nord-est del Prepirineu, amb colors ataronjats, algunes zones del Montseny i pinedes de les comarques de la Noguera, el Pallars Jussà i l'oest del Solsonès. En general la vulnerabilitat predita pels boscos de Catalunya és força baixa.

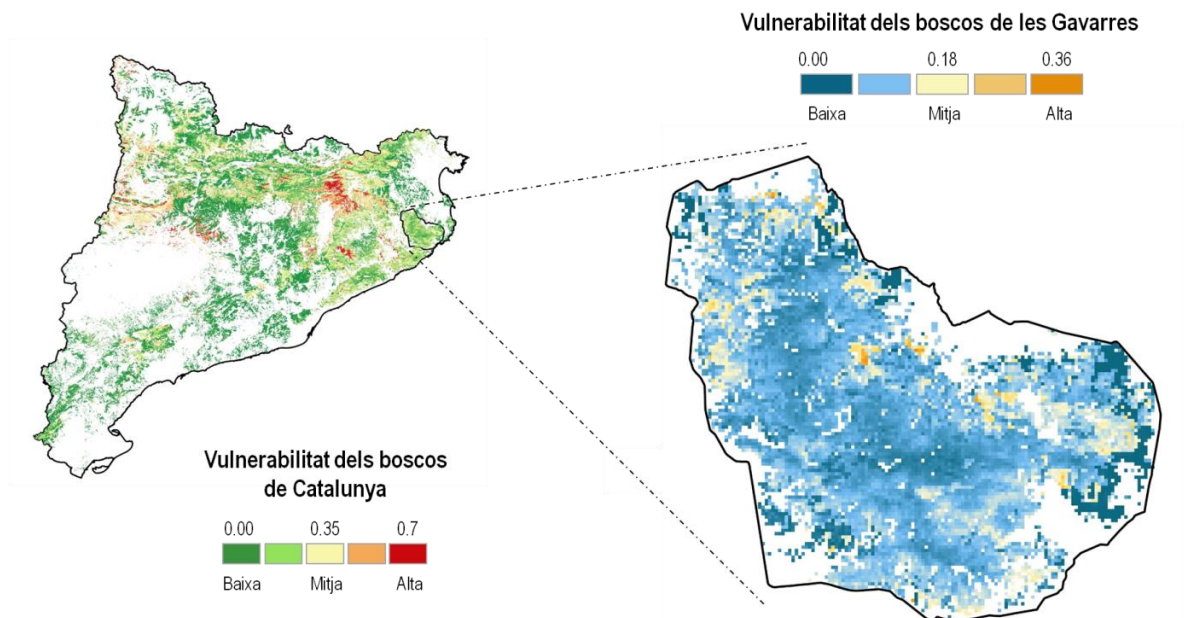


Figura 19: Mapa de la vulnerabilitat de Catalunya (esquerra) i zoom de la zona de les Gavarres (dreta). Atenció que les llegendes tenen rangs diferents. La vulnerabilitat dels boscos de les Gavarres va de [0, 0.36] (de blau a taronja), mentre que la dels boscos de Catalunya va de [0,1] (de verd a vermell).

S'ha fet un zoom de la vulnerabilitat a la zona de les Gavarres fent servir els límits més amplis acordats que ocupen 39.760 ha (a la dreta de la Figura 19, amb una llegenda de blaus a taronges). Però per tal de poder diferenciar la vulnerabilitat local a les Gavarres s'ha estirat la llegenda de manera que el rang de valors només va de 0 a 0.36. És a dir, segons el mapa de vulnerabilitat global de Catalunya (escala de verds a vermells), a les Gavarres totes les masses boscoses tenen una vulnerabilitat baixa; però estirant la llegenda s'aprecia que hi ha algunes zones més vulnerables que les altres. Concretament, algunes de les pinedes de pinastre (*Pinus pinaster*) de la carretera que va de Sant Sadurní de l'Heura a Sant Mateu de Montnegre; i d'altres també de pinastre de la carretera de Sant Pol a Riu d'Or.

Per poder fer una bona interpretació del valor de vulnerabilitat és important tenir present que la **robustesa de la predicció** depèn especialment del **nombre de píxels afectats per cadascuna de les espècies**. Per aquelles espècies on el model té pocs píxels amb afectació segons el DEBOSCAT del 2012 i del 2016 la robustesa de la predicció és menor. En canvi, per aquelles espècies que tenen

molts píxels afectats la predicció del model és més sòlida. Per especificar les espècies del model s'ha fet servir el Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya del 2009 (MCSC4, figura 1).

Combinant la informació del Vulnemap i del MCSC s'ha determinat quines espècies són més vulnerables. A la figura 20 es presenta la relació entre les categories de vulnerabilitat i les espècies forestals del massís de les Gavarres. Cal remarcar que la llegenda ha estat estirada entre 0 a 0.36, de manera que en termes globals de tot Catalunya, podem parlar de que la **vulnerabilitat dels boscos a tot el massís de les Gavarres és baixa**.

No obstant mirant les dades amb la llegenda estirada s'aprecia que en el cas del pi pinyer (*Pinus pinea*) trobem sobretot valors de vulnerabilitat entre molt baixos i baixos, amb poquíssima representació de vulnerabilitat de [0.272, 0.361]. El pinastre (*Pinus pinaster*) mostra valors de vulnerabilitat en totes les franges: des de valors molt baixos que denoten resistència, a valors una mica més alts, que indiquen que l'espècie és relativament vulnerable. El pinastre, com la resta de coníferes, quan presenta decaïment, generalment acaba morint. El pi blanc (*Pinus halepensis*) és la que presenta els valors més baixos de vulnerabilitat, fet que suggereix que és una espècie molt resistent. L'alzina (*Quercus ilex*) mostra valors mitjans i més o menys alts de vulnerabilitat i finalment el suro (*Quercus suber*) mostra valors globalment mitjans de vulnerabilitat. No obstant, aquestes dues espècies de planifolis tenen capacitat de recuperar-se després d'un episodi de decaïment de manera que si les condicions milloren poden rebrotar.

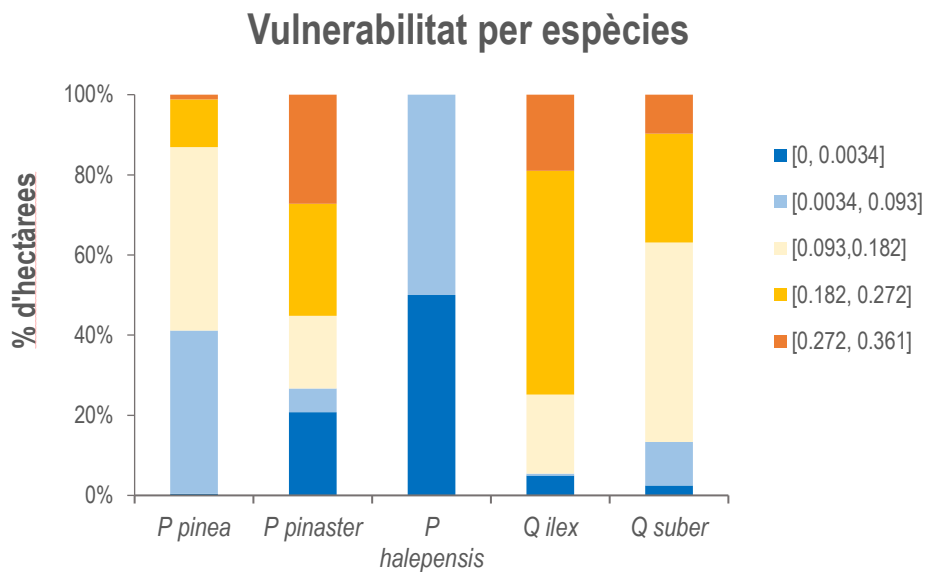


Figura 20: Vulnerabilitat predita per les espècies presents a les Gavarres segons els rangs estirats de la llegenda (de 0 a 0.36). Noteu que la llegenda correspon amb la de la figura 19, de colors blaus a taronges.

BASE DE DADES CLIMÀTICA

A partir del projecte LIFE MEDACC, coordinat per l'OCCC i amb la participació del CREAF, l'IRTA i l'Institut Pirinenc d'Ecologia-CSIC, disposem d'una recopilació d'informació climàtica històrica provinent del Servei Meteorològic de Catalunya i de l'Agència Estatal de Meteorologia. Una de les conques d'estudi del projecte ha estat el Ter. La recopilació inclou les sèries històriques diàries de precipitació i temperatura màxima i mínima de les estacions presents a les comarques properes a l'àmbit d'estudi (figura 21). En alguns casos, s'han pogut recollir dades de radiació.

Les sèries van ser homogeneïtzades i reomplertes per l'equip d'investigadors de l'IPE-CSIC i estan recopilades i disponibles a l'Annex 4 de l'apartat de base de dades climàtica inclosa als annexos.

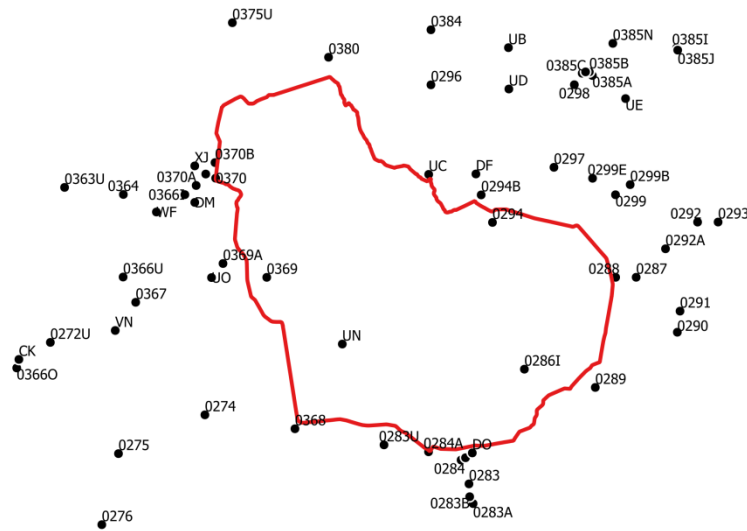


Figura 21: estacions meteorològiques del SMC i l'AEMET considerades al projecte LIFE MEDACC i de les quals se'n disposa les sèries diàries de precipitació i temperatura.

CONCLUSIONS DE LA PRIMERA PART

Aquesta primera part de l'estudi ha permès fer una recopilació de molta informació sobre l'estat actual dels boscos de les Gavarres i la seva dinàmica recent. L'anàlisi de diferents fonts d'informació i la combinació de moltes d'elles ens permet obtenir una imatge més nítida i, sobretot basada en dades objectives, de l'estat actual dels boscos i de quines dinàmiques passades (25 anys) ens expliquen aquest estat.

