

Estudi de l'efecte de l'extracció del
suro sobre l'estat hídric i fisiològic de
l'alzina surera (*Quercus suber*) a les
Gavarres (finca de Can Vilallonga)

***PREMI JOAN XIRGO XXXII EDICIÓ
2022***

Laura Llorens, Dolors Verdaguer i Josep Barba



AGRAÏMENTS

Agraïm al Consorci de les Gavarres el fet d'haver-nos ofert l'oportunitat de realitzar aquest estudi en concedir-nos el Premi Joan Xirgo (XXXII edició). En particular, voldríem agrair a en Quim Gubau i a l'Enric Bisbe el seu suport i ajuda a l'hora de realitzar l'estudi, així com a en Marc Coloreu la seva expertesa i dedicació en la pela dels suros. El nostre agraïment també als estudiants Emília Egüez, Roger Fíguls i Martí Fontrodona pel seu interès en el projecte, i per l'esforç i entusiasme mostrat en els mostrejos (malgrat ser ple estiu) i en el treball de laboratori. Finalment, el nostre agraïment a en Quim Paredes per haver captat amb la seva càmera tots els detalls de la nostra feina.

ÍNDEX

1. Introducció. Estat actual i perspectives de futur de les suredes catalanes en un context de canvi climàtic	3
2. Objectius	12
3. Procediments emprats per a dur a terme l'estudi	13
3.1. <u>Situació de la sureda, selecció de les alzines sureres i mostrejos</u>	
3.1.1. Situació de la sureda i selecció de les alzines sureres	13
3.1.2. Mostrejos per a l'estudi morfològic i fisiològic de les fulles	15
3.1.3. Mostrejos per a l'estudi de la respiració del tronc	16
3.2. <u>Mesura de la humitat, la temperatura i les característiques físico-químiques del sòl</u>	
3.2.1. Humitat i temperatura del sòl	16
3.2.2. Característiques físico-químiques del sòl	16
3.3. <u>Estudi de les característiques morfològiques de les fulles</u>	17
3.4. <u>Paràmetres mesurats per a determinar l'estat hídric de la planta</u>	
3.4.1. Potencial hídric	18
3.4.2. Contingut relatiu d'aigua	19
3.4.3. Conductància estomàtica	19
3.5. <u>Paràmetres relacionats amb la capacitat fotosintètica de la planta</u>	
3.5.1. Fluorescència de les clorofil·les	20
3.5.2. Contingut de clorofil·les i fenols de les fulles	22
3.6. <u>Mesures de la respiració dels troncs</u>	
3.6.1. Mesures amb l'analitzador de gasos	23
3.6.2. Càlcul dels fluxos de respiració del tronc	24
3.7. <u>Anàlisi estadístic de les dades</u>	24
4. Resultats obtinguts de l'anàlisi dels diferents paràmetres	
4.1. <u>El clima, el sòl i la vegetació de l'àrea d'estudi</u>	26
4.2. <u>Efecte de la pela, la data de mostreig i el tipus de fulla sobre la morfologia i la fisiologia foliar</u>	
4.2.1. Morfologia foliar	29

4.2.2. Estat hídric	31
4.2.3. Contingut de clorofil·les i flavonols de les fulles	34
4.2.4. Eficiència fotoquímica (fluorescència de les clorofil·les)	36
4.2.5. Respiració dels troncs	38
5. Discussió dels resultats	41
5.1. Efecte de la pela	41
5.2. Efecte dels canvis en les condicions ambientals al llarg de l'estudi	42
5.3. Efecte del diàmetre de l'arbre	44
5.4. Efecte de l'edat de la fulla	45
6. Conclusions	46
7. Referències	47

1. INTRODUCCIÓ. ESTAT ACTUAL I PERSPECTIVES DE FUTUR DE LES SUREDES CATALANES EN UN CONTEXT DE CANVI CLIMÀTIC

Els models climàtics preveuen que, a la regió Mediterrània, augmentaran les temperatures i les sequeres seran més freqüents i extremes (IPCC, 2021), factors que alhora poden contribuir a un augment en la freqüència i gravetat dels incendis forestals (Godinho i cols. 2016). Un dels sistemes forestals mediterranis que poden patir greument els efectes del canvi climàtic són les suredes. L'alzina surera (*Quercus suber* L.) és una espècie perenne endèmica de la conca del Mediterrani, sent els boscos d'alzines sureres considerats zones especials de conservació (Generalitat de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat). A nivell europeu, són hàbitats d'interès comunitari (hàbitat 9330, Directiva 92/43/CEE) i diversos boscos dominats per aquesta espècie es troben dins la xarxa d'espais protegits Natura 2000 (Comissió Europea 2015).

Les suredes ocupen, a la conca del Mediterrani, una superfície aproximada de 2,1 milions d'hectàrees (Leite i cols. 2020), trobant-se distribuïdes principalment en set països: Portugal, Espanya, França, Itàlia, Marroc, Algèria i Tunísia. Les suredes més extenses es troben a Portugal (0,74 milions d'ha) i a Espanya (0,6 milions d'ha), les quals representen més del 50% de la seva àrea de distribució mundial (Costa-e-Silva i cols. 2021). A Catalunya, s'estima que *Q. suber* és l'espècie dominant en unes 69.000 ha (segons el Mapa Forestal d'Espanya, DGDPRF, 2016), distribuïdes principalment per les comarques de l'Alt Empordà, el Baix Empordà, el Gironès, el Pla de l'Estany, la Selva, el Maresme i el Vallès Oriental. Des d'un punt de vista biogeogràfic, es poden distingir a Catalunya quatre grans àrees de distribució de la sureda amb característiques ecològiques diferenciades, les suredes de l'Alt Empordà, les de les Gavarres, les del Montseny-Guilleries i les del Montnegre-Corredor.

Les suredes es localitzen preferentment des de la línia de mar fins a 1000 m d'altitud, sobre sòls silícics i descalcificats, amb poc nitrogen i fòsfor, però rics en potassi, amb un pH pròxim a 5 (López-Tirado i Hidalgo 2016, Correia i cols. 2018). La distribució de l'alzina surera a Europa està parcialment restringida a les regions del sud a causa de la seva baixa tolerància a les gelades hivernals freqüents (Cavender-Bares i cols. 2005). Així, la distribució natural de les sureres es limita a zones amb temperatures mitjanes anuals superiors als 15 °C i una precipitació mitjana anual igual o superior a 600 mm, considerant-se 500 mm anuals (100 mm a l'estiu) el mínim per a que es puguin desenvolupar de manera equilibrada (Correia i cols. 2018). Tanmateix, es considera que l'alzina surera és una espècie resistent a la sequera ja que presenta adaptacions per a evitar-la, com ara un sistema d'arrels profundes (Oliveira i cols. 1992; Kurz-Besson i cols. 2006), una regulació estomàtica molt sensible (David i cols. 2004) i una escorça exterior gruixuda, el suro, que controla la pèrdua d'aigua directament des de la tija i les branques (Oliveira i Costa 2012). El suro també desenvolupa altres funcions, com ara protegir l'arbre enfront de les plagues i actuar com a aïllant tèrmic, impeding que les altes temperatures que es produeixen durant els incendis afectin els teixits vitals de l'arbre. L'escorça de

l'alzina surera és produïda pel fel·logen (o càmbium del suro), un meristema lateral secundari que manté la seva activitat durant tota la vida de l'arbre. Cada any, aquest fel·logen desenvolupa noves capes de teixit (peridermis) que, en acumular-se any rere any, formen el suro (Figura 1).

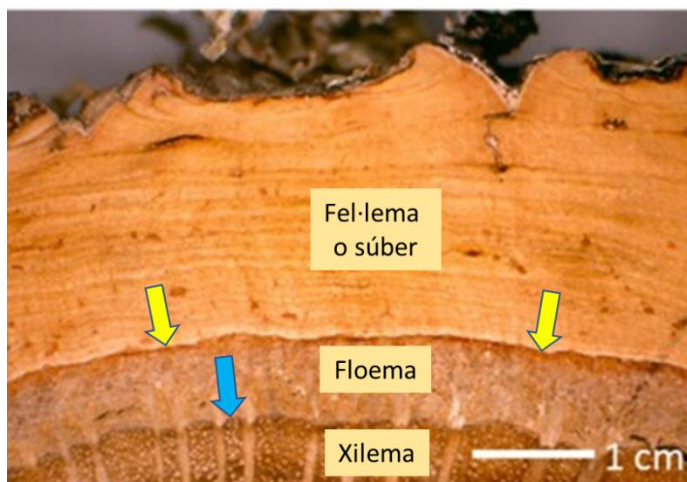


Figura 1: Teixit extern d'una secció transversal d'una tija d'alzina surera (*Quercus suber*) on es pot veure, de dalt a baix, el suro (o fel·lema), la zona on hi ha el fel·lògen (fletxes grogues), el floema i el xilema. Entre el floema i el xilema hi ha el càmbium (fletxa blava). Modificat de Graça (2015).

El suro és un producte forestal renovable d'alt valor, que propicia la sostenibilitat econòmica, social i ecològica dels boscos d'alzina surera (Bugalho i cols. 2011). S'utilitza per a elaborar productes molt diversos, des de segelladors fins a aglomerats, materials aïllants, paviments, panells per a la construcció i l'aeronàutica, absorbents de contaminants, roba, calçat i articles de decoració, essent, però, la fabricació de taps de suro per a la indústria del vi i del cava el producte de més valor afegit, corresponent al 70% dels ingressos generats per la indústria surera (Leite i cols. 2020). La producció de suro té una especial incidència econòmica a Portugal i a Espanya, països amb un 49.6% i un 30.5% de la producció mundial de suro, respectivament (Sierra-Pérez i cols. 2015). Hi ha, però, diferències importants entre les suredes de la part occidental de la Península i les suredes catalanes, tant en les característiques de la formació forestal com en les pràctiques de gestió habituals. Les suredes de la part occidental de la Península solen ser masses pures o barrejades amb altres quercínies (*Quercus ilex* i *Quercus faginea*), amb densitats baixes (normalment 50-150 arbres/ha durant el període productiu), amb estructura de devesa i amb una gestió silvícola combinada amb el pasturatge. En canvi, les suredes catalanes són suredes de muntanya, amb densitats generalment altes (entorn als 400 arbres/ha durant el període productiu), freqüentment barrejades amb coníferes i frondoses, especialment *Q. ilex*, *Q. faginea* i *Q. humilis*, i amb diversos estrats de vegetació (Dias i cols. 2014, Mundet i cols. 2018). El matollar típic de les suredes catalanes és abundant, de manera que, si no es gestiona, competeix amb les sureres per la llum, l'aigua i els nutrients (Mundet i cols. 2018). Totes aquestes diferències fan que, mentre que a les suredes de Portugal el suro s'extreu normalment cada 9-12 anys, a les suredes catalanes l'extracció del suro es fa generalment cada 12-14 anys, ja que el creixement del suro és més

lent. A més a més, el rendiment de la producció de suro de les suredes catalanes és inferior (entorn als 150 kg ha⁻¹ any⁻¹) al de les suredes portugueses (entorn als 200 kg ha⁻¹ any⁻¹; Dias i cols. 2014).

El suro se sol extreure per primera vegada quan l'arbre té un diàmetre normal de 20 cm (entre 20 i 35 anys), sent la vida útil de l'arbre entre 100 i 200 anys (Oliveira i Costa, 2012; Costa-e-Silva i cols. 2021). Després de l'extracció del suro, el fel·logen mor i se'n forma un de nou gairebé immediatament (25-35 dies, Oliveira i Costa 2012). De fet, s'ha observat que les taxes de creixement del suro s'incrementen en un 400% els dos primers anys després de la recol·lecció del suro en relació amb les taxes al final dels cicles de producció, mentre que les taxes de creixement de la fusta disminueixen en més d'un 50%, fins i tot amb una disponibilitat d'aigua favorable (Costa i cols. 2002, Knapic i cols. 2007; Leal i cols. 2008; Oliveira i Costa 2012). Després de 5-6 anys de l'extracció del suro, el creixement radial de la fusta torna a ser el factor més important que explica el canvi en el diàmetre del tronc (Costa i cols. 2015). L'edat del fel·logen (anys des de l'última pela) s'ha identificat com un factor rellevant en la recuperació i la resiliència de l'alzina surera després de la sequera, de manera que com més jove és el fel·logen (fins a 2 anys) més gran és l'efecte de la sequera sobre el creixement del suro (Leite i cols. 2019). De fet, la disponibilitat d'aigua s'ha identificat com el factor més restrictiu per al creixement del suro (Caritat i cols. 2000; Costa i cols. 2016; Oliveira i cols. 2016, Leite i cols. 2019).

Les sequeres i les onades de calor, a part d'augmentar l'estrès hídric de les plantes, també agreugen la vulnerabilitat de les suredes a patir plagues i malalties, augmentant les pèrdues de coberta arbòria (Tiberi i cols. 2016). Per tant, la sequera (Peñuelas i cols. 2001; Carnicer i cols. 2011, Camilo-Alves i cols. 2017), l'augment de la temperatura (De la Cruz i cols. 2014) i les onades de calor (Camarero i cols 2015), juntament amb la podridura de les arrels causada pel patògen *Phytophthora cinnamomi* (Brasier 1996; Sánchez i cols. 2002; Gómez-Aparicio i cols. 2012; Matías i cols. 2019), es troben entre els principals factors que expliquen els esdeveniments d'alta mortalitat i/o defoliació en sureres que s'han produït a la conca del Mediterrani des de principis del segle XX, però especialment a partir de la dècada de 1980 (Acácio i cols. 2009). En concret, Acácio i cols. (2021) van observar que, entre 1965 i 2015, la superfície coberta per les capçades d'alzina surera a Portugal va tendir a disminuir en el 57.9% dels punts mostrejats i això ho van associar en part a l'augment en la temperatura mitjana. L'increment en la intensitat o en la freqüència dels incendis també s'ha relacionat amb la disminució de la resiliència de les suredes, augmentant la seva mortalitat, i l'expansió de les comunitats arbustives, especialment si els incendis tenen lloc immediatament després de l'extracció del suro (Pausas 1997; Díaz-Delgado i cols. 2002; Moreira et al. 2007; Acácio i cols. 2009).