A partir de les dades derivades de l'anàlisi dels tres inventaris forestals nacionals (IFN2, IFN3 i IFN4), podem constatar que:

- Els boscos de les Gavarres, dominats històricament i majoritàriament per les suredes, partien d'una situació inicial (IFN2 1989) de descapitalització evident (àrea basal mitjana de 13.5 m²/ha). Eren boscos joves, no especialment densos, amb pocs individus grans i amb un estoc en peu relativament baix.
- En els darrers 25 anys, aquests boscos han crescut notablement en àrea basal i, especialment, en volum, que s'ha gairebé duplicat.
- Alhora, aquest creixement ha anat acompanyat d'una major diversificació del bosc, on la preponderància de l'espècie dominant ha anat minvant progressivament.
- Aquests canvis s'expliquen, en bona mesura, per la pròpia dinàmica natural de substitució progressiva d'espècies heliòfiles per espècies més tolerants a l'ombra amb la conseqüent tendència creixent de mortalitat de les classes diamètriques inferiors. A aquesta major competència pels recursos (sobretot l'aigua) s'hi suma sinèrgicament, la major recurrència d'episodis climàtics intensos registrats a la darrera dècada, que afecten principalment les classes més petites que pateixen major competència pels recursos.
- Alhora, les línies de subvenció adreçades a la gestió forestal sostenible, sobretot a partir de l'any 2000, han incidit en la millora estructural i conformació de molts boscos de les Gavarres, especialment de les suredes, i de les pinedes de pinastre on s'hi ha intervingut després d'algun episodi de decaïment.

- Una gestió forestal més activa en la darrera dècada lligada a aquesta dinàmica successional també incideixen en una reducció significativa de la quantitat de sotabosc: després d'un augment generalitzat entre el 1990 i el 2000, el segueixen una reducció significativa entre el 2000 i 2015.
- De les tipologies de bosc representatives analitzades a fons en aquest informe, veiem clarament com l'alzinar és el bosc que presenta uns millors indicadors de vigor i regeneració, tant en els mateixos alzinars com a regenerat en altres tipus de bosc (suredes). En aquest sentit, i atenent a aquestes dades, l'alzinar es revela com un actiu en el nou context climàtic i de gestió de les Gavarres.
- En una línia oposada, les pinedes redueixen el seu protagonisme fet observable per la cada vegada menor proporció d'aquestes espècies en les classes diamètriques inferiors i una nul·la o quasi bé nul·la regeneració actual. El seu caràcter heliòfil impedeix la seva regeneració natural quan hi ha altres espècies que li fan ombra.
- L'anàlisi de la idoneïtat bioclimàtica actual al massís de les Gavarres corrobora que hi ha dues espècies que destaquen molt respecte la resta: l'alzina, que presenta una idoneïtat molt elevada a gairebé tot el territori del massís; i el pinastre, que mostra el patró contrari. La surera mostra una idoneïtat elevada o força elevada a tot el massís, amb l'excepció de les petites zones de les carenes del nord-oest del massís, on la idoneïtat és lleugerament menor. Quant al pi pinyer la idoneïtat és, en general força elevada, excepte algunes zones una mica més elevades de la part central del massís. I finalment el pi blanc té valors d'idoneïtat baixos a tota la meitat oest de les Gavarres i valors mitjans a la resta de la zona.
- L'anàlisi de la favorabilitat litològica per aquestes espècies ha vingut a reforçar l'anàlisi de la seva presència al massís. La surera és present en totes les categories litològiques, però amb una clara preferència per les roques ígnies i metamòrfiques i a la categoria del paleozoic. Les alzines són presents sobre el neògen, el paleògen, el quaternari i en menor mesura sobre la categoria del paleozoic. Es troba pi blanc en totes les categories, però especialment sobre el paleògen i el quaternari. El pinastre també és present en totes les categories, però amb preferència al paleozoic. I finalment el pi pinyer també és present a totes les tipologies de litologia, amb una major presència al neògen i al quaternari.
- La idoneïtat bioclimàtica i la favorabilitat litològica ha estat fortament modelada per l'acció humana històrica en el territori, que pot haver afavorit algunes de les espècies més enllà de les seves preferències d'estació.
- Finalment, pel que fa a l'anàlisi de la vulnerabilitat a patir d'episodis de decaïment de les diferents espècies estudiades a escala de massís, podem determinar que la vulnerabilitat dels boscos a tot el massís de les Gavarres és baixa, en relació amb altres massissos muntanyosos forestals de Catalunya.
- El pi blanc és, amb diferència, la que presenta valors més baixos de vulnerabilitat, fet que ens fa pensar que és una espècie molt resistent. També destaca el pi pinyer, que presenta valors de vulnerabilitat entre molt baixos i baixos, i el pinastre amb valors de vulnerabilitat en totes les franges: des de valors molt baixos que denoten resistència, a valors una mica més alts. El suro mostra valors globalment mitjans de vulnerabilitat i, finalment l'alzina mostra els valors més alts. No obstant, aquestes dues darreres espècies de planifolis tenen capacitat de recuperar-se després d'un episodi de decaïment rebrotant si les condicions posteriors milloren.

2a part. Projeccions

INTRODUCCIÓ A LA SEGONA PART

Aquest segon informe s'ha centrat en les projeccions de les tendències en la idoneïtat de les espècies i boscos seleccionats i també la seva dinàmica de creixement: suredes (*Quercus suber*), boscos de pinastre (*Pinus pinaster*), boscos de pi pinyer (*Pinus pinea*), boscos de pi blanc (*Pinus halepensis*) i alzinars (*Quercus ilex*).

D'una banda, i seguint l'estela de les darreres aportacions fetes al primer informe, mostrem les projeccions de la idoneïtat bioclimàtica de les principals espècies forestals de les Gavarres segons l'algoritme que ha treballat el grup del CTFC-CREAF a partir de sèries climàtiques mensuals d'1x1km regionalitzades per la zona d'estudi fins al 2050, a partir de dos models climàtics i l'escenari de canvi RCP4.5 (escenari lleu de canvi segons l'IPCC).

D'altra banda, s'ha fet un exercici de simulació de la dinàmica dels boscos en funció de l'espècie principal segons el model forestal GOTILWA+ aprofitant les sèries futures diàries generades en el marc del projecte LIFE MEDACC a la conca del Ter. Aquestes sèries incorporen també el forçament RCP4.5 i deriven d'una reanàlisi promitjada i zonificada de diferents models utilitzats al Tercer Informe sobre el Canvi Climàtic a Catalunya (TICCC)

PROJECCIONS CLIMÀTIQUES DISPONIBLES

El Tercer Informe de Canvi Climàtic de Catalunya (projecte LIFE MEDACC)

En el marc del projecte LIFE MEDACC s'ha generat una base de dades climàtiques, tant històriques (vegeu 1r Informe de les Gavarres) com de projeccions futures. Les dades meteorològiques pel període històric i les precipitacions diàries de les estacions meteorològiques disponibles a la conca s'han obtingut del SMC i l'AEMET. Per a les projeccions futures, s'han utilitzat la temperatura i la precipitació màxima i mínima diàries projectades per al període 2012–2050 segons els canvis recollit als Tercer Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya (TICCC 2016).

En aquest informe (TICC), s'ha dut a terme una regionalització per a Catalunya de diferents models climàtics globals (GCM) inclosos al projecte internacional CMIP5, que ha nodrit el 5è Informe d'Avaluació de l'IPCC (AR5). Dels escenaris climàtics (forçament radiatiu) possibles, el TICC ha escollit l'escenari RCP4.5. Al TICC s'ha aplicat una zonificació a les projeccions distingint tres àmbits territorials (Pirineu, Interior i Litoral/Prelitoral). Les projeccions indiquen un augment mitjà de la temperatura anual de 0,8 i 1,4 ° C per als períodes 2012–2021 i 2031–2050, respectivament, per a Catalunya. Es calcula que els canvis previstos de la precipitació mitjana anual es troben entre -2,4 i -6,8% per als períodes relacionats.

Atenent a aquestes projeccions i zonificació, el projecte LIFE MEDACC ha elaborat unes projeccions diàries pròpies per algunes de les estacions meteorològiques presents a les conques d'estudi del projecte (la Muga, el Ter i el Segre) aplicant el senyal de canvi per al període i la zonificació escollida. En el cas que ens ocupa, per l'exercici de dinàmica forestal amb el model GOTILWA+ (pel qual es necessiten sèries diàries) s'ha utilitzat la projecció generada per a la conca del Ter perquè és la que té una major sobreposició espacial amb les Gavarres: la sèrie escollida és la de Fornells de la Selva (SMC UO), de la qual s'han projectat els valors futurs mantenint el patró estadístic de la sèrie històrica i s'ha corregit la temperatura i la precipitació per l'orografia dels Gavarres (mitjançant el model de gradient altitudinal inclòs a SWAT).

Projecte INFORMED (CTFC-CREAF)

Per altra banda, en el marc del projecte INFORMED, el CTFC disposa de sèries de projeccions de dades mensuals per a Catalunya per al període 2006-2100 en una graella de resolució espacial d'1x1km provinents de diferents models climàtics emprats al projecte CMIP5. Concretament, s'ha disposat de les sèries de temperatures (mínima, màxima i mitjana), radiació i precipitació per l'escenari RCP4.5 de dos models regionals (RCA4 i CCLM4-8-17) a partir d'un sol model climàtic global.

Amb aquesta informació, s'ha aplicat el model estadístic de la idoneïtat bioclimàtica per generar el Model de Distribució d'Espècies cap al futur. D'aquesta manera, s'han obtingut mapes anuals d'idoneïtat, que s'han promitjat per al període 2031-50 per a comparar-los amb el període de referència (vegeu Idoneïtat bioclimàtica segons el Model de Distribució d'Espècies al 1r Informe).

CANVIS EN LA IDONEÏTAT BIOCLIMÀTICA DE LES ESPÈCIES

Idoneïtat actual i futura (2031-2050) per les espècies principals a les Gavarres

A la figura 22 s'hi mostren les idoneïtats bioclimàtiques actuals segons l'aproximació *Idoneïtat bioclimàtica segons el Model de Distribució d'Espècies (CTFC-CREAF)* compresa al 1r Informe, basada en les dades històriques del període 1990-2000. A partir de l'algoritme d'idoneïtat incorporat en aquesta anàlisi s'han aplicat les projeccions climàtiques futures per l'escenari RCP4.5 i els dos models climàtics esmentats.

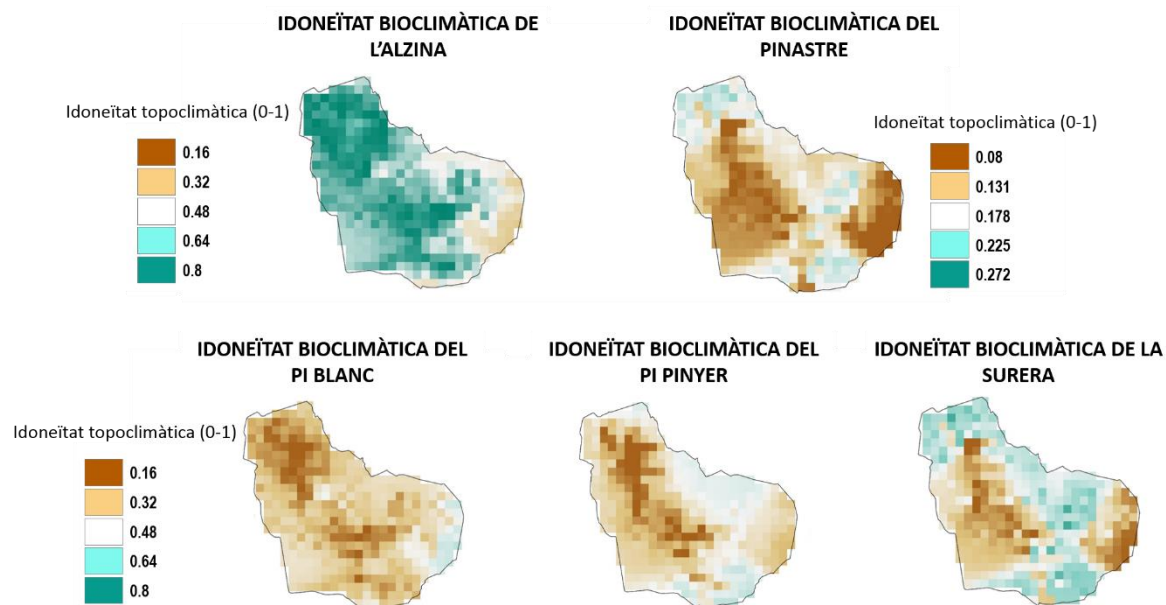


Figura 22: Idoneïtat bioclimàtica actual pel massís de les Gavarres de les espècies: alzina (*Quercus ilex*), pinastre (*Pinus pinaster*), pi blanc (*Pinus halepensis*), pi pinyer (*Pinus pinea*) i surera (*Quercus suber*). Els valors de la llegenda van de [0, 1], sent 0 la idoneïtat més baixa i 1 la idoneïtat màxima per totes les espècies excepte pel pinastre. Per aquesta espècie s'ha estirat la llegenda entre 0 i 0.2 per poder apreciar el patró espacial, ja que els idoneïtats són molt més baixes que en els altres casos.

La figura 23 mostra les idoneïtats futures (promig de les idoneïtats per al període 2031-50) amb la mateixa llegenda que els mapes d'idoneïtat actual, cosa que els fa directament comparables a l'anàlisi de la idoneïtat actual. En general, s'observa una davallada generalitzada de les idoneïtats i les situa a la banda baixa per a totes les espècies, excepte per l'alzina, que manté les idoneïtats mitjana-altes per la part central del massís. Tanmateix, la disminució generalitzada de les idoneïtats fa que la llegenda d'aquests mapes no ens faci apreciar la distribució espacial d'aquests canvis al llarg i ample del massís.

La figura 24 adapta les llegendes per a cada espècie, de manera que es pot apreciar aquest matís espacial.

La figura 25 mostra, a través de diagrames de caps, les diferències d'idoneïtat entre el període actual i els dos models de l'escenari futur. En tots els casos, s'hi aprecia la disminució de la idoneïtat futura i en la majoria dels casos, excepte per l'alzina, la distància entre el valor màxim i mínim s'estreny, de manera que podem apuntar que les condicions futures emprades tendeixen a homogeneïtzar a la baixa les idoneïtats de bona part de les espècies d'interès.

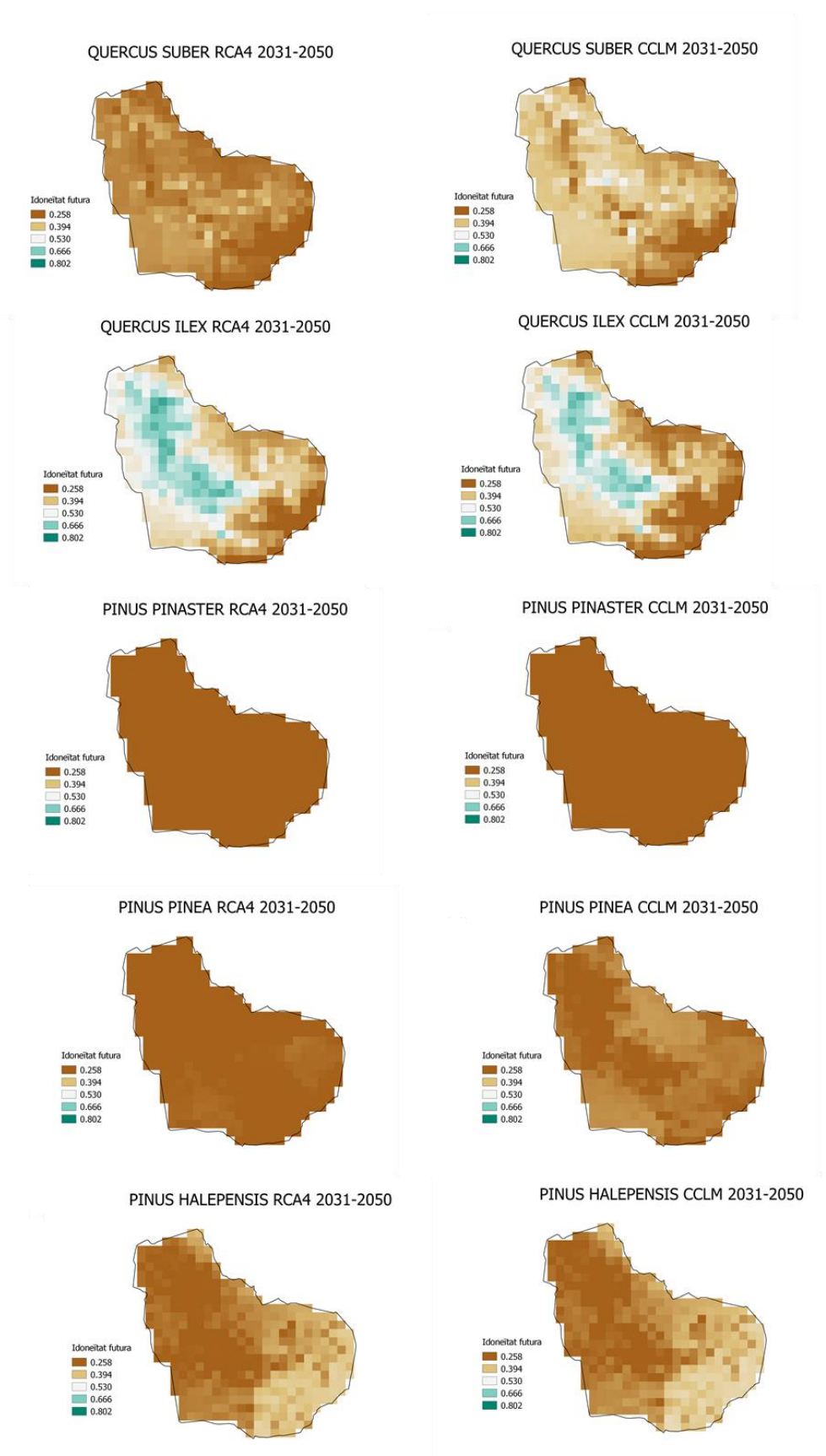


Figura 23. Idoneïtat bioclimàtica per al període 2031-50 per les espècies seleccionades per a l'escenari RCP4.5 i els dos models analitzats (RCA4 i CCLM).

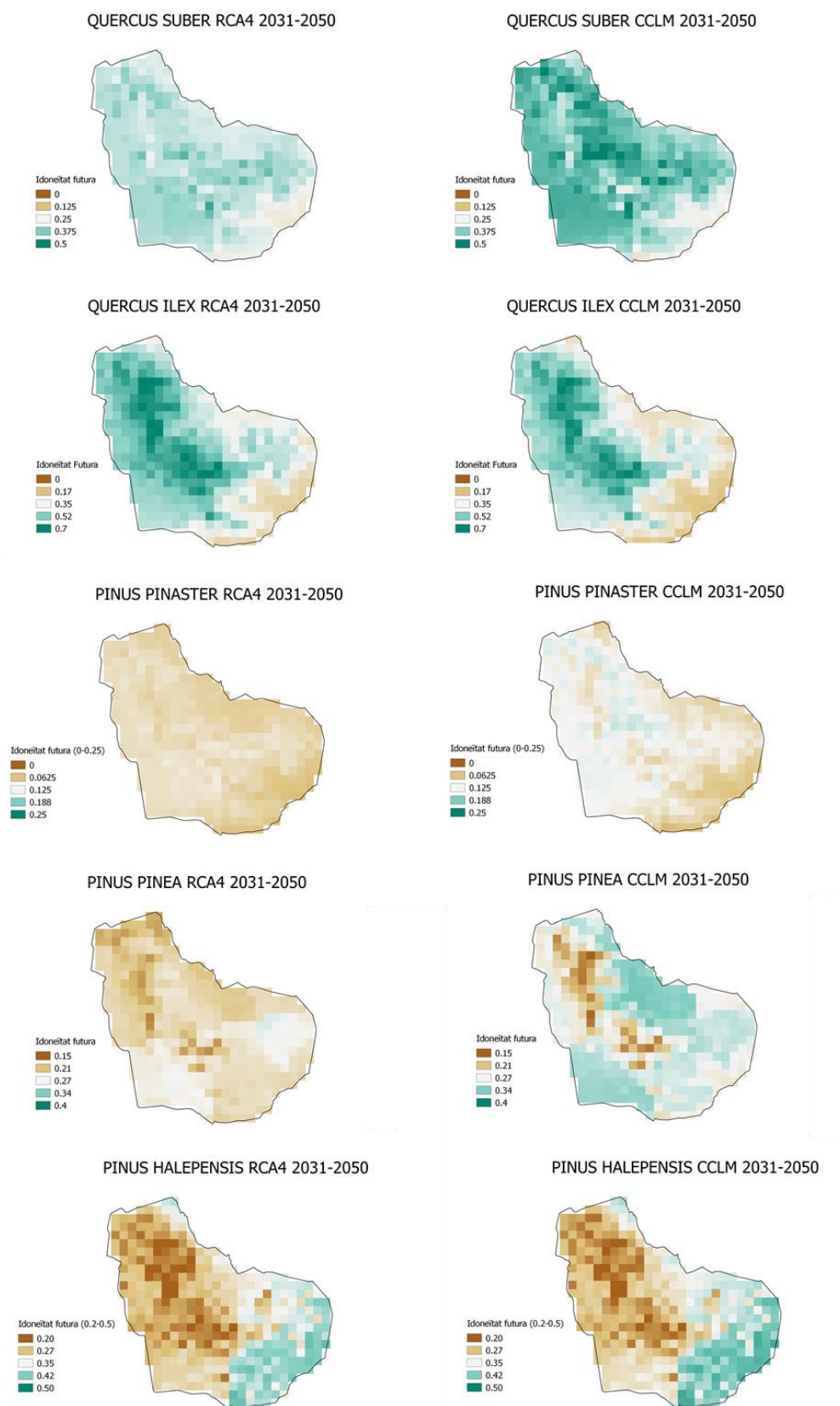


Figura 24. Idoneïtat bioclimàtica per al període 2031-50 per les espècies seleccionades per a l'escenari RCP4.5 i els dos models analitzats (RCA4 i CCLM). La llegenda d'aquests mapes permet l'anàlisi de la distribució espacial de la idoneïtat en el massís de les Gavarres i la comparació entre els dos models (CCLM i RCA4). Noteu, no obstant, que s'ha ajustat la llegenda per cada espècie per tal de fer més visibles els patrons espacials; per tant les llegendes no són comparables entre espècies.