L'extracció del suro *per se* també pot ser un factor d'estrès per als arbres, ja que fa que l'arbre sigui més vulnerable als patògens i als incendis. També pot causar pèrdues immediates de carboni i aigua, les quals poden provocar canvis en l'assignació dels fotoassimilats i en el balanç hídric dels arbres (Oliveira i Costa, 2012). De fet, el suro només es pot extreure amb seguretat quan les cèl·lules del

fel·logen es divideixen activament, és a dir, entre finals de primavera i principi d'estiu, interval que coincideix amb l'inici del període amb el major dèficit hídric potencial a la conca del Mediterrani. Tanmateix, si bé les estimacions inicials indicaven que la pèrdua d'aigua diària de les superfícies pelades podia igualar la transpiració de la capçada (Correia i cols. 1992; Oliveira i Costa 2012), recentment s'ha observat que les pèrdues d'aigua del tronc després de l'extracció del suro només representen el 2% de la transpiració de la copa i no afecten significativament el balanç hídric dels arbres a l'estiu (Costa-e-Silva i cols. 2021). A més, en aquest estudi també han observat que el suro és un teixit amb un baix cost de carboni (representa menys de l'1.5% de la producció primària neta anual) i amb un baix requeriment de nutrients, ja que el contingut de macronutrients primaris del suro representa aproximadament el 2% de les necessitats nutritives anuals de les fulles de la capçada. No obstant això, Costa-e-Silva i cols. (2021) van estimar que l'eliminació del suro va fer disminuir en un 46% el flux de saba en un any sec, cosa que suggereix un major tancament estomàtic causat per una interacció entre els efectes negatius de l'eliminació del suro i l'escassetat d'aigua del sòl. Per tant, malgrat que els efectes de la sequera estival sobre el segrest de carboni van ser més importants que els efectes de l'extracció del suro, la barreja dels dos estressos va provocar una reducció important de l'absorció de carboni a l'estiu (aproximadament un 32%). Si tenim en compte que una menor quantitat de fotoassimilats disponibles pot tenir un efecte perjudicial sobre el creixement, l'emmagatzematge de reserves de carboni i la producció de compostos de defensa dels suros, aquests efectes podrien ser especialment crítics per als arbres més vulnerables, és a dir, aquells que creixen prop del seu llindar vital. Per això, Costa-e-Silva (2021) conclouen que l'extracció del suro s'hauria d'evitar en anys de sequera severa i en els arbres més propensos a l'estrès.

Però, quins són els arbres més propensos a l'estrès? Aquesta pregunta encara no té una resposta clara, però els estudis indiquen que una extracció del suro excessiva pot comportar el declivi de l'arbre (Oliveira i Costa 2012) i que, a partir de la sisena extracció consecutiva de suro, l'arbre perd vigor i pot passar a ser més vulnerable a altres estressos (Costa i cols. 2015). D'altra banda, segons Mendes i cols. (2019), la recol·lecció de suro intensifica l'impacte negatiu de la sequera sobre el creixement dels arbres més petits (diàmetre < 35 cm) que no tenen la mateixa capacitat d'utilitzar l'aigua subterrània durant l'estiu que els arbres més grans (Mendes i cols. 2016, Camilo-Alves i cols. 2017).

L'arrel de l'alzina surera és un sistema dimòrfic amb una xarxa d'arrels superficials i una arrel pivotant amb arrels fines profundes (David i cols. 2013; Verdaguer i Molinas, 1992). Durant el període de creixement, sembla que les sureres bàsicament depenen de l'aigua de la precipitació captada per les abundants arrels superficials, mentre que, durant les sequeres estivals, l'aigua transpirada prové principalment de l'aigua subterrània absorbida per les arrels profundes (David i cols. 2007, 2013; Kurz

Besson i cols. 2014). Per tant, la intensificació de la sequera en un futur pot reduir el creixement del suro, afectant fortament l'economia del sector (Palma i cols. 2015; Oliveira i cols. 2016).

Una reducció dels nivells d'aigua subterrània com a conseqüència d'una successió d'anys secs (o a un episodi d'estrès sever) pot causar dèficits hídrics que superin el llindar vital dels arbres, provocant el seu decaïment o fins i tot la seva mort (Costa i cols. 2016; Mendes i cols. 2016). En aquest sentit, diversos estudis conclouen que el canvi climàtic pot reduir de forma important la superfície d'alzines sureres a la península Ibèrica (Carnicer i cols. 2011; Fernández-Cancio i cols. 2012; López-Tirado i Hidalgo 2016; Vessella i cols. 2017; Correia i cols. 2018; Duque-Lazo i cols. 2018; Acácio i cols. 2021). Correia i cols. (2018), considerant l'escenari de canvi climàtic més extrem (RCP 8.5; Stocker i cols. 2013), preveuen que fins el 40% de les zones que en l'actualitat són ambientalment adequades per a l'alzina surera podrien no ser-ho l'any 2070, principalment al nord d'Àfrica i al sud de la península Ibèrica. Segons aquests investigadors, un 40% de la distribució actual de la surera podria patir una disminució en la seva idoneïtat per al creixement de l'espècie. En canvi, certes zones del nord de la península Ibèrica i de França podrien augmentar-ne la seva idoneïtat climàtica. D'acord amb aquests resultats, l'informe CANVIBOSC (Banqué i cols. 2013) preveu que, a Catalunya, la superfície amb la idoneïtat adequada per al creixement de *Q. suber* podria passar del 51% en el moment de l'estudi al 53,6% durant el període 2050-2080 (tot i utilitzar un escenari de canvi climàtic força pessimista anomenat A2). D'altres estudis, però, han arribat a conclusions ben diferents. Per exemple, Fernández-Cancio i cols. (2012) preveuen reduccions importants de l'àrea de distribució de la surera a Catalunya com a conseqüència del canvi climàtic. En la mateixa línia, Mundet i cols. (2018) assenyalen que un 65% de les suredes catalanes es trobarien en zones vulnerables a l'estrès hídric. Aquestes discrepàncies en les projeccions de futur de l'alzina surera ens indiquen clarament que manquen més estudis que analitzin com el canvi climàtic, i en particular la intensificació de la sequera a l'estiu, pot afectar "la salut" dels suros i de les suredes catalanes, i si l'extracció del suro pot ser un factor d'estrès afegit per a l'arbre. Fins ara, la major part del coneixement sobre aquest tema prové d'estudis realitzats en suredes de la part occidental de la Península (principalment de Portugal), les quals, com s'ha comentat anteriorment, presenten característiques ecològiques i de gestió molt diferents a les suredes catalanes. Així doncs, és imprescindible disposar d'aquest coneixement per a les suredes catalanes, ja que això ens ajudarà a dissenyar estratègies de gestió que mitiguin (i no intensifiquin) els efectes de la sequera sobre aquests valuosos ecosistemes.

2. OBJECTIUS

- 1) Determinar si l'extracció (o pela) del suro té un efecte significatiu sobre l'estat hídric i fisiològic de les alzines sureres de Can Vilallonga (Cassà de la Selva, Gironès), i valorar si aquest efecte depèn de la mida dels arbres.
- 2) Determinar si les alzines sureres són sensibles a les condicions ambientals característiques de l'estiu i si la resposta depèn de que l'arbre hagi estat pelat.
- 3) Comprovar si la pela, i/o la seva interacció amb la sequera estival, afecten la respiració del tronc de les alzines sureres i, per tant, podrien afectar el balanç de carboni de l'arbre.

3. PROCEDIMENTS EMPRATS PER A DUR A TERME L'EXPERIMENT

3.1. Situació de la sureda, selecció de les alzines sureres i mostrejos

3.1.1. Situació de la sureda i selecció de les alzines sureres

La sureda estudiada es troba al massís de les Gavarres, al terme municipal de Cassà de la Selva (Girona; nord-est de la península Ibèrica), i pertany a Can Vilallonga (41.88N, 2.91E), una finca forestal de 226 ha de bosc i gestionada pel Consorci de les Gavarres. Aquesta finca està integrada en l'Espai Natural Protegit de les Gavarres. Com la majoria de suredes de les Gavarres, la sureda d'estudi (Figura 2) es troba sobre substrat granític, exposada a una forta insolació i a una baixa disponibilitat hídrica.

A)



B)



Figura 2. Imatges de la sureda d'estudi on es poden veure alguns peus d'alzina surera i alguns brucs, estepes i aladerns de fulla estreta conformant el sotabosc. A) Àrea d'experimentació abans de llevar-se el suro. B) Àrea d'experimentació 5 mesos després de llevar-se els suros. Fotografies: D. Verdaguer

L'àrea d'experimentació feia uns 13.000 m² i un rierol sec la dividia en dues zones amb una pendent i unes condicions edàfiques similars. En aquesta àrea es van seleccionar 42 alzines sureres tenint en compte: a) el seu diàmetre a nivell del pit (DBH), que es va obtenir fent la mitjana del diàmetre màxim i el seu perpendicular a uns 1.30 cm de la base del tronc; b) que haguessin estat pelats amb anterioritat com a mínim una vegada, és a dir, que no presentessin suro pelegrí que és el de la primera lleva; i c) que el suro no hagués estat llevat en els darrers 12-14 anys.



Figura 3. Imatges del treball inicial realitzat per a seleccionar, marcar i mesurar el diàmetre de les alzines sureres d'estudi. Fotografies: E. Bisbe.

Un cop seleccionats els arbres es van dividir en dos grups, 21 dels quals es van mantenir sense pelar (a partir d'ara s'anomenaran "suros controls"), i els altres 21 es van pelar el juny del 2023 (a partir d'ara s'anomenaran "suros pelats"). En triar els arbres, es va contemplar que els dos grups tinguessin un rang diamètric i un diàmetre mitjà similars. El rang diamètric dels suros control era de 19.75 - 35.25 cm, amb un diàmetre mitjà de 26.6 ± 3.8 cm, mentre que el grup de suros que es pelarien tenien un rang diamètric de 19.5 - 36.25 cm i un diàmetre mig de 26.2 ± 4.4 cm (Figures 3, 4). Els suros control es van marcar amb una cinta groga i els que havien de ser pelats amb una cinta vermella (Figura 5A, B), i es van identificar amb números correlatius de l'1 al 42.

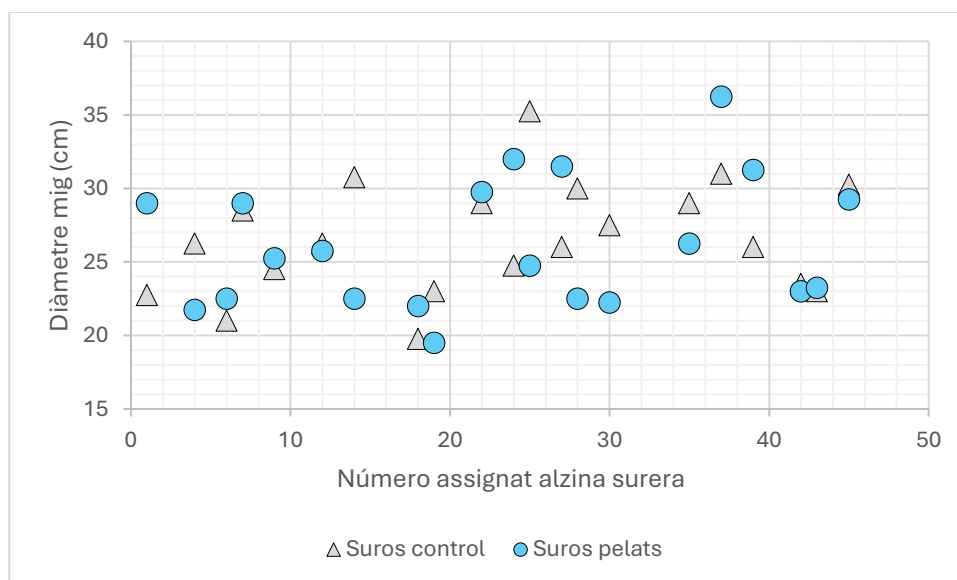


Figura 4. Distribució diamètrica dels suros control i pelats seleccionats per a realitzar l'estudi.

La pela de la meitat dels suros es va dur a terme el 8 de juny (Figura 5C). Aquesta va ser manual i seguint l'ordre vigent sobre la regulació de l'obtenció de suro (DOG Núm. 999 – 1.6.1988) en què es controla l'alçada en què l'arbre pot ser pelat segons el perímetre del tronc (mínim 65 cm) a nivell del

pit (1.30 cm). Així, les alzines sureres es van pelar des del sòl fins a una alçada equivalent a unes 3 vegades el seu diàmetre.



Figura 5: A i B, Imatges de les alzines sureres marcades A) amb cinta groga els suros control i B) amb cinta vermella els suros que havien de ser pelats. C) Pelador llevant la pana a una alzina surera marcada. Fotografies: A i B, D. Verdaguer; C, J. Barba.

3.1.2. Mostrejos per a l'estudi morfològic i fisiològic de les fulles

Per a l'estudi morfològic i fisiològic de les fulles de les alzines sureres es van realitzar quatre mostrejos entre el mesos de juny i de setembre del 2023. Aquests es van fer per analitzar les alzines sureres abans de ser pelades (1r mostreig: dies 2, 6 i 7 de juny), entre 7 i 12 dies després de la pela (2n mostreig: dies 15, 16 i 20 de juny), al cap d'un mes (3er mostreig: dies 10, 11 i 12 de juliol), i després que les alzines sureres haguessin passat els 2 mesos més calorosos de l'estiu (4rt mostreig: dies 5 i 6 de setembre). Tots els mostrejos es van realitzar en dies assolellats i en una franja horària de dues hores abans i després del migdia solar (entre les 11h i les 15h).

En el segon i tercer mostreig (mitjans de juny i juliol), també es va diferenciar entre les fulles desenvolupades durant la brotada de juny (fulla jove) i les originades en brotades anteriors (primavera o tardor de l'any anterior) (fulla vella), ja que les diferències de color, duresa i altres característiques eren molt evidents. No obstant això, per a no influenciar els resultats, sempre es va tenir en compte que el número d'individus mostrejats amb fulles joves o velles fos el mateix, tant per als suros control com per als pelats. Al setembre, aquesta distinció no es va fer perquè totes les fulles presentaven característiques similars.

D'altra banda, en el primer, segon i tercer mostreig es van mesurar els paràmetres morfofisiològics de 42, 41 i 40 alzines sureres, respectivament, amb la meitat dels arbres com a

controls i l'altra meitat pelats. La lleugera variació en el nombre d'arbres entre campanyes es va produir pel dany a alguna alzina surera durant el procés de pela. En l'últim mostreig, per qüestions logístiques, només es van mostrejar 20 de les 42 alzines sureres inicials, 10 control i 10 pelades.

3.1.3. Mostrejos per a l'estudi de la respiració del tronc

Per a l'estudi de la respiració del tronc (emissions de CO₂ provinents, en part, de la respiració de les cèl·lules vives del tronc i, en part, de la respiració del sòl que és transportat amb la saba) es van realitzar 5 mostrejos entre els mesos de juny i setembre del 2023. La primera campanya es va realitzar una setmana abans de la pela dels suros (29 de maig, 5 i 6 de juny). La segona campanya es va realitzar els mateixos dies de la pela dels arbres (8 i 9 de juny; mesures fetes en els 10 minuts posteriors a l'extracció de les panes de suro). El tercer i quart mostreig es van realitzar una setmana (14-16 de juny) i un més després (10 i 11 de juliol) de la pela del suro i, finalment, la tercera campanya es va realitzar 3 mesos després de l'extracció del suro (14 i 15 de setembre). Per a l'estudi de la respiració dels troncs es van estudiar 40 alzines sureres (20 controls i 20 pelades) en totes les campanyes.

3.2. Mesura de la humitat, la temperatura i les característiques físico-químiques del sòl

3.2.1. Humitat i temperatura del sòl

La humitat del sòl es va mesurar per a cada arbre i cada campanya en una zona de 2 m de radi al voltant dels troncs de les alzines sureres amb un TDR que utilitza la tècnica de reflectometria de domini de temps (FieldScout TDR 300, Spectrum technologies Inc; EUA). Aquest TDR estava equipat amb unes varetes de 20 cm de llargada que s'havien de clavar en el sòl intentant que no quedés aire entre aquest i les varetes. La humitat del sòl s'expressava com a contingut volumètric d'aigua (VWC), de manera que, com més elevats eren els valors, més aigua disponible per a les plantes contenia el sòl. La temperatura del sòl a 10 cm de profunditat es va mesurar en el mateix punt que la humitat amb un termòmetre digital (HH806WE, Omega, Taiwan).

3.2.2. Característiques físico-químiques del sòl

Al final de l'últim mostreig es van agafar tres mostres de sòl, tenint en compte que reflectissin la variabilitat de la zona. Aquestes es van obtenir un cop treia la virosta de la superfície en una àrea de 400 cm² i una profunditat de 10 cm (Figura 6). Un cop el sòl de cada mostra es va haver homogeneïtzat, se'n va pesar 1 Kg, es va posar en una bossa de plàstic i es va enviar per a ser analitzat al laboratori Labiser (Córdoba, Espanya). Aquest laboratori va determinar, per a cada mostra, la textura, el pH, la conductivitat elèctrica, el contingut de matèria orgànica i carboni orgànic, i el contingut en macronutrients i micronutrients.

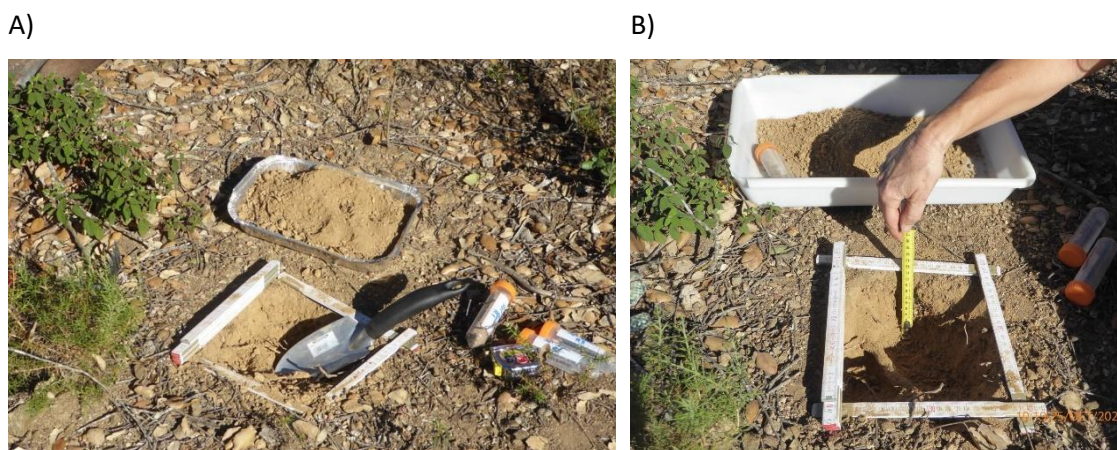


Figura 6: Obtenció de mostres de sòl de l'àrea d'experimentació per al seu posterior anàlisi físico-químic. Les mostres es van extreure d'una àrea de 400 cm^2 i a una fondària de 10 cm. Fotografia: D. Verdaguer

3.3. Estudi de les característiques morfològiques de les fulles

Els trets morfològics que es van analitzar en les fulles de les alzines sureres van ser: l'àrea, el gruix, el pes específic (LMA) i la densitat. Canvis en aquests paràmetres poden indicar condicions estressants per a la planta. Per exemple, si les fulles disminueixen la seva àrea foliar i augmenten el gruix, el LMA i la densitat, esdevenint més esclerofil·les, pot significar que les condicions hídriques en què es desenvolupa han empitjorat, possiblement al perdre la planta més aigua de la que pot absorbir.

Aquests paràmetres es van mesurar en 3 fulles per a cada alzina surera mostrejada. Per a determinar l'àrea, el perímetre de les fulles es va resseguir en un paper, després aquest es va escanejar (Epson perfection 1250, EUA) i l'àrea de cada fulla es va calcular mitjançant un programa d'anàlisi d'imatges (ImageTool, University of Texas Health Science Center, EUA). El gruix foliar es va mesurar amb un micròmetre portàtil (mod. 4000DIG, Baxlo, Espanya) en les mateixes fulles utilitzades per a mesurar el contingut relatiu d'aigua (apartat 3.4.2). Per a cada fulla es van obtenir tres gruixos de la làmina foliar, dos a la meitat de la fulla, un a cada cantó del nervi principal, i un tercer a l'àpex de la fulla on el nervi principal es defineix. El pes específic foliar (LMA, mg/cm^2) es va calcular dividint el pes sec de la fulla (PS) per la seva àrea ($\text{PS}/\text{Àrea}$). El pes sec es va obtenir de les fulles anteriors un cop assecades a $70\text{ }^\circ\text{C}$ a l'estufa (Memmert GmbH + Co. KG, Alemanya) durant un mínim de 3 dies. La densitat es va calcular dividint el pes sec de la fulla per la seva àrea i gruix ($\text{PS}/(\text{Àrea} * \text{Gruix})$).

3.4. Paràmetres mesurats per a determinar l'estat hídric de la planta

3.4.1. Potencial hídric

El potencial hídric (Ψ , MPa) d'una planta ens indica quin és el seu estat hídric. Els valors de potencial hídric sempre són negatius, essent el valor màxim, en condicions de temperatura i pressió normals, 0 MPa. Per tant, si una planta està ben hidratada, el seu potencial hídric és poc negatiu, mentre que quan menys aigua té, més negatius són els valors. En aquest estudi el potencial hídric de les fulles de l'alzina surera es va mesurar a migdia per a estimar el potencial hídric mínim de la planta, ja que és el moment del dia en què està més estressada hídricament.

Per a realitzar les mesures de potencial hídric es va fer servir una bomba de pressió tipus Scholander (Pump-up, PMS Instrument company, USA) (Figura 7). Per a cada alzina surera, de la cara sud de l'arbre i a una distància similar del terra, es va tallar una branqueta amb 3 - 5 fulles exposades al sol. Les mesures de potencial hídric es van realitzar *in situ*, en el mateix bosc (Figura 7). Cada branqueta, un cop tallada, es posava immediatament en una bossa de plàstic, per a que no perdés humitat. A continuació, se li practicava un tall net a la tija per a facilitar l'observació del contingut del xilema, i s'introduïa a la cambra de la bomba de pressió de manera que només la tija sortís per l'orifici de la tapa de la cambra i totes les fulles quedessin a l'interior. Després, s'introduïa aire a la cambra amb una manxa mecànica fins que la pressió de l'aigua de l'interior del xilema s'equilibrava amb la pressió de la cambra (Figura 7). El moment d'equilibri es determinava quan a la superfície del tall es veia bombolleig, o sigui que el contingut del xilema sortia a l'exterior. En aquest instant s'anotava la pressió que es llegia en el manòmetre canviant-li el signe, ja que la pressió que s'havia hagut de fer per a que l'aigua del xilema sortís era equivalent, però de signe contrari, a la tensió de l'aigua a l'interior del xilema. Aquesta tensió és, alhora, equivalent al potencial hídric.

A)



B)



C)



D)



Figura 7: Mesura del potencial hídric. A) Cambra de pressió on es pot veure el manòmetre, la cambra amb la branqueta a l'interior i la connexió amb l'entrada d'aire. B) Preparació de la branqueta d'alzina surera amb 3 o 5 fulles que s'introduirà a la cambra de pressió. C) Observació de la superfície lliure de la tija per a poder determinar el moment en què el contingut del xilema surt sota pressió a l'exterior, valor que en signe negatiu coincideix amb el potencial hídric de la planta. D) Introducció d'aire a la cambra amb una manxa mecànica per a fer augmentar la pressió sobre el teixit. Fotografies: A, B i D, D. Verdaguer; C, M. Fontrodona

3.4.2. Contingut relatiu d'aigua

El contingut relatiu d'aigua foliar (RWC, %) permet conèixer el percentatge d'aigua que tenen les fulles en relació al màxim que poden tenir, essent els valors independents de l'espècie amb què es treballa. Valors de RWC elevats, per exemple entre 70 i 90%, indiquen estats hídrics òptims, mentre que valors més baixos del 50% indiquen que la fulla està en dèficit hídric.

Per a determinar el RWC, es van agafar 3 fulles de cada alzina surera i es van posar en una bossa de plàstic dins d'una nevera portàtil fins arribar al laboratori, on es van mesurar immediatament i per separat. Al laboratori, les fulles es van pesar per obtenir el seu pes fresc (PF), i tot seguit es van posar en tubs cònics amb 35 ml d'aigua destil·lada a la foscor i en una nevera a 4°C durant dos dies perquè s'hidratessin fins a l'estat de turgència màxima. Després es va assecar l'aigua de la superfície de les fulles i es van pesar de nou per obtenir-ne el pes turgent (PT; pes foliar amb la màxima quantitat d'aigua que la fulla pot contenir). Un cop pesades, es van posar a 70°C un mínim de 3 dies en una estufa (Memmert GmbH + Co. KG, Alemanya) i es van tornar a pesar per a obtenir el pes sec (PS). Finalment, el RWC (%) es va calcular com: $(PF-PS/PT-PS) \times 100$.

3.4.3. Conductància estomàtica

La conductància estomàtica ($gs, \mu mol/m^2s$) permet conèixer el grau d'obertura dels estomes. Els estomes es localitzen majoritàriament a la superfície de les fulles, i, en concret, a l'alzina surera només es troben a la part de baix de la fulla (la cara abaxial). Aquests estomes estan formats per dues cèl·lules,

una de cara a l'altra, que quan estan hidratades deixen entre elles un porus a través del qual entra el diòxid de carboni (CO_2) necessari per a que la planta faci la fotosíntesi, tot i que, per defecte, surt aigua (H_2O). Es considera que per cada molècula de CO_2 que entra a través dels estomes surten unes 16 molècules d' H_2O . Per tant, quant més oberts estan els estomes, més aigua pot perdre la planta en forma de vapor (transpiració).

En aquest estudi la conductància estomàtica es va mesurar al migdia i en 3 fulles per arbre amb un poròmetre portàtil (SC-1, Decagon Device, Inc., EUA) (Figura 8). Les mesures es van fer sempre en la cara abaxial de fulles totalment exposades al sol. Totes les fulles es pinçaven per la làmina foliar evitant agafar el nervi principal. L'aparell consta d'una pinça que es col·loca en la fulla i un registrador de dades que processa les dades d'humitat i temperatura necessàries per a calcular la conductància estomàtica. Per això, abans de fer les mesures, era molt important obrir i agitar la pinça per a renovar l'aire que contenia la cambra interna de la pinça i així garantir que la humitat d'aquesta estava en equilibri amb la humitat ambiental, i que, per tant, les dades obtingudes eren correctes.

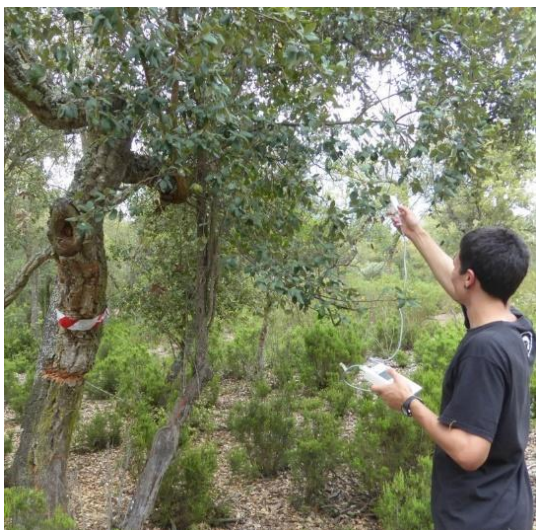


Figura 8: Mesura de la conductància estomàtica de la cara abaxial d'una fulla d'alzina surera amb el poròmetre portàtil (SC-1, Decagon Device, Inc., EUA). En la imatge es pot veure com en M. Fontrodona amb una mà pinça una fulla i amb l'altra aguanta el "datalogger". Fotografia: D. Verdager.

3.5. Paràmetres relacionats amb la capacitat fotosintètica de la planta

3.5.1. Fluorescència de les clorofil·les

Les plantes absorbeixen l'energia del sol que necessiten per a fer la fotosíntesi mitjançant els pigments fotosintètics, principalment les clorofil·les. Ara bé, quan les clorofil·les absorbeixen un excés d'energia, poden dissipar part d'aquesta energia en forma de calor i/o de fluorescència per a evitar fotooxidar-se o per a evitar danys al sistema fotosintètic. Per tant, un augment de la fluorescència de les clorofil·les significa que el sistema fotosintètic té un excés de radiació i no pot processar tota l'energia que rep, la qual cosa pot succeir quan la planta està estressada. Per exemple, si una planta està sota dèficit hídric tancarà els estomes per a no perdre aigua, cosa que comportarà que entri menys CO_2 a dins la fulla, reduint la fotosíntesi. Per contra, les fulles continuaran rebent l'energia del sol i, per evitar que es

malmeti el sistema fotosintètic, augmentarà la dissipació de l'energia en forma de calor i la fluorescència de les clorofil·les.