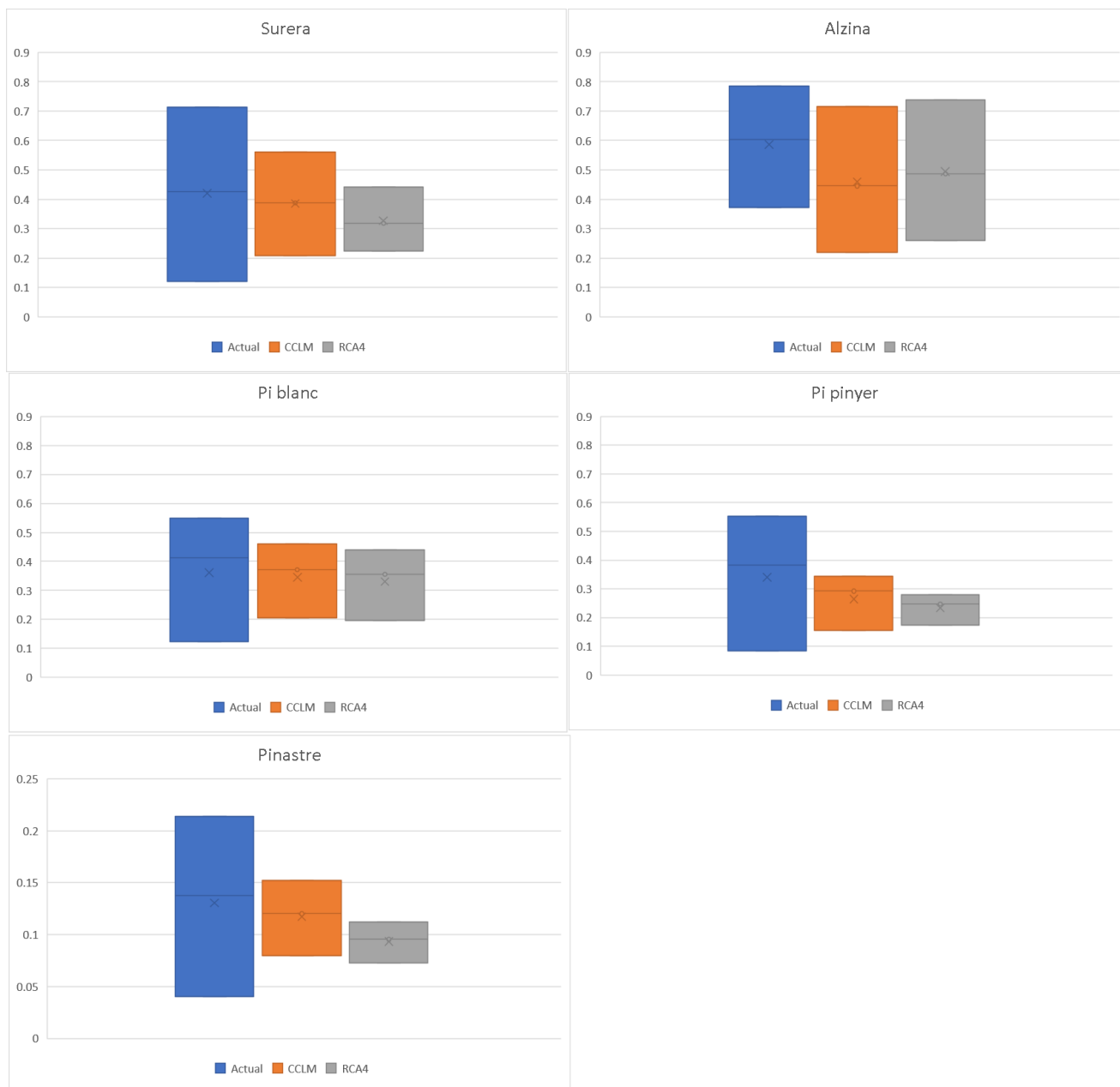


Figura 25. Idoneïtat bioclimàtica per al període actual i per al període 2031-50 per les espècies seleccionades per a l'escenari RCP4.5 i els dos models analitzats (RCA4 i CCLM). La llargada de les capsas expressa la distància entre el valor màxim i mínim obtingut per a cada període allà on l'espècie és dominant segons el MCSC. La ratlla que creua la capsa indica la mitjana i la creu, la mediana. Cal parar atenció que el pinastre presenta un rang de valors més baix que la resta.

Atenent a la figura 24, tot i la disminució generalitzada de la idoneïtat de les espècies presents al massís degut al canvi en les condicions ambientals en els dos models avaluats, s'aprecia com l'alzina presenta els valors més elevats d'idoneïtat al massís especialment a la zona central i nordoccidental, tot i que s'accentua una pèrdua rellevant d'idoneïtat per aquesta espècie en la zona oriental i sud. El pinastre accentua els valors molt baixos a tota la superfície de les Gavarres.

Pel que fa la resta de les espècies, la nova idoneïtat de la surera es mostra intermitja (més alta en el model CCLM), més elevada respecte a altres espècies i d'una distribució força més homogènia en bona part del massís, a excepció del vessant més sudoriental. Quant al pi pinyer, aquesta espècie mostra una resposta diferenciada en funció del model climàtic, amb unes disminucions de precipitació més moderades pel model CCLM. La idoneïtat és, en general, més baixa però es manté en valors intermitjos per aquest model, llevat de la zona central del massís. I finalment, el pi blanc manté valors d'idoneïtat baixos especialment a tota la meitat oest de les Gavarres i valors mitjans a les parts baixes de la zona oriental del massís.

Tots aquests mapes els trobareu disponibles a l'Annex 4 de l'apartat de cartografia inclosa als annexos.

FUNCIONAMENT DELS BOSCOS

S'ha dut a terme un exercici de simulació de la dinàmica dels boscos de les Gavarres utilitzant el model funcional de creixement forestal GOTILWA+ (acrònim de *Growth of Trees is Limited by Water* (www.creaf.uab.cat/gotilwa+)). GOTILWA+ va ser desenvolupat, inicialment, per a boscos mediterranis però ha esdevingut una eina generalista que ha estat aplicada amb èxit a comunitats forestals mediterrànies, temperades centreeuropees i boreals. GOTILWA+ simula el creixement del bosc, considerant la dinàmica de l'aigua en el sistema com a factor determinant i principal en el funcionament de les comunitats forestals. L'aigua és, per a bona part dels ecosistemes mediterranis, el principal factor limitant per al creixement de la vegetació (Piñol et al. 1991, Rambal 1993, Rodà et al. 1999). GOTILWA+ descriu el processos de producció, assignació del carboni i respiració i explora com aquests processos són condicionats pel clima, l'estructura del bosc i del rodal, els diferents règims de gestió forestal, les propietats del sòl i el canvi climàtic (figura 26). Així, el model esdevé molt útil com a eina per a l'avaluació de les respostes de diferents variables forestals (producció, flux i emmagatzematge de carboni) als paràmetres d'entrada del model.

A GOTILWA+ els processos simulats es donen a nivell d'individu. La distribució en classes diamètriques i la densitat poblacional (individus ha^{-1}) són emprades en la definició de l'estructura poblacional. Els boscos són monoespecífics i no s'hi contempla la interacció de diferents espècies vegetals creixent alhora. Els arbres que formen part d'una mateixa classe diamètrica se'ls suposa idèntics i, per tant, no es recull la distribució espacial dels individus. El model no simula boscos mixtos i, per tant, s'assumeix una formació monoespecífica.

En una simulació estàndard, les dades climàtiques són analitzades diàriament. A partir de la interacció entre la precipitació diària i l'estructura de capçades, el model calcula la intercepció, el trascol i l'escolament cortical. La precipitació efectiva (la diferència entre la precipitació incident i la intercepció) fa augmentar l'aigua disponible en el sòl la qual s'utilitza pels arbres. La proporció d'albeca i duramen, l'àrea foliar de cada arbre i, consegüentment, l'Índex d'Àrea Foliar (LAI) del bosc són altament dependents en el model, encara que no exclusivament, de la disponibilitat d'aigua.

L'evapotranspiració és funció de la disponibilitat d'aigua i la temperatura. La disponibilitat d'aigua és un factor limitant del creixement i la producció. A mesura que el sòl s'asseca hi ha una reducció de l'aigua absorbida pels arbres: la conductància estomàtica disminueix i hi ha un decreixement en la fotosíntesi i en la transpiració.

La fixació de carboni per part dels arbres es calcula a partir del model de fotosíntesi de Farquhar (Farquhar i von Caemmerer 1982). El conjunt de carboni fixat (Producció Primària Bruta, GPP) permet un increment, primerament, de les reserves de carboni mòbil de la planta. Una fracció d'aquest carboni compensa la respiració de manteniment, mentre que la resta, si és el cas, constitueix la fracció de la producció assignada al creixement.

Amb la formació de nova biomassa hi ha associat un cost metabòlic: la respiració de creixement. L'assignació de la producció neta a GOTILWA+ es troba regulada per la teoria del pipe model (Shinozaki 1972), que estableix una relació constant entre l'àrea foliar i l'àrea de secció conductora d'albeca. El balanç entre la producció primària assignada al creixement, la respiració de manteniment i la respiració de creixement dóna lloc a la producció primària neta (NPP) que determina, al seu torn, els processos de formació i abscisió de fulles, la formació d'anells de creixement, la taxa de pas d'albeca a duramen i, en conseqüència, els canvis funcionals i estructurals dins de cada classe diamètrica. Aquests canvis afecten, alhora, els fluxos hidrològics que es donaran i que afecten, novament, tots els processos abans descrits (Figura 27).