A)



B)



Figura 9: Mesura de la fluorescència de les clorofil·les en les fulles d'alzina surera amb un fluorímetre modulad portàtil (PAM-2100 Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Alemanya) A) en condicions de llum i B) posant les pinces que han de permetre mesurar la fluorescència de les fulles després d'haver estat un mínim de 30 minuts a la foscor. Fotografies: D. Verdaguer

En aquest estudi, la fluorescència de les clorofil·les es va mesurar a la superfície adaxial de 3 fulles per arbre mitjançant un fluorímetre modulad portàtil (PAM-2100 Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Alemanya) (Figura 9). Els paràmetres que es van mesurar van ser:

I) L'eficiència fotoquímica màxima del fotosistema II (PSII) o F_v/F_m , on F_v és la fluorescència variable calculada com $F_v = F_m - F_o$, sent F_o el mínim i F_m la fluorescència màxima adaptada a la foscor (30 min). Aquest paràmetre reflecteix la capacitat màxima del sistema fotosintètic de processar la llum.

II) L'eficiència fotoquímica real del PSII adaptat a la llum o $\Delta F/F_m' = (F_m' - F)/F_m'$, on F és el rendiment de fluorescència en estat estacionari sota les condicions ambientals en el moment de l'estudi, i F_m' és el màxim nivell de fluorescència obtingut durant un flaix de llum saturant. Aquest paràmetre explica la llum que es processa en un moment determinat.

III) La taxa de transport d'electrons o $ETR = \Delta F/F_m' \times PAR \times 0.84 \times 0.5$, on PAR és la llum fotosintèticament activa (entre 400 i 700 nm) expressada en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 0.84 és el coeficient d'absorció estimat, en general, per a les fulles, i 0.5 és la distribució de l'energia absorbida entre els dos fotosistemes. Aquest paràmetre reflecteix l'energia absorbida que es destina al transport d'electrons fotosintètic, es a dir, a la fotosíntesi.

IV) El coeficient d'extinció no fotoquímica determinat com a $NPQ = (F_m - F_m') / F_m'$. Com més alts són els valors d'aquest paràmetre, més energia és dissipada en forma de calor i, per tant, no s'utilitza per a fer la fotosíntesi.

3.5.2. Contingut de clorofil·les i fenols de les fulles

Les clorofil·les, com hem comentat, són pigments essencials per a absorbir l'energia del sol i per a que les plantes facin la fotosíntesi. Aquests pigments contenen nitrogen (N) en la seva estructura molecular, la qual cosa significa que la planta ha de destinar molta energia a la seva síntesi, ja que l'absorció del nitrogen per part de les arrels requereix d'energia. Per això, el contingut de clorofil·les en la planta està estretament regulat i els seus nivells depenen de varis factors, com les condicions ambientals en què la planta es desenvolupa. Per exemple, quan les plantes estan estressades el contingut de clorofil·les de les fulles acostuma a disminuir per a reduir la quantitat d'energia que absorbeixen i així evitar que el sistema fotosintètic es pugui fotoodidar per un excés d'energia. Per contra, altres compostos, com els fenols, tendeixen a augmentar quan la planta està estressada.

Els fenols són una extensa família de compostos que no presenten nitrogen en la seva estructura molecular i que tenen múltiples funcions en les plantes. Dins d'aquesta família destaquen els flavonols, que es localitzen principalment a l'epidermis adaxial de les fulles i absorbeixen la radiació solar, incloent la radiació ultraviolada, evitant que un excés d'energia malmeti el sistema fotosintètic. Per tant, l'estudi del nivell de clorofil·les i flavonols en les fulles d'alzina surera pot ajudar a entendre si la planta es troba en una situació estressant. Per això, es va determinar el contingut de clorofil·les i flavonols de 3 fulles de cada alzina surera amb el DUALEX® SCIENTIFIC (ForceA, França). Aquest és un aparell portàtil que permet fer mesures ràpides, no destructives. L'aparell estima el contingut de clorofil·les gràcies a la transmittància (llum que travessa la fulla) entre dues longituds d'ona: la del vermell llunyà que és absorbida per les clorofil·les (710 nm) i la de l'infraroig proper (850 nm) que s'utilitza com a control de la morfologia de la fulla. Si la transmittància de la llum del vermell llunyà és baixa indica que el contingut de clorofil·les és alt, i al revés.

En canvi, els flavonols es mesuren indirectament a partir de la fluorescència de les clorofil·les de l'interior de la fulla, el mesofil·le. Aquestes clorofil·les, segons la llum que reben, emeten més o menys fluorescència. D'altra banda, la llum que reben depèn, entre altres factors, del contingut de flavonols de l'epidermis. Si el contingut de flavonols és elevat, arriba menys radiació a les clorofil·les i aquestes emeten menys fluorescència. La radiació que s'aplica per fer les mesures és: radiació UV-A de 375 nm que pot ser absorbida pels flavonols de l'epidermis i les clorofil·les del mesofil·le i radiació de 640 nm que no és absorbida a l'epidermis però sí que ho és per les clorofil·les. L'aparell també dona l'índex del balanç de nitrogen (NBI), indicador de la relació entre el nitrogen i el carboni de les fulles que es calcula dividint el contingut de clorofil·les (CI) pel de flavonols (Flav) ($NBI = CI/Flav$).

3.6. Mesures de la respiració dels troncs

3.6.1. Mesures amb l'analitzador de gasos

La respiració del tronc és la mesura d'emissions de CO_2 des de l'interior dels arbres fins a l'atmosfera, i s'expressa en quantitat de CO_2 per unitat de temps i superfície d'escorça. La respiració del tronc és la combinació del CO_2 produït per la respiració de les cèl·lules vives del tronc i del CO_2 produït per la respiració de les arrels, que pot ser parcialment transportat des del sòl a través del flux de saba. Per tant, aquesta mesura pot indicar canvis en l'activitat metabòlica i en el balanç de carboni dels arbres.

Per a cada campanya i arbre, la respiració del tronc es va mesurar a dues alçades diferents (Figura 10). La mesura inferior es va fer a uns 50 cm del sòl i la superior a uns 150 cm d'alçada. Com que l'extracció del suro només es fa a la part inferior dels troncs (alçada dependent del diàmetre de l'arbre, però en el nostre lloc experimental mai superior a 150 cm), les mesures a la zona inferior corresponien a zones pelades, i les de la zona superior a zones sense pelar. Pel que fa als arbres control, cap de les dues mesures de respiració del tronc es va fer en zones pelades. Aquest disseny experimental ens permet estudiar l'efecte de la pela del suro comparant les mesures de la zona inferior entre sureres pelades i control, així com estudiar els patrons verticals de la respiració del tronc comparant mesures de la zona inferior i superior dels mateixos arbres.

A)



B)



Figura 10: Mesura de la respiració dels troncs A) en la zona inferior d'alzines sureres pelades, i B) control. Fotografies: J. Barba

La respiració del tronc es va mesurar emprant un analitzador de gasos portàtil (M-GGA-918, ABB Inc, Quebec, Canada) que quantificava les concentracions de CO₂ mitjançant absorptiometria espectrofotomètrica. Cambres de plàstic segellades al tronc de l'arbre amb argila (material que no interfereix en les emissions de CO₂ [Jefrey i cols. 2020]) es van connectar a l'analitzador de gasos mitjançant tubs de PVC per a mesurar la respiració dels troncs en temps real i *in situ*. Per a garantir un bon ajust de les cambres, se'n van utilitzar de dos mides diferents (àrees de 341 i 540 cm²) en funció del diàmetre dels arbres. Una vegada la cambra estava segellada, l'analitzador de gasos mesurava la concentració de CO₂ cada segon durant 5 minuts. L'analitzador i la cambra formaven un sistema tancat i aïllat de l'exterior que permetia concentrar el CO₂ dins de la cambra.

3.6.2. Càlcul dels fluxos de respiració del tronc

L'increment de la concentració de CO₂ dins la cambra durant els cinc minuts de cada mesura es va utilitzar per a calcular la respiració del tronc, utilitzant la següent equació (Pumpanen i cols. 2004):

$$F = (dC/dt) * (V_c/A_c) * P / ((R * (T + 273.15)))$$

on la F representa la respiració del tronc, dC/dt és l'increment de la concentració de CO₂ per unitat de temps (ppm s⁻¹), V_c el volum del sistema, A_c l'àrea mesurada per la cambra, P la pressió atmosfèrica, R la constant universal dels gasos (0.008314 kg m² μmol⁻¹ K⁻¹ s⁻²), T la temperatura en °C i 273.15 el factor de conversió de Celsius a Kelvin. Per a poder estimar el flux de CO₂ amb precisió es necessita que les condicions de la cambra siguin estables, cosa que implica que hi ha d'haver un bon segellat de la cambra. Assumint que les taxes d'emissió (increment de la concentració de CO₂) són constants durant els 5 minuts que dura la mesura, la concentració de CO₂ a dins la cambra hauria de seguir un increment lineal en funció del temps. En alguns casos, quan les emissions són molt altes, la concentració dins la cambra tendeix a saturar-se amb el temps, i llavors s'utilitzen ajustos Hutchinson-Mosier (Hutchinson i Mosier 1981). En qualsevol cas, l'ajust d'aquestes regressions lineals o exponencials acostuma a ser tan bo que si el coeficient de determinació és inferior a 0.9 (sent 1 el seu valor màxim) es descarta el flux estimat i no és utilitzats en les anàlisis posteriors.

3.7. Anàlisi estadístic de les dades

Es va utilitzar un model lineal mixt generalitzat (GLMM) per a determinar l'efecte de la pela (pela i control) sobre els paràmetres de morfologia, estat hídric foliar i capacitat fotosintètica de la planta. Es van considerar com a factors fixes la data de mostreig (pela: mitjans de juny; post-pela1: mitjans de juliol; post-pela2: principis de setembre) i el tipus de fulla (vella i jove). Els arbres (agrupats per zona) es van incloure com a factor aleatori, mentre que el diàmetre dels arbres, la humitat del sòl i els valors inicials de cada paràmetre (mesurats abans de la pela) es van considerar com a covariables. Atès que

la zona no va resultar significativa per a cap de les variables analitzades (la qual cosa indica que les dues zones presentaven característiques de pendent, vegetació i sòl semblants), es va eliminar aquesta variable del model. Pel que fa a les variables morfològiques, es van excloure també del model les covariables diàmetre dels arbres i humitat del sòl, ja que no van mostrar efectes significatius. Per a avaluar l'ajust dels models GLMM i comparar-los, es va utilitzar el criteri d'informació d'Akaike (AIC) i es va fer una comparació amb ANOVA. Els models GLMM es van realitzar amb el programa R (versió 4.4.1, R Core Team, 2024) utilitzant els paquets *lme4* (Bates i cols. 2015) i *lmerTest* (Kuznetsova i cols. 2017). Abans de l'aplicació dels tests estadístics, es va aplicar una ANOVA d'un factor per a valorar que no hi haguessin diferències significatives pels diferents paràmetres morfològics i fisiològics mesurats en el primer mostreig entre els arbres control i els que havien de ser pelats. També, inicialment, es va comprovar si les dades complien els supòsits de normalitat amb el test de Shapiro-Wilk, i la homogeneïtat de variàncies amb el test de Levene. Els gràfics es van generar amb el programa estadístic SPSS Statistics (IBM Corp. USA).

Per a l'estudi de la respiració dels troncs es van calcular les taxes de respiració utilitzant el paquet d'R *goFlux* (Rheault i cols. 2024). Una vegada els fluxos estaven calculats, es van emprar models GLMM (de manera semblant als models explicats anteriorment), on la posició de la mesura en el tronc (dalt o baix), el tractament (pela o control), el número de la campanya, la temperatura i la humitat del sòl, el diàmetre dels arbres, i les interaccions entre campanya i tractament, i entre campanya i alçada de les mesures es van incorporar com a variables predictores. Per assegurar-nos que els residuals dels models complien l'assumpció de normalitat, les mesures de CO₂ es van transformar utilitzant la correcció de Yeo Johnson (Bishara & Hittner 2012). Finalment, per realitzar les comparacions post-hoc, es va utilitzar el paquet *emmeans* (Lenth 2024).

4. RESULTATS OBTINGUTS DE L'ANÀLISI DELS DIFERENTS PARÀMETRES

4.1 *El clima, el sòl i la vegetació de l'àrea d'estudi*

El clima on es troba el bosc de suredes és de tipus mediterrani, caracteritzat per primaveres i tardors humides, i estius secs i calorosos. Segons les dades meteorològiques de l'estació de Cassà de la Selva (41.88N, 2.86E) situada a uns 4 km de Can Vilallonga (Servei Meteorològic, Generalitat de Catalunya), la precipitació anual l'any anterior a l'estudi va ser de 517.08 mm, mentre que durant l'any de l'estudi, el 2023, va ser de 401.7 mm (Taula 1). Aquests dos anys es consideren més aviat secs, ja que la precipitació mitjana anual de la zona oscil·la entre els 700 i 800 mm.

Taula 1. Dades meteorològiques i precipitació estacional dels anys 2022 i 2023 obtingudes de l'estació meteorològica automàtica més propera a la zona d'estudi de les Gavarres (Cassà de la Selva, 41.88N, 2.86E; Generalitat de Catalunya).

	2022	2023
Dades meteorològiques		
Radiació solar (MJ/m ²)	5549.2	5665.7
Temperatura mitjana (°C)	15.43 ± 6.86	15.08 ± 6.71
Precipitació total (mm)	517.08	401.7
Precipitació estacional (mm)		
Hivern (gener-març)	144.80	112.60
Primavera (abril-juny)	100.80	161.40
Estiu (juliol-setembre)	143.60	98.80
Tardor (octubre-desembre)	128.60	28.90

Pel que fa a la temperatura dels anys 2022 i 2023, la mitjana anual va ser d'uns 15°C (Taula 1), amb pics màxims de 39°C i 41.2°C, i mínims de -5.3°C i -5°C, respectivament. De juny a setembre del 2023, mesos en què es va dur a terme l'estudi, la precipitació total va ser de 153 mm, i la temperatura mitjana de 22.7°C, amb un pic de 41.2°C (Figura 11).

Als Països Catalans, les suredes es distribueixen al llarg de les serralades del litoral sobre substrat granític, com és el cas de les Gavarres. En concret, el sòl de l'àrea on es va dur a terme l'estudi és de naturalesa silícica, franc-sorrenc, i conté un 15.6 ± 1.5% d'argila, un 26.7 ± 3.0% de llim i un 57.7 ± 4.0% de sorra, el seu pH és àcid (5.8 ± 0.3) i té una conductivitat elèctrica de 57.3 ± 10.1 µS/cm. A més, és pobre en calci, calç activa i carbonats (93 - 257 mg/Kg, 10% p/p i 0.1%, respectivament). El

contingut de matèria orgànica (1.16 - 2.49% p/p) i de carboni orgànic (0.67-1.44%) és de normal a baix i, si bé el percentatge de nitrogen és normal (0.13 - 0.25%), el valor de C/N és baix (4 - 6 s/u). El sòl també és pobre en fòsfor (10 - 13 mg/Kg) i coure (0.8 - 1.1 mg/Kg). En canvi, el contingut de potassi (124 - 138 mg/Kg), sodi (129 - 135 mg/Kg), bor (4.5 - 5.9 mg/Kg), ferro (189 - 199 mg/Kg), zinc (2.1 - 3 mg/Kg) i manganès (17.5 - 82.5 mg/Kg) és normal, mentre que el de magnesi és elevat (284 - 583 mg/Kg). D'altra banda, aquest tipus de sòl té una baixa disponibilitat hídrica. En concret, el contingut volumètric d'aigua del sòl va variar entre 1.60% i 6.61%, essent els valors més baixos els obtinguts a mitjans de juliol i setembre (la sorra saturada pren valors de 35% a 45%).

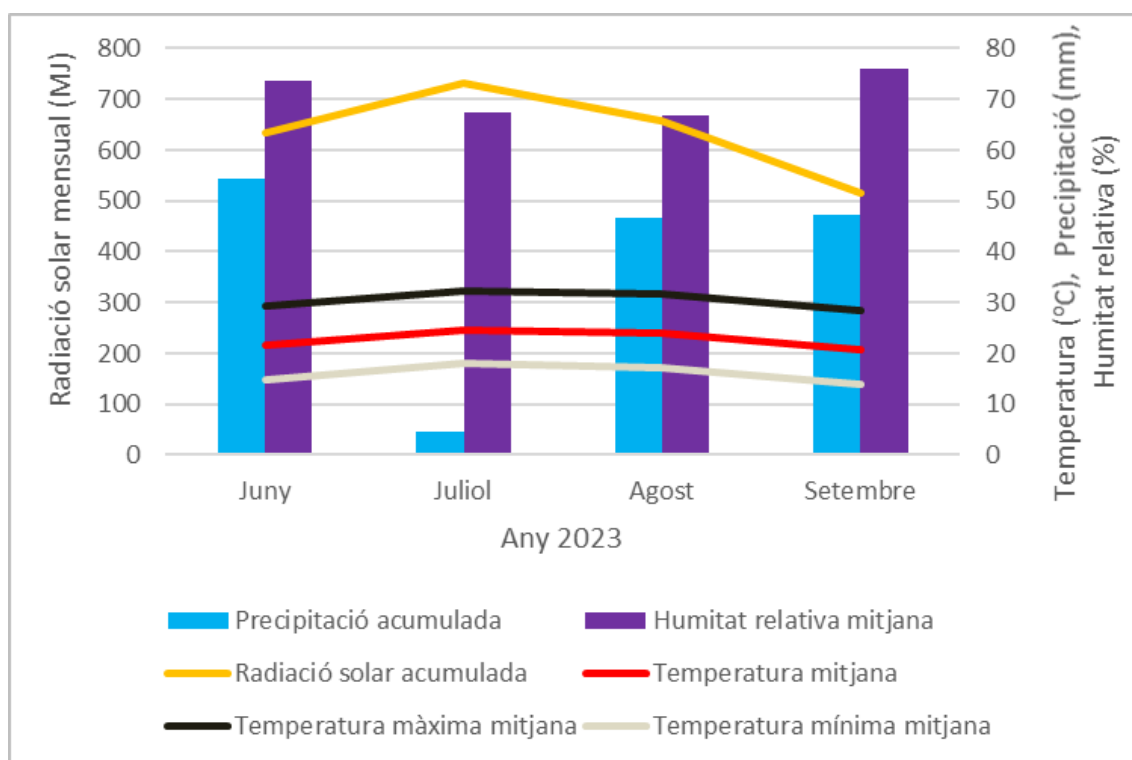


Figura 11. Dades mensuals de precipitació (mm), temperatura mitjana, màxima i mínima (°C) i radiació solar global (MJ/m² dia) dels quatre mesos en què va es dur a terme l'estudi. Dades de l'estació meteorològica automàtica més propera a la zona d'estudi de les Gavarres (Cassà de la Selva, 41.88N, 2.86E; Generalitat de Catalunya).

Pel que fa a la vegetació de la zona d'estudi, l'espècie dominant era l'alzina surera (*Quercus suber* L.), si bé també s'hi trobava algun peu d'alzina (*Quercus ilex*), de pi pinyer (*Pinus pinea*) i de pinastre (*Pinus nigra*). El sotabosc era ric en espècies arbustives, algunes més abundants, com el bruc boal (*Erica arborea*), el bruc d'escombres (*Erica scoparia*) i l'estepa negra (*Cistus monspeliensis*), i altres més escadusseres com el garriç (*Quercus coccifera*), l'aladern de fulla estreta (*Phillyrea angustifolia*), la lavanda (*Lavandula stoechas*), l'arboç (*Arbutus unedo*), l'estepa borrera (*Cistus salvifolius*), el

galleranc (*Ruscus aculeatus*), la gatosa (*Ulex parviflorus*), el marfull (*Viburnum tinus*) i el llentiscle (*Pistacia lentiscus*). La cobertura vegetal del sòl era del 80% aproximadament (Figura 12).



Figura 12. Imatge de la sureda d'estudi on es poden veure alguns peus d'alzina surera (*Quercus suber*) i a l'esquerra un peu d'alzina (*Quercus ilex*). En el sotabosc hi predomina el bruc d'escombres (*Erica scoparia*), però també s'hi observa alguna mata d'aladern de fulla estreta (*Phillyrea angustifolia*) i d'estepa negra (*Cistus monspeliensis*). Fotografia D. Verdaguer.

4.2 Efecte de la pela, la data de mostreig i el tipus de fulla sobre la morfologia i la fisiologia foliar

Per a avaluar l'efecte de la pela i la data de mostreig en els paràmetres morfològics i fisiològics de les alzines sureres estudiades, aquestes es van mesurar abans de pelar (inici de juny), pocs dies després de l'extracció del suro (mitjans de juny), un mes després de la pela (mitjans juliol) i després dels mesos de calor de l'estiu (a principis de setembre). A més, en l'anàlisi dels diferents paràmetres morfològics i fisiològics es va tenir en compte el diàmetre de l'arbre, com a estimació de l'edat d'aquest, i la humitat del sòl. També es va considerar la maduresa de les fulles, ja que a mitjans de juny i de juliol es diferenciaven clarament les fulles joves, desenvolupades durant la brotada primaveral, de les fulles velles, originades en una brotada anterior (primavera o tardor de l'any anterior).

En el mostreig d'abans de la pela, no es van trobar diferències significatives entre els suros control i els que havien de ser pelats per a cap dels paràmetres morfològics i fisiològics analitzats, la qual cosa indica que la mostra d'arbres seleccionats va ser homogènia. Tot i així, les dades inicials preses abans de la pela (Campanya pre-pela) es van utilitzar en totes les anàlisis estadístiques com a covariable.

4.2.1. Morfologia foliar

L'àrea, el gruix, el pes específic i la densitat foliar es van analitzar per a determinar l'efecte de la pela i de la data de mostreig en la morfologia de les fulles. El diàmetre de l'arbre o la humitat del sòl no van afectar aquests paràmetres i per aquest motiu es van treure del model estadístic aplicat (Taula 2).

Taula 2. Resum del model lineal mixt (GLMM) aplicat per a estudiar l'efecte de la pela, la data de mostreig, l'edat de la fulla (vella i jove), el diàmetre de l'arbre i la humitat del sòl sobre els paràmetres morfològics de les fulles (àrea, gruix, pes específic i densitat), considerant els valors inicials de cada paràmetre (abans de la pela). Campanya 3, mostreig realitzat del 10 al 12 de juliol. Campanya 4, mostreig realitzat els dies 5 i 6 de setembre. La fila "Tractament (Pela)" de la taula inclou l'efecte de la Campanya 2 (mostreig realitzat a mitjans de juny) i de Fulla Vella. El valor de p (*P-valor*) considerat com a significatiu és $p < 0.05$. Els *P-valors* significatius es mostren en negreta, ns = no significatiu.

Morfologia foliar	Àrea		Gruix		Pes específic		Densitat	
	t valor	P- valor	t valor	P- valor	t valor	P- valor	t valor	P- valor
Tractament (Pela)	-2.321	0.02	3.189	0.002	1.146	ns	-1.832	ns
Campanya 3	2.713	0.009	-0.835	ns	0.296	ns	1.497	ns
Campanya 4	-6.297	<0.001	2.228	0.03	4.434	<0.001	3.037	0.003
Tipus Fulla (Jove)	-3.618	<0.001	-3.386	0.001	-8.148	<0.001	-6.199	<0.001
Valors inicials del paràmetre	3.105	0.003	4.201	<0.001	5.274	<0.001	1.057	ns
Tractament (Pela) :Campanya 3	-0.213	ns	-0.118	ns	-0.884	ns	-0.918	ns
Tractament (Pela) :Campanya 4	2.415	0.02	-1.589	ns	-0.709	ns	0.592	ns
Tractament (Pela) :Tipus Fulla (Jove)	0.239	ns	-1.942	ns	-0.057	ns	1.404	ns
Campanya 3: Tipus Fulla (Jove)2	-1.712	ns	3.078	0.003	4.373	<0.001	2.280	0.03
Tractament (Pela) :Campanya 3: Tipus Fulla (Jove)	-0.017	ns	1.103	ns	0.790	ns	0.148	ns

L'extracció del suro va afectar l'àrea i el gruix de les fulles (Taula 2). Les fulles dels arbres pelats, en comparació amb els arbres control (no pelats), van ser, en general, més petites ($6.21 \pm 0.21 \text{ cm}^2$ i $7.10 \pm 0.26 \text{ cm}^2$, respectivament) i més gruixudes ($0.41 \pm 0.006 \text{ mm}$ i $0.39 \pm 0.004 \text{ mm}$, respectivament). Si bé, en l'últim mostreig (a principis de setembre), les fulles dels arbres pelats van ser una mica més grans, un 3.8%, que les dels arbres control (Taula 2, Figura 13A). Tot i així, el pes específic o la densitat de les fulles no va diferir estadísticament entre els arbres pelats i els no pelats (Figura 13C, D).

La data en què es va realitzar el mostreig també va afectar la morfologia de les fulles. Un cop passats els mesos de més calor i menys precipitació, a principis de setembre, les fulles de les alzines sureres eren més petites ($5.15 \pm 0.21 \text{ cm}^2$), més gruixudes ($0.42 \pm 0.01 \text{ mm}$) i amb un pes específic ($15.6 \pm 0.36 \text{ mg/cm}^2$) i una densitat foliar ($0.37 \pm 5.2 \text{ mg/mm}^3$) superiors que les de les mostrejades a mitjans de juny, independentment de si procedien d'arbres pelats o controls (Figura 13A-D). De fet, a mitjans de juliol la superfície de les fulles ja era menor que a mitjans de juny ($6.41 \pm 0.35 \text{ cm}^2$ i $6.63 \pm 0.24 \text{ cm}^2$, respectivament) (Taula 2, Figura 13A).

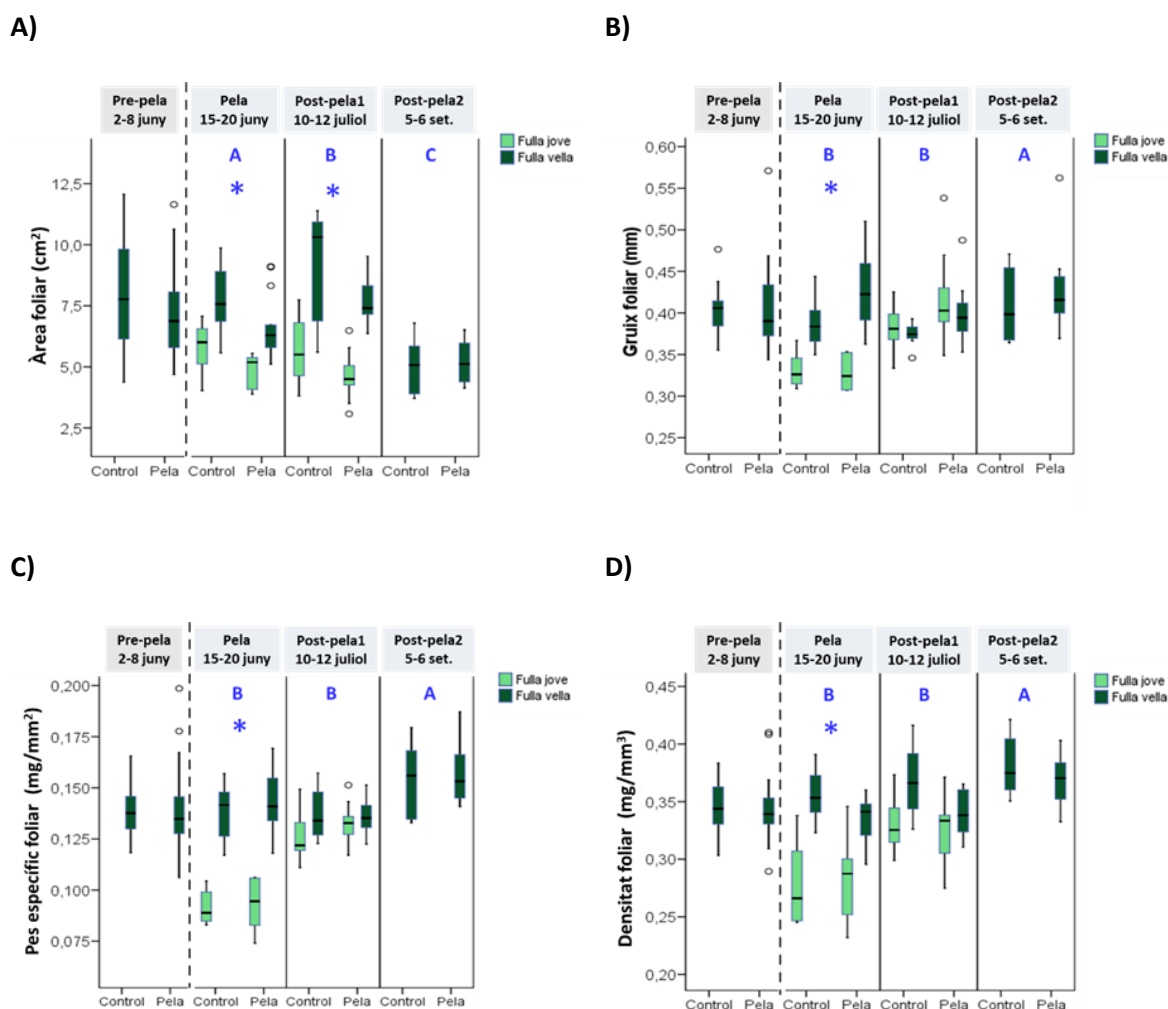


Figura 13. Paràmetres morfològics foliar mesurats en les alzines sureres: A) àrea (cm²), B) gruix (mm), C) pes específic (mg /cm²) i D) densitat (mg /mm³), considerant les dades obtingudes abans de la pela (pre-pela) i les obtingudes en els mostrejos de mitjans de juny (pela), mitjans de juliol (post-pela1) i principis de setembre (post-pela 2), el tipus de fulla (vella i jove) i el tractament (control i pela). Diferents lletres majúscules indiquen diferències significatives entre els mostrejos pela, post-pela1 i post-pela2. L'asterisc (*) indica diferències significatives entre fulles velles i joves.