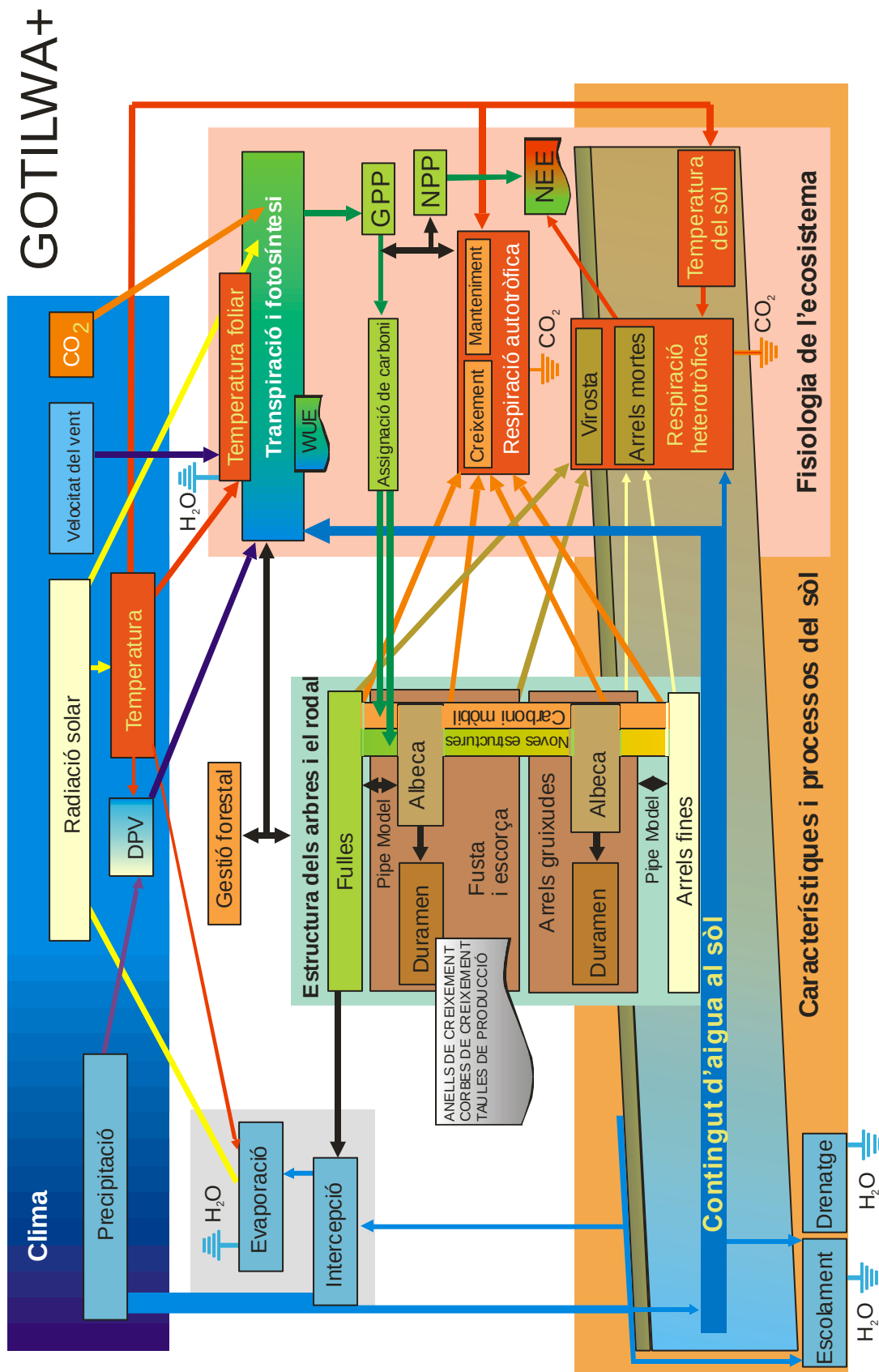


Figura 27. Esquema general del model forestal GOTILWA+. S'hi mostren els processos principals i les seves interrelacions

Dades d'entrada pel cas de les Gavarres

El model GOTILWA+ requereix d'un seguit de paràmetres d'entrada bàsics de diferent naturalesa: aquells que fan referència a l'estructura i ecofisiologia de la vegetació, aquells descriptors de les condicions ambientals (dades climatològiques i topogràfiques) i, finalment, aquells relacionats amb els fluxos d'aigua i carboni al sòl. Optativament, el model pot incorporar informació relativa a diferents règims de gestió silvícola que, en aquest exercici no s'han considerat i, per tant, les simulacions reproduïxen la dinàmica natural del bosc i els episodis de mortalitat difusa i episòdica associada (**autoaclarida**) i a esdeveniments extrems.

Les dades de l'estructura inicial del bosc provenen de les dades d'inventaris forestals, idealment d'una parcel·la mostrejada. En el cas de les Gavarres, i per cada espècie d'interès, s'han utilitzat les **dades promig de la distribució per classes diamètriques** a partir de totes les estacions de l'IFN3 de les Gavarres on aquesta espècie és dominant. Així, les distribucions inicials per a aquest exercici corresponen a les dades de l'IFN3 compreses a l'apartat *Anant a fons en cada tipologia de bosc* del primer informe.

Els paràmetres funcionals (relacionats amb les respostes ecofisiològiques de la coberta) inclouen informació referent a la fotosíntesi i a la conductància estomàtica. Per a cada espècie aquests paràmetres són derivats, indistintament, de la bibliografia o de mesures de camp. En aquest exercici, han estat incorporats els paràmetres associats a cada espècie que proporciona per defecte el propi model. La major part dels valors dels paràmetres funcionals i ecofisiològics s'han obtingut o derivat de treballs previs on s'han simulat els tipus funcionals de referència. Podeu consultar aquests valors de referència per aquestes i altres espècies, així com el seu significat biològic, a www.creaf.uab.cat/gotilwa+

La informació referent al sòl comprèn els paràmetres relacionats amb les funcions que descriuen els fluxos hidrològics i els fluxos de carboni. El sòl es divideix en el model en dos estrats: la capa orgànica i la mineral amb una taxa de transferència entre ambdues. Hidrològicament, però, el sòl representa un compartiment únic amb unes propietats homogènies que determinen l'aigua emmagatzemada en el sòl (Taula 6). En aquest exercici s'han considerat 3 tipus de sòl, atenent a la fondària:

- **Sòl G** (gruixut): 80 cm de fondària i 20% de pedregositat
- **Sòl M** (mig): 40 cm de fondària i 20% de pedregositat
- **Sòl P** (prim): 25 cm de fondària i 20% de pedregositat

Taula 6. Components de la conductivitat hidràulica del sòl i de la dinàmica del carboni al sòl.

Paràmetre	Símbol	Unitats
FLUXOS DE CARBONI AL SÒL		
C orgànic al sòl en horitzons orgànics		g cm ⁻²
C orgànic al sòl en horitzons minerals		% de pes sec
Densitat aparent		g cm ⁻³
Taxa de descomposició de MO als horitzons orgànics	k(LF)	dia ⁻¹
Taxa de descomposició de MO als horitzons minerals	k(AB)	dia ⁻¹
Factor de l'efecte de la temperatura del sòl	Q10	-
Taxa de transferència dels horitz. orgànics als minerals	t o⇒m	dia ⁻¹
Descriptors de l'efecte de l'aigua al sòl sobre la descomposició de la MO	W min	mm
	W max	mm
CONDUCTIVITAT HIDRÀULICA DEL SÒL		

Gradient hidràulic	wg	m/m
Conductivitat hidràulica del sòl	wc	m dia ⁻¹
Fondària mitjana del sòl	sd	m
Aigua mínima utilitzable	uwmin	mm m ⁻¹
Volum de pedres	sv	%
Taxa de drenatge	dr	dia ⁻¹

En aquest exercici, com ja s'ha descrit en l'apartat de dades climàtiques disponibles, només s'ha utilitzat una única sèrie climàtica per a totes les simulacions generada en el marc del projecte LIFE MEDACC sota l'escenari RCP4.5. Les dades climàtiques comprenen els valors diaris de temperatures màximes i mínimes de l'aire (°C), precipitació (mm dia⁻¹), radiació solar (MJ dia⁻¹), velocitat mitjana del vent (m s⁻¹) i el dèficit de pressió de vapor mesurat a l'alba (kPa). Aquestes dues darreres variables el model és capaç de calcular-les si no estan disponibles o bé són incompletes. El model també incorpora dades anuals referents a la concentració de CO₂ atmosfèric.

Taula 7. Variables climàtiques

Variables	Símbol	Unitats
Radiació solar	Q	MJ m ⁻² dia ⁻¹
Temperatura màxima diària	Max T	°C
Temperatura mínima diària	Min T	°C
Precipitació	P	mm dia ⁻¹
Velocitat mitjana del vent	WS	m s ⁻¹
Concentració atmosfèrica de CO ₂	CO ₂	ppm
Dèficit de pressió de vapor a l'alba	VPD	kPa

Variables de sortida

Les sortides del model estan directament relacionades amb la seva aplicació. El model permet mostrar els resultats a diferents escales temporals: diària, mensual i anual. Especialment rellevants són les variables descriptives de l'evolució de l'estructura de la vegetació al llarg dels anys simulats. Les variables analitzades en aquest exercici han estat l'índex d'àrea foliar, l'evapotranspiració real, la producció primària neta, l'intercanvi net de carboni de l'ecosistema, la producció de fusta, l'aigua al sòl i el volum de fusta morta.

Variables com la producció primària neta o la producció de fusta són bons indicadors de la dinàmica de creixement i vigor del bosc. Valors negatius de l'intercanvi net de carboni de l'ecosistema indiquen captació neta de CO₂ i valors positius indiquen emissió. La tendència ve determinada pels canvis en les taxes de fixació de carboni (molt relacionades amb la disponibilitat d'aigua) i el canvi en les taxes de respiració (derivades dels canvis de la temperatura).