Pel que fa al desenvolupament de les fulles, a mitjans de juny es veia clarament que les fulles joves eren més petites, més primes i amb un pes específic i una densitat foliar menor que les fulles velles (Taula 2, Figura 13). Tot i així, un mes més tard, a mitjans de juliol, les fulles joves quasi havien assolit les mesures de gruix, pes específic i densitat de les fulles velles (Taula 2, Figura 13B-D). D'altra banda, es va observar una relació positiva entre els valors d'àrea, gruix i pes específic foliar mesurats abans de pelar els arbres (valors inicials) i els valors posteriors. És a dir, els arbres que d'entrada tenien fulles més grans, més gruixudes i amb un major pes específic mantenien aquests trets (Figura 14A-C). No va ser així per a la densitat foliar, la qual no va dependre dels valors inicials (Figura 14D).

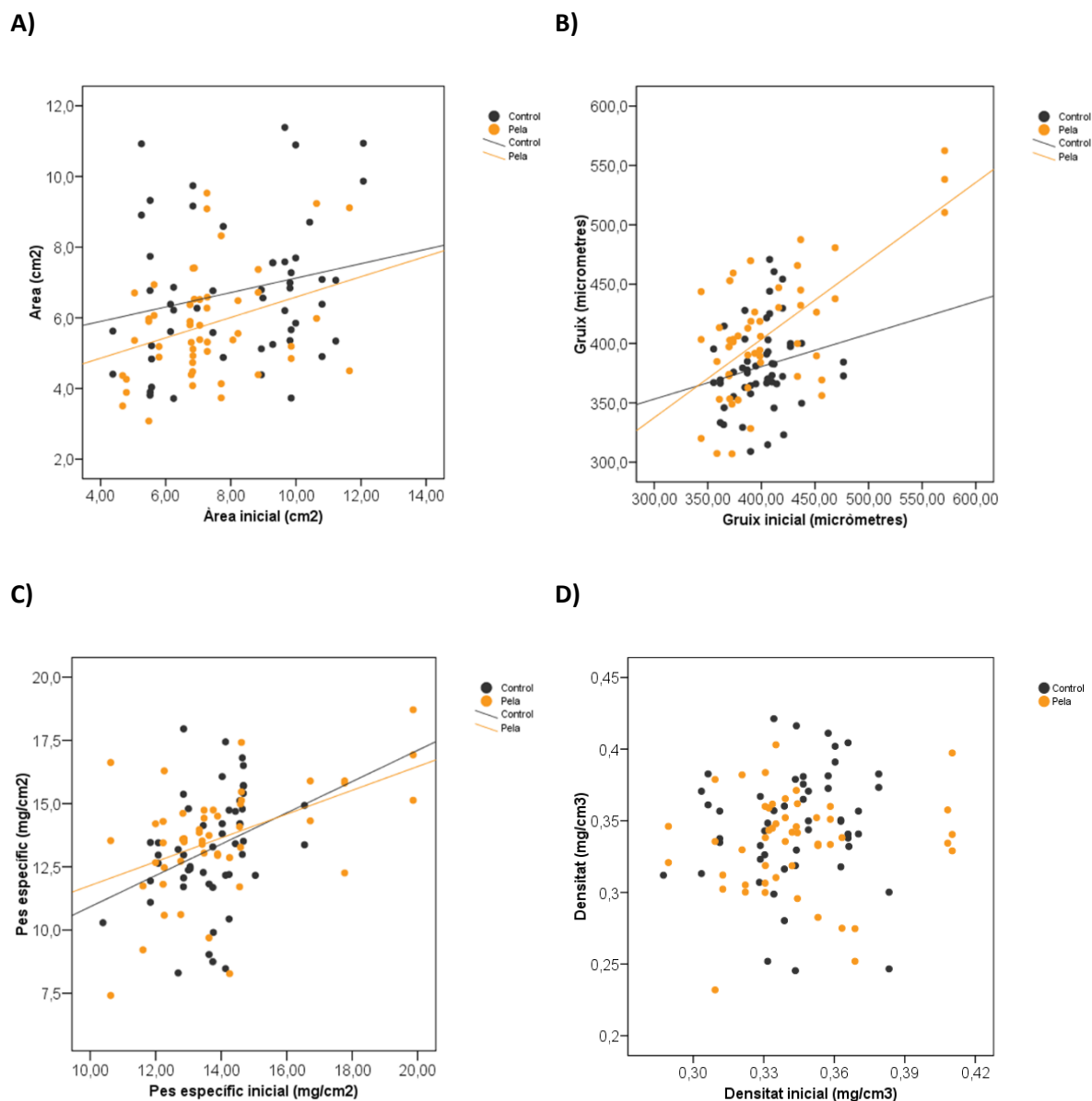


Figura 14. Relació entre els valors inicials de cada paràmetre (abans de la pela) i els valors obtinguts en els diferents mostrejos per: A) àrea (cm²), B) gruix (mm), C) pes específic (mg /cm²) i D) densitat (mg /cm³), considerant el tractament (control i pela). Les línies marquen la relació significativa entre els dos paràmetres.

4.2.1. Estat hídric

Per a valorar l'efecte de la pela i la data de mostreig en l'estat hídric de les alzines sureres estudiades es van mesurar el contingut relatiu d'aigua (RWC), el potencial hídric i la conductància estomàtica (Taula 3).

Taula 3. Resum del model lineal mixt (GLMM) aplicat per a estudiar l'efecte de la pela, la data de mostreig, l'edat de la fulla (vella i jove), el diàmetre de l'arbre i la humitat del sòl sobre els paràmetres hídrics de les fulles (contingut relatiu d'aigua, potencial hídric i conductància estomàtica), considerant els valors inicials de cada paràmetre (abans de la pela). Campanya 3, mostreig realitzat a mitjans de juliol. Campanya 4, mostreig realitzat a principis de setembre. La fila "Tractament (Pela)" de la taula inclou l'efecte de la Campanya 2 (mostreig realitzat a mitjans de juny) i de Fulla Vella. El valor de p (*P-valor*) considerat com a significatiu és $p < 0.05$. Els *P-valors* significatius es mostren en negreta, ns = no significatiu.

Estat hídric foliar	Contingut relatiu d'aigua (RWC)		Potencial hídric		Conductància estomàtica	
	t valor	P- valor	t valor	P- valor	t valor	P- valor
Tractament (Pela)	-0.094	ns	-0.553	ns	1.717	ns
Campanya 3	-0.472	ns	-5.747	<0.001	-3.086	0.003
Campanya 4	1.395	ns	-1.249	ns	0.742	ns
Tipus Fulla (Jove)	3.482	<0.001	1.567	ns	6.998	<0.001
Diàmetre arbre	-0.775	ns	-0.056	ns	-2.231	0.03
Humitat del sòl	0.243	ns	1.276	ns	-1.402	ns
Valors inicials del paràmetre	1.325	ns	0.693	ns	1.357	ns
Tractament (Pela) :Campanya 3	0.004	ns	0.398	ns	-0.348	ns
Tractament (Pela) :Campanya 4	0.663	ns	2.942	0.005	-0.461	ns
Tractament (Pela) :Tipus Fulla (Jove)	-0.052	ns	0.203	ns	-2.892	0.005
Campanya 3: Tipus Fulla (Jove)2	-0.690	ns	-1.476	ns	-3.242	0.002
Tractament (Pela) :Campanya 3: Tipus Fulla (Jove)	0.219	ns	0.118	ns	2.141	0.04

El contingut relatiu d'aigua de les fulles (RWC) no es va veure afectat per la pela, la data en què es va fer el mostreig, el diàmetre dels arbres, la humitat del sòl o els valors inicials (valor inicial mig: $68.61 \pm 0.65\%$). Només va dependre del grau de maduresa de les fulles (Taula 3). A mitjans de juny i juliol, el RWC de les fulles joves era un 4% més elevat que el de les fulles velles ($74.77 \pm 0.84\%$, $69.22 \pm 0.43\%$, respectivament; Figura 15A).

La pela tampoc va afectar el potencial hídric dels arbres, només va tenir un efecte puntual en les alzines sureres mostrejades al setembre, tot i que, sorprenentment, els valors dels arbres pelats van ser lleugerament superiors als dels no pelats (-2.08 ± 0.14 MPa, -2.63 ± 0.12 MPa, respectivament) (Taula 3, Figura 15B). La data en què es va fer el mostreig sí que va influir en el potencial hídric, presentant les alzines sureres a mitjans de juliol els valors més baixos (-3.29 ± 0.05 MPa) (Taula 3, Figura 15B). En canvi, el tipus de fulla, el diàmetre dels arbres, la humitat del sòl o els valors inicials del paràmetre abans d'extreure el suro (valor inicial mig: -2.11 ± 0.07 MPa), no van fer variar significativament el potencial hídric dels arbres mostrejats (Taula 3).

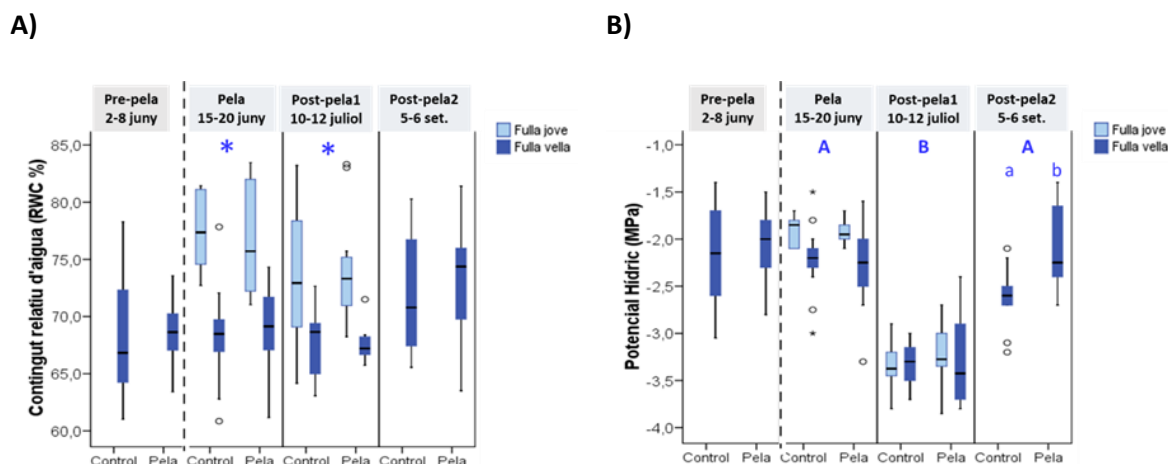


Figura 15. Paràmetres hídrics foliars mesurats en les alzines sureres: A) contingut relatiu d'aigua (RWC, %), i B) potencial hídric (MPa), considerant les dades obtingudes abans de la pela (pre-pela) i les obtingudes en els mostrejos de mitjans de juny (pela), mitjans de juliol (post-pela1) i principis de setembre (post-pela2), el tipus de fulla (vella i jove) i el tractament (control i pela). Diferents lletres majúscules indiquen diferències significatives entre els mostrejos pela, post-pela1 i post-pela2. L'asterisc (*) indica diferències significatives entre fulles velles i joves.

Igual que en el cas del RWC i el potencial hídric, la pela tampoc va tenir un efecte general sobre la conductància estomàtica (Taula 3), tot i que a mitjans de juliol, les fulles dels arbres pelats van mostrar valors de conductància estomàtica lleugerament més elevats que els controls, especialment en el cas de les fulles velles ($193.29 \pm 24.38 \text{ mmol H}_2\text{O/m}^2 \text{ s}$, $169.97 \pm 9.93 \text{ mmol H}_2\text{O/m}^2 \text{ s}$, respectivament) (Figura 15A) (cosa que explicaria la triple interacció observada (Taula 3)). Possiblement, la regulació estomàtica de les fulles velles dels arbres pelats era pitjor que la dels arbres control.

En relació a la data de mostreig, igual que en el cas del potencial hídric, la conductància estomàtica a mitjans de juliol va ser un 27% i un 29% més baixa que la mesurada a mitjans de juny o al setembre, respectivament (Figura 16A). Valors més baixos de potencial hídric i conductància estomàtica al juliol eren d'esperar, ja que va ser el mes més sec (només va ploure 4.6 L/m^2), més calorós (amb algun pic de 41.2°C) i amb més radiació solar (Figura 11).

El tipus de fulla també va repercutir en els valors de conductància estomàtica. Les fulles joves van presentar valors superiors en relació a les fulles velles ($323.58 \pm 19.85 \text{ mmol H}_2\text{O/m}^2 \text{ s}$, $272.80 \pm 7.40 \text{ mmol H}_2\text{O/m}^2 \text{ s}$, respectivament). Finalment, mentre la humitat del sòl i els valors inicials de conductància estomàtica no van influir en la resposta, el diàmetre dels arbres sí que va tenir un cert efecte, essent els arbres amb un diàmetre menor els que tendien a tenir valors de conductància estomàtica lleugerament més elevats (Figura 16B).

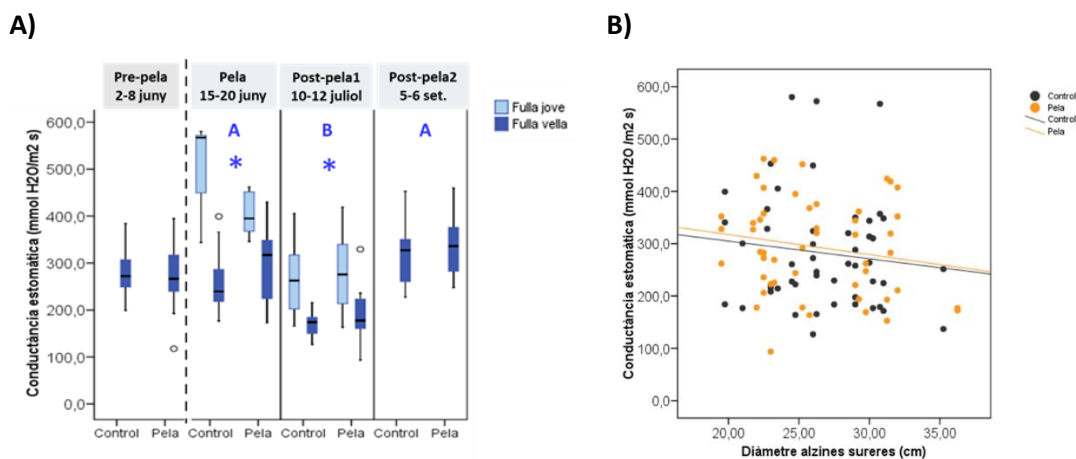


Figura 16. A) Conductància estomàtica (mmol H₂O/m² s) foliar de les alzines sureres estudiades, considerant el mostreig (mitjans de juny (pela), mitjans de juliol (post-pela1) i principis de setembre (post-pela 2)), el tipus de fulla (vella i jove) i el tractament (control i pela). Diferents lletres majúscules indiquen diferències significatives entre els diferents mostresos. L'asterisc (*) indica diferències significatives entre fulles velles i joves. B) Relació entre el diàmetre inicial de les alzines sureres mesurat a nivell del pit (cm) i la conductància estomàtica (mmol H₂O /m² s) dels arbres.

4.2.3. Contingut de clorofil·les i flavonols de les fulles

La pela no va afectar la temperatura de les fulles, ni tampoc el seu contingut en clorofil·les o flavonols (Taula 4, Figures 17 i 18). Tampoc vam trobar cap efecte del diàmetre de l'arbre, ni de la humitat superficial del sòl, sobre aquests paràmetres (Taula 4). D'acord amb l'augment en la temperatura ambiental, la temperatura de les fulles dels suros estudiats (controls i pelats) va anar augmentant des de principi de juny (pre-pela) fins al juliol (post-pela1; Taula 4), quan vam enregistrar una temperatura foliar mitjana de 35.35 ± 0.24 °C (Figura 17A). Concretament durant el mostreig de juliol, la temperatura de les fulles velles va ser significativament més alta que la de les fulles joves (36.08 ± 0.38 °C vs 34.91 ± 0.28 °C, respectivament; Figura 17A).

Tal i com esperàvem per les diferències en el seu grau de desenvolupament, les fulles joves van presentar un menor contingut en clorofil·la (Figura 17B) i flavonols (Figura 18A) que les fulles velles, especialment durant el segon mostreig de juny (moment en què van aparèixer; Taula 4, Figura 17B). Al setembre, quan ja no es distingien les fulles joves de les velles, vam enregistrar els valors més baixos de clorofil·les a les fulles (40.73 ± 0.77 vs 30.38 ± 1.05 unitats Dualux abans de la pela i al setembre, respectivament; Figura 17B).

Pel que fa a l'índex NBI (Clorofil·les/Flavonols), aquest va anar disminuint al llarg de l'estudi en paral·lel amb la disminució del contingut foliar en clorofil·la, essent els valors obtinguts al setembre els més baixos (Taula 4, Figura 18B). L'edat de la fulla també va afectar aquest índex, ja que les fulles joves van mostrar valors significativament inferiors als de les fulles velles (24.20 ± 0.39 vs 20.34 ± 0.52 , respectivament; Taula 4, Figura 18B), d'acord amb el seu menor contingut en clorofil·la (Figura 17B).

També vam observar un efecte significatiu dels valors inicials de NBI (mostreig pre-pela) sobre els valors obtinguts en la resta de mostrejos (Taula 4), cosa que indicaria que els arbres que inicialment tenien valors més elevats d'aquest índex van mantenir valors elevats al llarg de tot l'estudi.

Taula 4. Resum del model lineal mixt (GLMM) aplicat per a estudiar l'efecte de la pela, la data de mostreig, l'edat de la fulla, el diàmetre de l'arbre i la humitat superficial del sòl sobre la temperatura foliar, el contingut foliar en clorofil·la i flavonols i l'índex NBI (clorofil·les/flavonols) de les fulles, considerant els valors inicials de cada paràmetre (abans de la pela). Campanya 3, mostreig realitzat a mitjans de juliol. Campanya 4, mostreig realitzat a principis de setembre. La fila "Tractament (Pela)" de la taula inclou l'efecte de la Campanya 2 (mostreig realitzat a mitjans de juny) i de Fulla Vella. El valor de p (P -valor) considerat com a significatiu és $p < 0.05$. Els P -valors significatius es mostren en negreta, ns = no significatiu.

Bioquímica	Temperatura foliar		Clorofil·la		Flavonols		NBI	
	t valor	P-valor	t valor	P-valor	t valor	P-valor	t valor	P-valor
Tractament (Pela)	-0.049	ns	-1.179	ns	-0.958	ns	-0.812	ns
Campanya 3	3.269	0.002	-1.141	ns	0.256	ns	-1.311	ns
Campanya 4	1.775	(0.079)	-3.457	<0.001	-0.683	ns	-3.236	0.002
Tipus Fulla (Jove)	1.787	(0.077)	-7.178	<0.001	-3.307	0.001	-6.220	<0.001
Diàmetre arbre	-1.379	ns	-0.291	ns	0.823	ns	-0.779	ns
Humitat del sòl	-0.577	ns	0.236	ns	-0.041	ns	0.287	ns
Valors inicials del paràmetre	-0.193	ns	1.555	ns	0.997	ns	2.125	0.04
Tractament (Pela):Campanya 3	0.289	ns	0.317	ns	0.947	ns	-0.185	ns
Tractament (Pela):Campanya 4	-0.027	ns	-0.020	ns	-0.568	ns	-0.175	ns
Tractament (Pela): Tipus Fulla (Jove)	0.009	ns	1.004	ns	0.904	ns	0.708	ns
Campanya 3:Tipus Fulla (Jove)	-2.097	0.039	3.658	<0.001	0.760	ns	3.702	<0.001
Tractament (Pela):Campanya 3: Tipus Fulla (Jove)	-0.299	ns	-0.469	ns	-1.030	ns	-0.051	ns

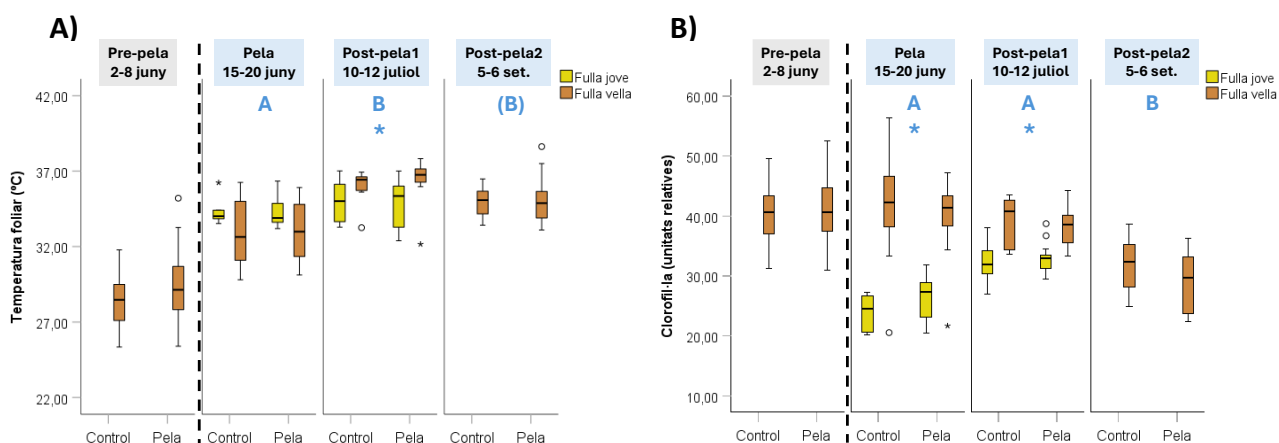


Figura 17. A) Temperatura (°C) i B) contingut en clorofil·la (unitats relatives Dualex) de les fulles de les alzines sureres estudiades, considerant les dades obtingudes abans de la pela (pre-pela) i les obtingudes en els mostrejos de mitjans de juny (pela), mitjans de juliol (post-pela1) i principi de setembre (post-pela 2), el tipus de fulla (vella i jove) i el tractament (control i pela). Diferents lletres majúscules indiquen diferències significatives entre els mostrejos pela, post-pela1 i post-pela2. L'asterisc (*) indica diferències significatives entre fulles velles i joves.

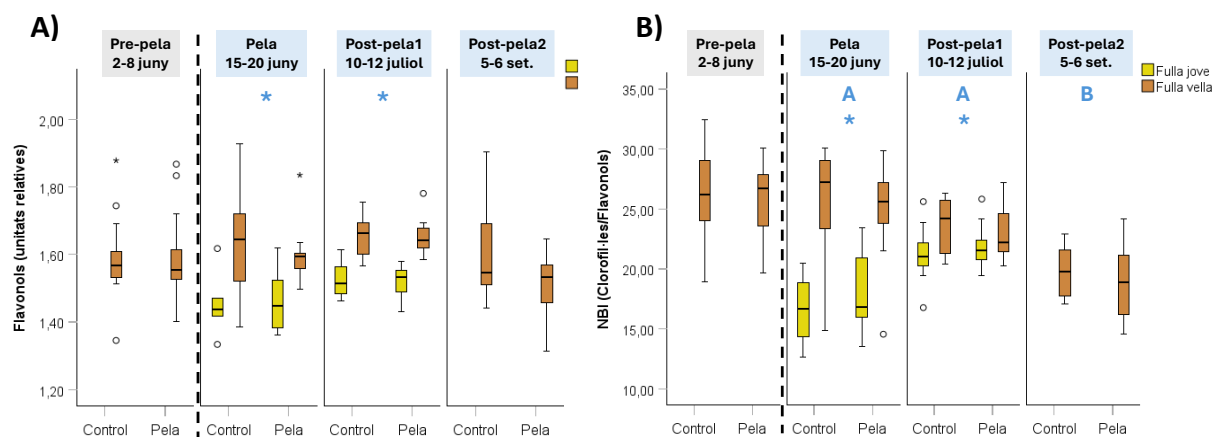


Figura 18. A) Contingut en flavonols (unitats relatives Dualex) i B) índex NBI (clorofil·les/flavonols) de les fulles de les alzines sureres estudiades, considerant les dades obtingudes abans de la pela (pre-pela) i les obtingudes en els mostrejos de mitjans de juny (pela), mitjans de juliol (post-pela1) i principi de setembre (post-pela 2), el tipus de fulla (vella i jove) i el tractament (control i pela). Diferents lletres majúscules indiquen diferències significatives entre els mostrejos pela, post-pela1 i post-pela2. L'asterisc (*) indica diferències significatives entre fulles velles i joves.

4.2.4. Eficiència fotoquímica (fluorescència de la clorofil·la)

Els paràmetres utilitzats per a avaluar l'eficiència fotoquímica (la qual ens indica l'estat de salut dels fotosistemes) són: el transport aparent d'electrons o ETR (reflecteix l'energia absorbida que es destina a la fotosíntesi), l'eficiència fotoquímica màxima o Fv/Fm (mesura la capacitat màxima de l'aparell fotosintètic per a processar la llum) i la dissipació de l'excés d'energia en forma de calor o NPQ (es duu a terme als fotosistemes per tal d'evitar o minimitzar el dany fotooxidatiu en condicions d'estrès).

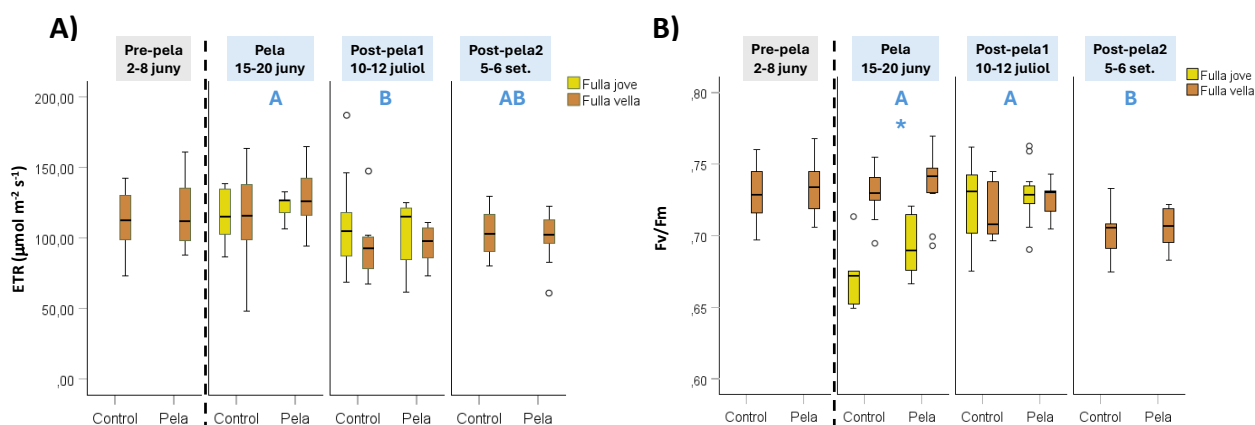


Figura 19. A) Transport aparent d'electrons (ETR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) i B) eficiència fotoquímica màxima (Fv/Fm) de les fulles de les alzines sureres estudiades, considerant les dades obtingudes abans de la pela (pre-pela) i les obtingudes en els mostrejos de mitjans de juny (pela), mitjans de juliol (post-pela1) i principi de setembre (post-pela 2), el tipus de fulla (vella i jove) i el tractament (control i pela). Diferents lletres majúscules indiquen diferències significatives entre els mostrejos pela, post-pela1 i post-pela2. L'asterisc (*) indica diferències significatives entre fulles velles i joves.