El volum de fusta morta mostra els episodis de mortalitat/decaïment associats a les condicions climàtiques, per exemple episodis de sequera intensa, que comporten un col·lapse parcial de del bosc amb mortalitat associada corresponent

Resultats de les simulacions sota l'escenari RCP4.5

Si analitzem el comportament de les espècies en aquest exercici de simulació (figures 28-32), podem apreciar alguns patrons comuns sota els efectes. En primer lloc, cal precisar que els canvis previstos sota l'escenari RCP4.5 i generats per l'àmbit de les Gavarres, sense distinció espacial dels diferents àmbits del massís, no semblen molt extrems fins el 2050 per a la presència mateixa del bosc. Els boscos, tot i la seva resposta diferencial, no mostren en cap cas un col·lapse total i els canvis graduals

en la temperatura i reducció progressiva de la precipitació no comprometen la presència de les espècies analitzades en aquest escenari temporal partint de la seva distribució promig al massís. En segon lloc, cal destacar que aquest exercici no incorpora la gestió del bosc i, per tant, reproduceix un possible escenari d'abandonament de l'aprofitament actiu del bosc en el qual apareixen episodis de mortalitat natural. L'objectiu de l'exercici és avaluar tendències d'aquestes variables i poder generar hipòtesis de treball. Per últim, l'exercici de simular tres gruixos de sòl, tot i que en aquestes condicions ambientals no sembla que es tradueixi en efectes molt rellevants en totes les variables, sí que evidencia diferents respostes a nivell d'espècie i a nivell temporal que s'analitzaran més endavant en detall. Per regla general, els boscos que creixen en sòls més gruixuts són, alhora, els més vulnerables a viure episodis de mortalitat parcial d'individus. Corrobora una tendència ja observada experimentalment en aquest tipus d'anàlisis: unes condicions més favorables per al creixement poden predisposar a una major sensibilitat a patir decaïments futurs més intensos que no pas aquells boscos que viuen en condicions menys favorables que, en general, no els permet créixer tant i estan menys exposats a episodis de decaïment més extrems. Per exemple, el contingut d'aigua del sòl és menor però no fluctua tant proporcionalment com en els sòls més gruixuts.

En general, els boscos perden vigor en el seu creixement i, en la majoria de casos, la situació s'agreuja a la segona part de la simulació (2025-2050). Variables com la producció primària neta o la producció de fusta en són bons indicadors, ja que mostren una major variabilitat en aquest període, amb comportaments més extrems, tot i la tendència generalitzada a la disminució. En general, la capacitat de segrestament de carboni dels boscos mostra més freqüència de pols positius de manera que, en aquests episodis, boscos que fins aleshores s'han mostrat captadors podrien tenir un comportament transitori d'emissors en major freqüència. Aquest canvi de tendència ve determinat per la reducció puntual de les taxes de fixació de carboni (en haver-hi menys aigua disponible) i un augment de les taxes de respiració (derivades de l'augment de la temperatura) el que ha de tenir com a conseqüència una reducció de l'efecte d'embornal dels boscos.

Pel que fa a l'aigua al sòl mostra una elevada variabilitat i una certa davallada durant el període simulat. En ser una variable integrativa dels processos hidrològics del sòl, el seu comportament està estretament lligat als episodis de mortalitat, de caiguda de fulles, aturada del creixement o augment de la respiració. L'evapotranspiració real mostra, en general, una elevada variabilitat i això no permet discernir una tendència clara. És una variable força integradora dels processos que s'estan donant al bosc molt lligats a la disponibilitat d'aigua, sensible als episodis de major aridesa però també a la possible reducció de l'activitat fotosintètica.

La mortalitat, que apareix clarament en totes les simulacions plantejades (tot i que amb un comportament i magnitud diferencial per part de les espècies molt clar) és un clar indicador de la vulnerabilitat dels boscos i suggereix, en aquest cas, una correspondència més clara amb les tendències recollides per les simulacions en la idoneïtat.

Pel que fa a la resposta de les espècies, la sureda és una de les que es mostra més robusta davant dels canvis simulats. La majoria de variables estructurals mantenen la seva tendència, tot i que a nivell de creixement, hi ha una tendència clara a una menor capacitat productiva i a l'augment de freqüència d'episodis d'emissió a la segona meitat de la simulació. Pel que fa a la mortalitat, apareix concentrada a la segona meitat de la simulació i amb el sòl prim sembla que aparegui primer i es mantingui de forma sostinguda la resta de la simulació. En sòls mitjans i gruixuts es dispara més tard. Tanmateix, cal destacar que estem parlant de valors molt baixos de mortalitat en tots els casos, que no són comparables en ordre de magnitud amb la resta d'espècies simulades. Aquest fet reforça l'afirmació relacionada amb la robustesa de la sureda en aquest nou context climàtic, malgrat que ecofisiològicament pugui entrar en un estadi de menor vigor.

L'alzinar, d'altra banda, mostra una major variabilitat en les variables estructurals i també funcionals. Aquest fet suggereix una major sensibilitat de l'espècie als mateixos canvis climàtics experimentats per la resta d'espècies que, d'alguna manera, es veuen amplificats. L'àrea foliar es mostra molt sensible a aquests canvis i això determina el comportament general de la resta de variables analitzades. La mortalitat es concentra en dos episodis principalment, però d'un ordre de magnitud si el comparem amb la sureda, però molt més baixa que en el cas dels pins.

El cas del pinastre, potser el més rellevant a destacar de la simulació plantejada és la mortalitat associada, amb pics de volum de fusta morta que poden ser fins a 4 o 5 vegades més grans que els recollits a l'alzinar i el doble dels recollits a la resta de pinedes. La resta de variables responen a aquest fet en el sentit que, després d'una autoaclarida important, si les condicions tornen a ser bones això permet tornar a créixer i, en aquest sentit, hi ha una major variabilitat en el comportament de les variables ecofisiològiques.

La resta de pins mostren un comportament similar. Potser cal destacar que el pi pinyer només mostra un episodi de mortalitat al llarg de la simulació i que l'estructura inicial del bosc (vegeu l'àrea foliar) encara el permet de créixer en aquestes variables estructurals. La segona meitat de la simulació el creixement es torna molt més variable. El pi blanc mostra unes tendències similars, tot i que amb una mortalitat més elevada i repartida al llarg de la simulació, especialment destacable en els sòls primers de l'inici de la simulació i els sòls més gruixuts al final.

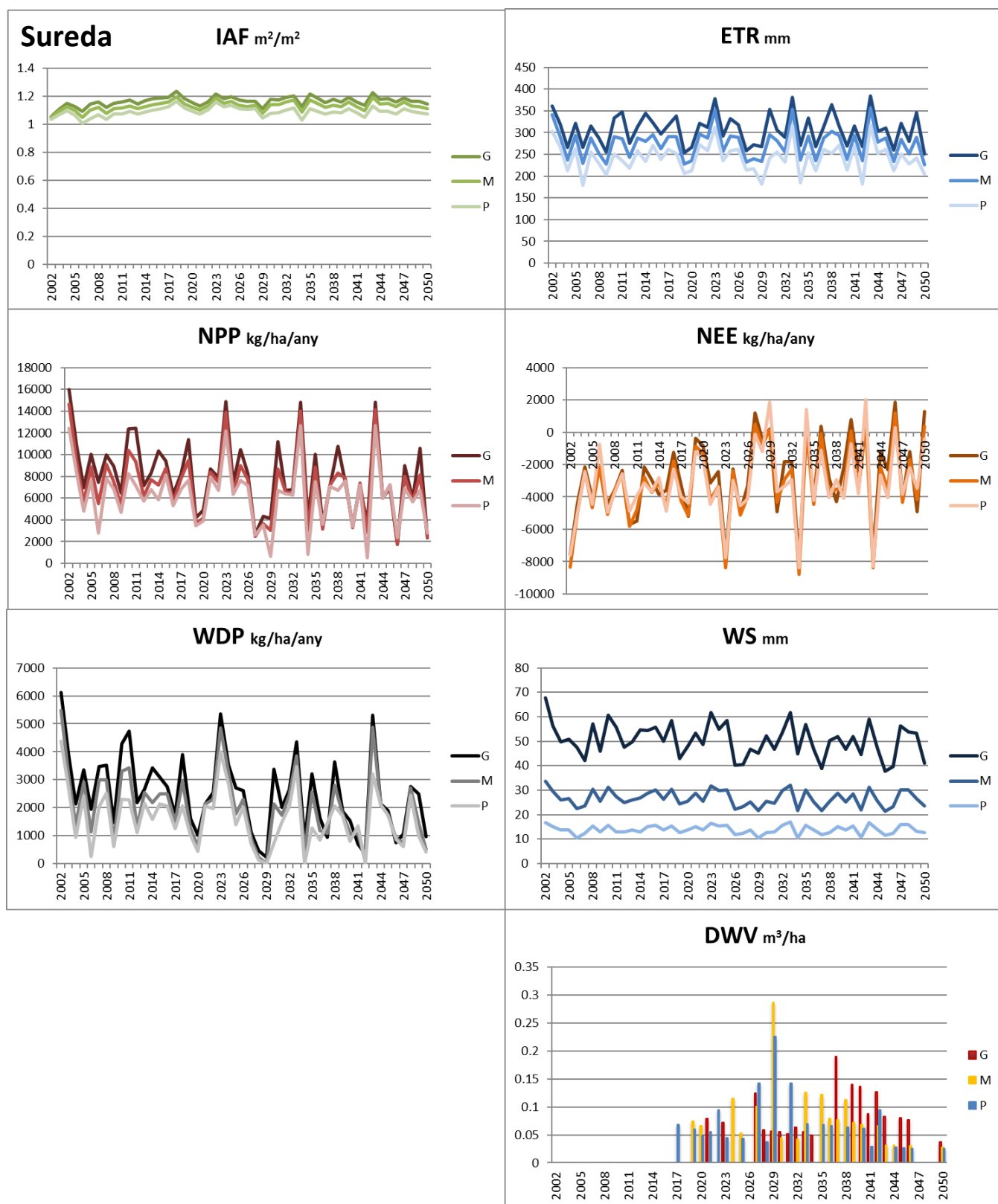


Figura 28. Resultats per a la **sureda** per al període 2002-2050 i per a les següents variables: Índex d'Àrea Foliar (IAF), Evapotranspiració real (ETR), Producció Primària Neta (NPP), Intercanvi Net de Carboni de l'Ecosistema (NEE), Producció de Fusta (WDP), Aigua al Sòl (WS) i Volum de Fusta Morta (DWV). S'hi mostren els resultats pels tres gruixos de sòl (G, M i P)

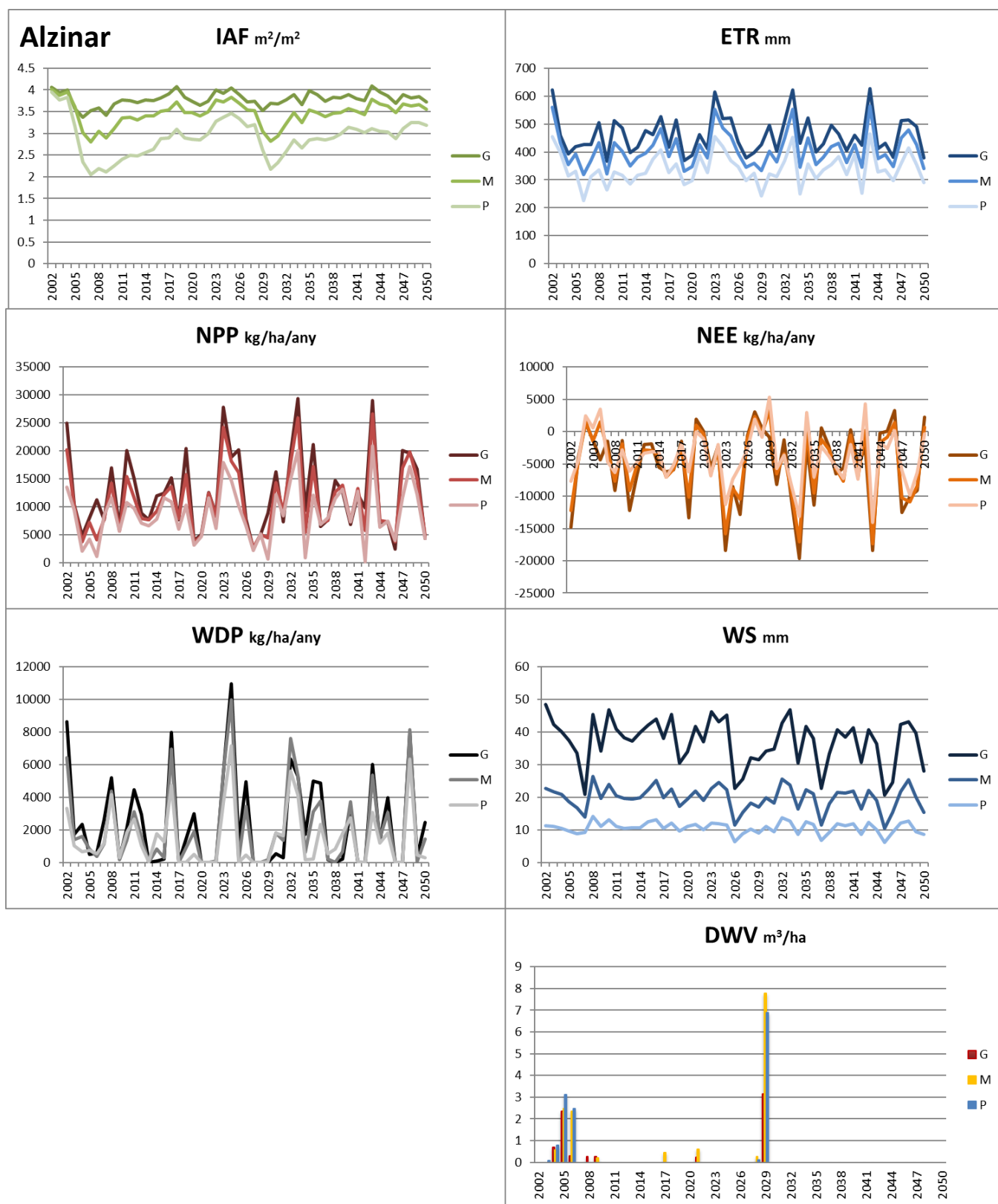


Figura 29. Resultats per a l'alzinar per al període 2002-2050 i per a les següents variables: Índex d'Àrea Foliar (IAF), Evapotranspiració real (ETR), Producció Primària Neta (NPP), Intercanvi Net de Carboni de l'Ecosistema (NEE), Producció de Fusta (WDP), Aigua al Sòl (WS) i Volum de Fusta Morta (DWV). S'hi mostren els resultats pels tres gruixos de sòl (G, M i P)

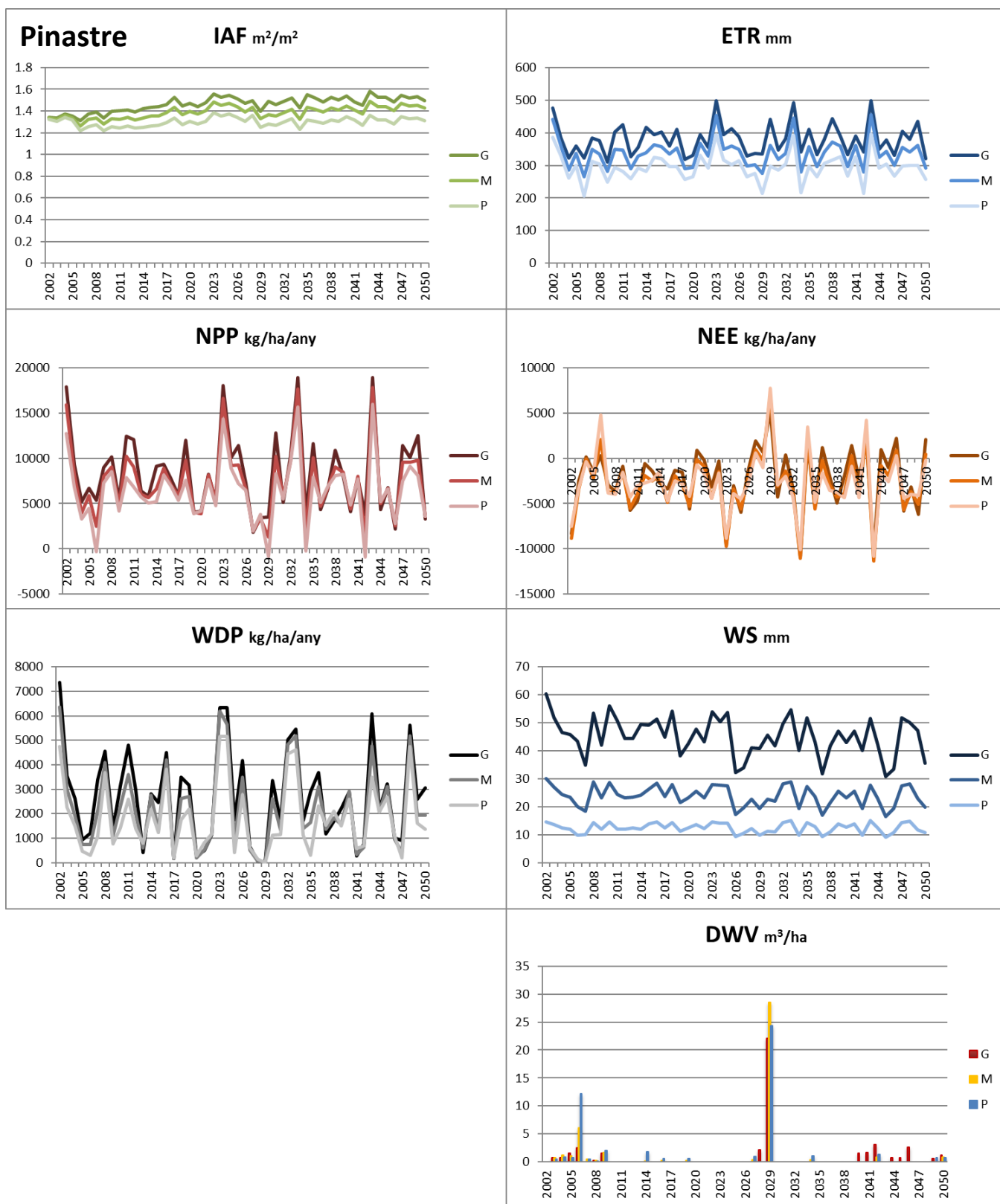


Figura 30. Resultats per les **pinedes de pinastre** per al període 2002-2050 i per a les següents variables: Índex d'Àrea Foliar (IAF), Evapotranspiració real (ETR), Producció Primària Neta (NPP), Intercanvi Net de Carboni de l'Ecosistema (NEE), Producció de Fusta (WDP), Aigua al Sòl (WS) i Volum de Fusta Morta (DWV). S'hi mostren els resultats pels tres gruixos de sòl (G, M i P)

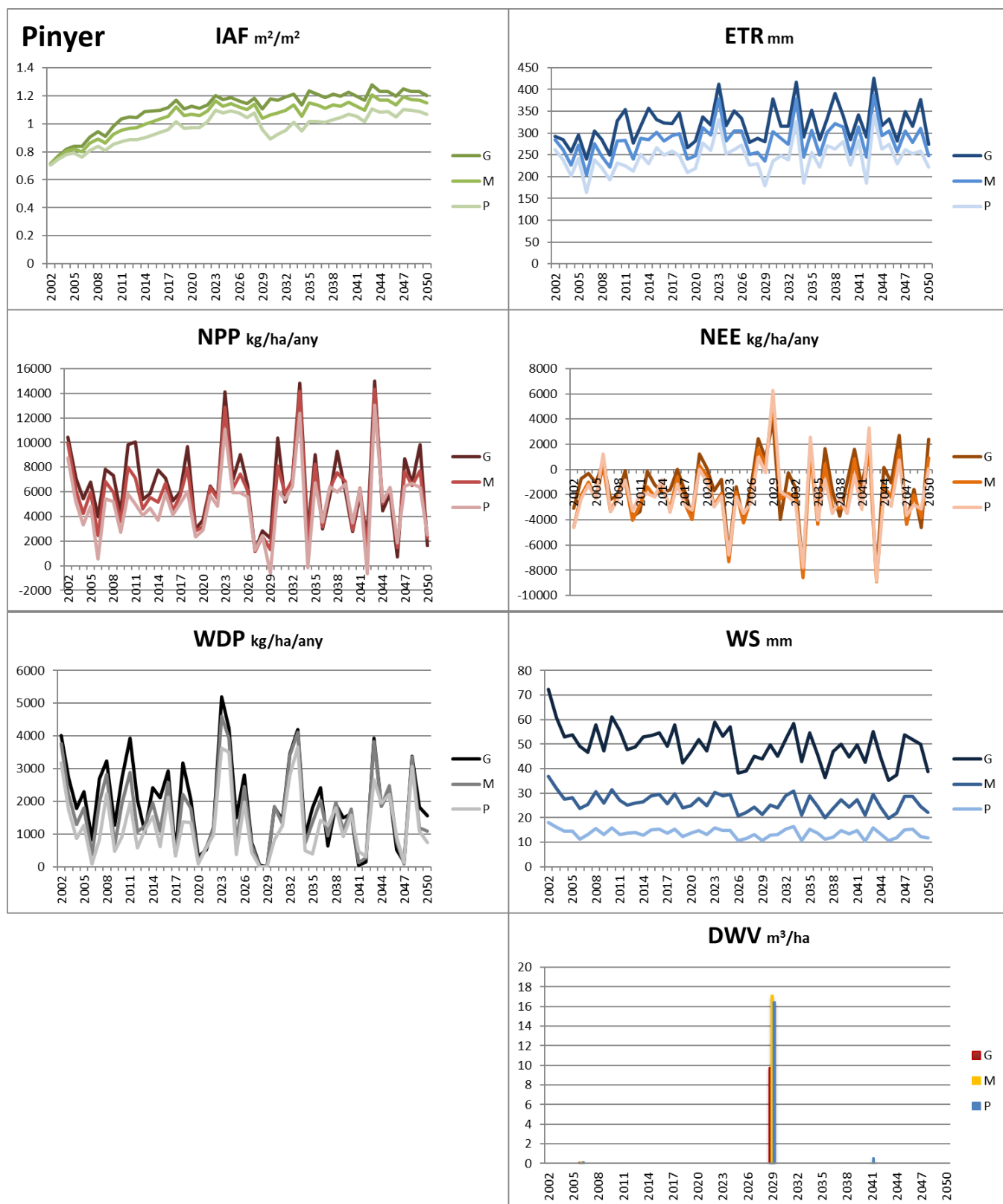


Figura 31. Resultats per a les **pinedes de pi pinyer** per al període 2002-2050 i per a les següents variables: Índex d'Àrea Foliar (IAF), Evapotranspiració real (ETR), Producció Primària Neta (NPP), Intercanvi Net de Carboni de l'Ecosistema (NEE), Producció de Fusta (WDP), Aigua al Sòl (WS) i Volum de Fusta Morta (DWV). S'hi mostren els resultats pels tres gruixos de sòl (G, M i P)

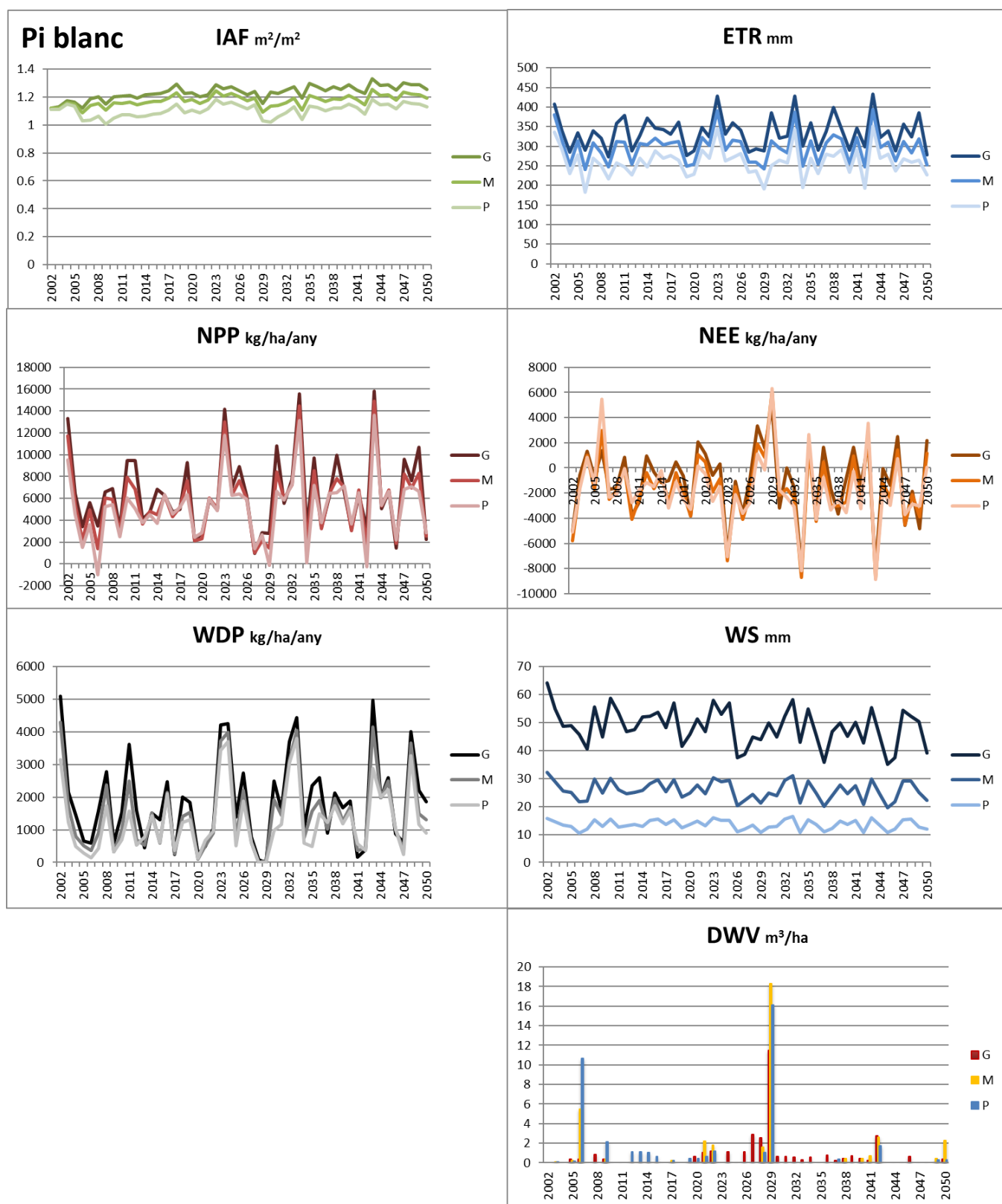


Figura 32. Resultats per a les **pinedes de pi blanc** per al període 2002-2050 i per a les següents variables: Índex d'Àrea Foliar (IAF), Evapotranspiració real (ETR), Producció Primària Neta (NPP), Intercanvi Net de Carboni de l'Ecosistema (NEE), Producció de Fusta (WDP), Aigua al Sòl (WS) i Volum de Fusta Morta (DWV). S'hi mostren els resultats pels tres gruixos de sòl (G, M i P)

CONCLUSIONS DE LA SEGONA PART

Aquesta segona part de l'estudi ha incorporat un seguit d'exercicis de simulació a partir de diverses fonts de projeccions climàtiques disponibles per les Gavarres que coincideixen en descriure un escenari lleu de canvi climàtic (RCP4.5). D'una banda, s'ha simulat la idoneïtat futura de les diferents espècies en aquestes noves condicions climàtiques i, d'altra banda, s'ha simulat com serà el funcionament d'aquests boscos a partir de determinades variables indicadores.

A partir d'aquests exercicis de simulació, tot i les limitacions i suposicions incorporades, podem concloure:

- Una disminució generalitzada d'idoneïtat de les espècies presents al massís amb les noves condicions climàtiques esperades al massís (escenari lleu de canvi), tot i que hi ha espècies que es mantenen en idoneïtats intermèdies. Un cas especial és el de l'alzina que mostra idoneïtats elevades a la part central, nord i occidental del massís. La surera manté una idoneïtat intermèdia a tot el massís i s'estén aquesta idoneïtat de forma més homogènia pel massís. El pi pinyer, segons el senyal de canvi previst, pot retenir idoneïtats intermèdies a bona part del massís, excepte zones elevades de la part central del massís. I finalment, el pi blanc té valors d'idoneïtat baixos a tota la meitat oest de les Gavarres i valors mitjans a la resta de la zona. El pinastre és l'espècie que mostra unes idoneïtats futures més baixes, partint d'unides idoneïtats actuals ja actualment molt baixes.
- En general, segons les simulacions de creixement forestal, els boscos perden vigor en el seu creixement i, en la majoria de casos, la situació s'agreuja a la segona part de la simulació (2025-2050). Variables com la producció primària neta o la producció de fusta mostren una major variabilitat en aquest segona part del període simulat, tot i la tendència generalitzada a la disminució. En general, la capacitat d'embornal de carboni podria disminuir i, puntualment revertir-se, de forma més freqüent atenent a determinats episodis climàtics més extrems.
- Els boscos que creixen en condicions més desfavorables (sòls prims), per un mateix episodi d'eixut, mostren una afectació menor als boscos que creixen en sòls més gruyxuts. El fet d'acumular menor biomassa i créixer més moderadament fa que els efectes dels episodis d'eixut en l'estructura del bosc, en alguns casos, no siguin tan severos.
- La sureda i l'alzinar es mostren, en general, menys vulnerables a l'escenari de canvi climàtic respecte a les pinedes. D'aquestes, les pinedes de pinastre mostren una major vulnerabilitat i les de pi pinyer es mostren més resistents (si avaluem la vulnerabilitat en funció de la mortalitat amb els valors de volum de fusta morta). Sorprenentment, les pinedes de pi blanc mostren episodis de mortalitat molt més freqüents que les de pi pinyer.
- La gestió forestal pot ajudar a anticipar molts d'aquests processos de decaïment que es donaran de forma natural al bosc i minimitzar-ne els riscos.

FONTS D'INFORMACIÓ COMPLEMENTÀRIA

Mapa Idoneïtat topoclimàtica d'espècies llenyoses de la Península Ibèrica.

<https://www.opengis.uab.cat/IdoneitatPI/index.html>

TICC (2016). Tercer Informe sobre Canvi Climàtic a Catalunya. Generalitat de Catalunya i Institut d'Estudis Catalans. <http://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Publicacions/tercer-informe-sobre-canvi-climatic-catalunya/TERCER INFORME CANVI CLIMATIC web.pdf>

MEDACC (2018). Deliverable 12. Les tendències històriques en el clima, la hidrologia i l'ús del sòl.

http://medacc-life.eu/sites/medacc-life.eu/files/docuemnts/deliverable_12_final_version.pdf

ANNEXOS

Els annexos d'aquest informe han estat incorporats a aquesta carpeta del núvol, tot i que aquesta carpeta inclou altra informació complementària.

Els annexos citats en el text els trobareu indexats com segueix:

- Annex 1, dins de la carpeta de Cartografia. Àmbit d'estudi d'aquest treball
- Annex 2, dins de la carpeta de Cartografia. Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (4a edició)
- Annex 3, dins de la carpeta Base de dades IFNs. Base de dades dels inventaris forestals
- Annex 4, dins de la carpeta de Base de dades climàtica MEDACC. Base de dades de les sèries diàries de precipitació i temperatura per les estacions properes a l'àmbit d'estudi.

[https://uab-](https://uab-my.sharepoint.com/:f/g/personal/2057930_uab_cat/Esg1Z_hoMq5AukE8iIV9mgIBXvOgLnRBDvZX2W3uWEO-A?e=qThFjs)

[my.sharepoint.com/:f/g/personal/2057930_uab_cat/Esg1Z_hoMq5AukE8iIV9mgIBXvOgLnRBDvZX2W3uWEO-A?e=qThFjs](https://uab-my.sharepoint.com/:f/g/personal/2057930_uab_cat/Esg1Z_hoMq5AukE8iIV9mgIBXvOgLnRBDvZX2W3uWEO-A?e=qThFjs)