Un cop analitzades les dades, no es va detectar cap efecte significatiu de la pela sobre cap dels paràmetres relacionats amb l'eficiència fotoquímica (Taula 5, Figures 19, 20). Tampoc vam trobar cap efecte significatiu dels valors inicials dels diferents paràmetres, del diàmetre de l'arbre o de la humitat superficial del sòl sobre aquests paràmetres. En el cas del transport aparent d'electrons (ETR), sí que vam observar un efecte significatiu de la data de mostreig, ja que els valors a mitjans de juliol van ser un 15% inferiors en comparació amb els valors de juny (Taula 5, Figura 19A), coincidint amb les temperatures més altes del mes de juliol.

Taula 5. Resum del model lineal mixt (GLMM) aplicat per a estudiar l'efecte de la pela, la data de mostreig, l'edat de la fulla, el diàmetre de l'arbre i la humitat dels sòl sobre els paràmetres relacionats amb l'eficiència fotoquímica de les fulles (ETR o transport d'electrons, Fv/Fm o eficiència fotoquímica màxima i NPQ o dissipació de l'excés d'energia en forma de calor), considerant els valors inicials de cada paràmetre (abans de la pela). Campanya 3, mostreig realitzat del 10 al 12 de juliol. Campanya 4, mostreig realitzat els dies 5 i 6 de setembre. El valor de p (*P-valor*) considerat com a significatiu és $p < 0.05$. Els *P-valors* significatius es mostren en negreta, ns = no significatiu.

Eficiència fotoquímica	Transport d'electrons (ETR)		Eficiència fotoquímica màxima (Fv/Fm)		Dissipació de l'excés d'energia (NPQ)	
	t valor	P-valor	t valor	P-valor	t valor	P-valor
Tractament (Pela)	1.656	ns	1.181	ns	-0.395	ns
Campanya 3	-2.145	0.035	-0.848	ns	2.847	0.006
Campanya 4	-1.305	ns	-2.169	0.033	2.982	0.004
Tipus Fulla (Jove)	0.863	ns	-6.048	<0.001	1.289	ns
Diàmetre arbre	-0.132	ns	1.234	ns	-0.184	ns
Humitat del sòl	-0.395	ns	0.140	ns	0.889	ns
Valors inicials del paràmetre	1.442	ns	1.641	ns	0.227	ns
Tractament (Pela):Campanya 3	-0.715	ns	-0.273	ns	-0.442	ns
Tractament (Pela):Campanya 4	-0.455	ns	-0.502	ns	-1.407	ns
Tractament (Pela):Tipus Fulla (Jove)	-0.722	ns	1.002	ns	0.106	ns
Campanya 3:Tipus Fulla (Jove)	0.883	ns	4.739	<0.001	-0.680	ns
Tractament (Pela):Campanya 3: Tipus Fulla (Jove)	-0.273	ns	-0.718	ns	0.567	ns

Pel que fa a l'eficiència fotoquímica màxima (Fv/Fm) de les fulles, els valors mitjans obtinguts al llarg de l'estudi (Figura 19B) indiquen una certa fotoinhibició (reducció de la capacitat màxima de l'aparell fotosintètic per a processar la llum), ja que estan lleugerament per sota del rang que es considera òptim (0.75-0.85). Aquests valors van ser significativament més baixos al final de l'estudi (setembre) en comparació amb la resta de mostres (Taula 5, Figura 19B). La fotoinhibició va ser especialment marcada en el cas de les fulles joves que acabaven d'aparèixer durant el mostreig realitzat just després de la pela (valors mitjans de Fv/Fm en aquest mostreig: 0.683 ± 0.007 i 0.732 ± 0.003 en el cas de les fulles joves i velles, respectivament; Figura 19B).

La dissipació de l'excés d'energia en forma de calor (NPQ) de les fulles només es va veure afectada per la data de mostreig (Taula 5), ja que els valors van ser significativament més elevats en els últims dos mostrejos (juliol i setembre; Figura 20), d'acord amb l'augment de l'estrès ambiental al llarg de l'estiu.

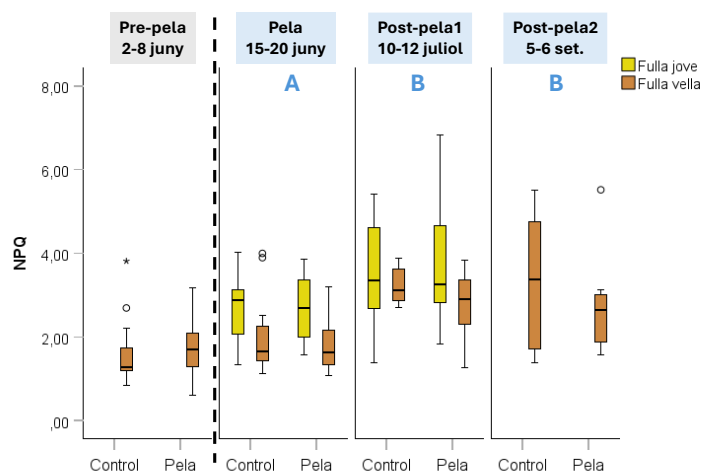


Figura 20. Dissipació de l'excés d'energia en forma de calor (NPQ) de les fulles de les alzines sureres estudiades, considerant les dades obtingudes abans de la pela (pre-pela) i les obtingudes en els mostrejos de mitjans de juny (pela), mitjans de juliol (post-pela1) i principi de setembre (post-pela 2), el tipus de fulla (vella i jove) i el tractament (control i pela). Diferents lletres majúscules indiquen diferències significatives entre els mostrejos pela, post-pela1 i post-pela2.

4.2.5. Respiració dels troncs

La respiració dels troncs, com a variable que integra part del metabolisme de la planta dels troncs i de les arrels, és el paràmetre estudiat que més va canviar durant els tres mesos d'experimentació i com a conseqüència de la pela del suro (Taula 6). No es van trobar diferències significatives entre els arbres control i els que havien de ser pelats en la campanya realitzada una setmana abans de la pela, cosa que indica una correcta selecció dels arbres per a realitzar aquest estudi. La respiració del tronc mesurada en els 10 primers minuts després de l'extracció del suro va augmentar a la zona pelada (part baixa del tronc) unes 5 vegades si ho comparem amb la zona no pelada dels mateixos arbres (part alta del tronc), amb els arbres control que no es van pelar, o amb les emissions dels mateixos arbres abans de ser pelats (Figura 21). La respiració d'aquestes zones pelades va anar disminuint progressivament al llarg de les campanyes, però sempre essent més elevada que les de les zones no pelades dels mateixos arbres o les dels arbres control. Fins i tot a la campanya realitzada tres mesos després de la pela, les zones pelades encara presentaven una respiració dels troncs tres vegades superior a la dels arbres control.

Independentment de l'efecte de la pela, la respiració dels troncs va presentar patrons espacials i temporals. Tots els arbres van presentar respiracions més altes a la base del tronc (~50 cm) que a més alçada (~150 cm) (també els arbres control). Aquestes respiracions també van presentar una estacionalitat marcada, amb emissions més altes al juny i juliol, i significativament més baixes al setembre. També es va observar un efecte molt important de la identitat de l'arbre, o en altres

paraules, arbres que presentaven emissions de tronc elevades abans de la pela van continuar tenint emissions elevades durant les successives campanyes de mostreig (i *viceversa*).

Taula 6. Resum del model lineal mixt (GLMM) aplicat per a estudiar l'efecte de la pela, l'alçada de la mesura dins d'arbre, la data de mostreig, el diàmetre de l'arbre, la humitat i la temperatura del sòl sobre la respiració dels troncs, considerant els valors inicials de respiració del tronc (abans de la pela) com a co-variable. Campanya pre-pela, mostreig realitzat el 29 de maig i 5-6 de juny. Campanya 1, mostreig realitzat el dia de la pela (8-9 de juny). Campanya 2, mostreig realitzat del 14 al 16 de juny. Campanya 3, mostreig realitzat el 10 i 11 de juliol. Campanya 4, mostreig realitzat el 14 i 15 de setembre. És important tenir present que per a estudiar la respiració dels troncs es va realitzar una campanya addicional el dia de la pela, i per tant, la numeració de les campanyes no coincideix amb les descrites per a l'estat hídric, morfologia i capacitat fotosintètica de les fulles. El valor de p (*P-valor*) considerat com a significatiu és $p < 0.05$. Els *P-valors* significatius es mostren en negreta, ns = no significatiu.

Respiració dels troncs		
	t valor	P-valor
Intercepte (Control, Baix, Campanya 1)	1.479	ns
Tractament (Pela)	9.522	< 0.001
Alçada (Dalt)	-10.801	< 0.001
Diàmetre arbre	0.514	ns
Respiració pre-pela	3.364	< 0.001
Temperatura del sòl	1.714	ns
Humitat del sòl	0.929	ns
Campanya 2	-0.575	ns
Campanya 3	-1.463	ns
Campanya 4	-4.084	< 0.001
Interaccions		
Temperatura : Humitat del sòl	-1.008	ns
Alçada (Dalt) : Campanya 2	1.536	ns
Alçada (Dalt) : Campanya 3	3.431	< 0.001
Alçada (Dalt) : Campanya 4	4.052	< 0.001
Tractament (Pela) : Campanya 2	-0.951	ns
Tractament (Pela) : Campanya 3	-2.064	0.040
Tractament (Pela) : Campanya 4	-2.281	0.023

La temperatura del sòl també va exercir un efecte positiu sobre la respiració dels troncs (marginalment significatiu), no així la humitat del sòl o el diàmetre dels arbres, que no semblaven tenir cap efecte sobre la respiració dels troncs (Taula 6).

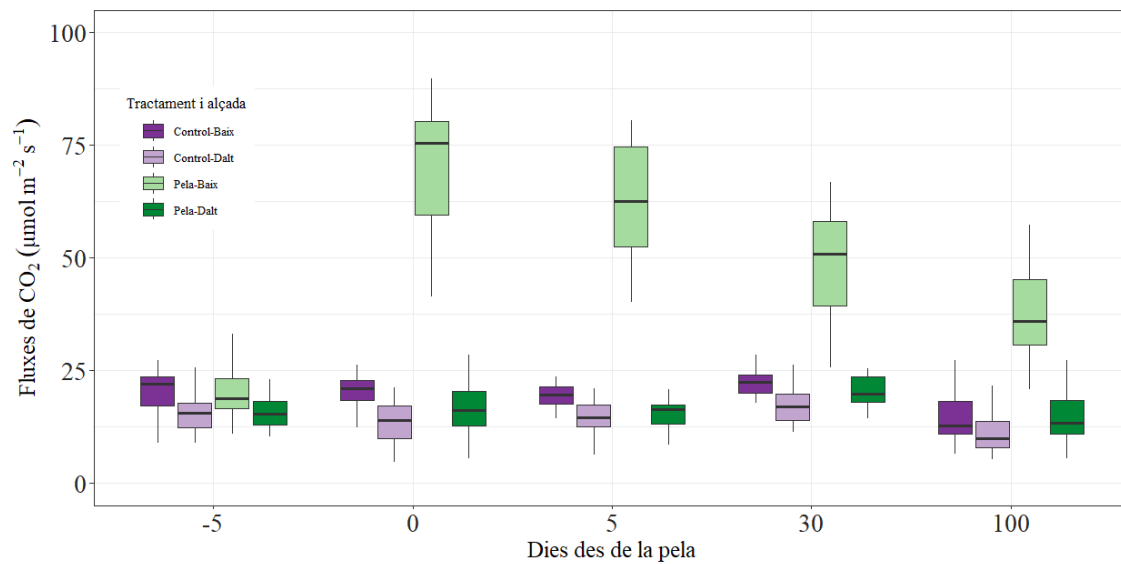


Figura 21. Evolució temporal de la respiració dels troncs agafant com a referència el dia de la pela (dia 0).

5. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

5.1. *Efecte de la pela*

Les fulles dels arbres pelats van ser, en general, més petites (juny i juliol) i gruixudes (juny, juliol i setembre) que les dels arbres control (Taula 2). La reducció de l'àrea foliar, juntament amb l'increment del gruix foliar, es considera un mecanisme per a fer front a condicions més seques, ja que redueix la radiació incident en les fulles i permet disminuir la transpiració. Per tant, en el cas dels arbres pelats, podria ser una estratègia per a compensar la pèrdua d'aigua produïda al tronc com a conseqüència de la pela (Costa-e-Silva i cols. 2021). Possiblement per això, no hem detectat un efecte significatiu de la pela sobre l'estat hídric dels arbres a l'estiu (Taula 3), d'acord amb Costa-e-Silva i cols. (2021). Aquests resultats contrasten amb els obtinguts en alguns estudis anteriors on l'extracció del suro sí que va afectar l'estat hídric de la planta (veure revisió Oliveira i Costa 2012).

El fet que la pela no hagi afectat l'estat hídric dels suros podria explicar la manca d'efectes observats al llarg del període d'estudi en els paràmetres d'eficiència fotoquímica o en la bioquímica de les fulles (Taules 4 i 5). Ara bé, no podem descartar un efecte de la pela sobre la fotosíntesi global dels arbres (com van trobar Costa-e-Silva i cols. 2021), ja que els arbres pelats podrien haver sacrificat més fulles que els controls per a compensar la pèrdua d'aigua provocada per l'extracció del suro, com van observar en arbres joves Fialho i cols. (2001).

La pela sí que va tenir un efecte molt marcat sobre la respiració dels troncs (emissions de CO₂, Taula 6, Figura 21). Les mesures de respiració del tronc fetes una setmana abans de la pela no diferien significativament entre els arbres control i els que serien pelats. Tanmateix, les mesures de respiració realitzades just després de la pela (en els primers 10 minuts després de l'extracció del suro) ens indicaven que la zona pelada dels arbres respirava fins a 5 vegades més que la zona no pelada dels mateixos arbres o que la zona basal dels arbres que no havien estat pelats (Figura 21). El fet de tenir una resposta tan immediata ens indica que l'increment de respiració està produït per l'eliminació física de la capa d'aïllament que limita la difusivitat dels gasos, més que per un increment de l'activitat metabòlica de la planta (que necessitaria un temps d'activació més elevat). Aquesta eliminació del suro faria que els teixits principals en la producció de CO₂ dels troncs (floema i fel·logen), o el teixit que transporta la saba carregada de CO₂ des del sòl (xilema) quedessin molt més exposats a l'atmosfera i, per tant, generessin moltes més emissions de CO₂, com s'ha vist en altres estudis semblants realitzats amb la mateixa espècie (Costa-e-Silva, 2021). Malgrat això, l'evolució temporal de la respiració del tronc després de la pela presentava unes diferències destacables en comparació amb els resultats de Costa-e-Silva (2021). En el seu cas, la respiració de tronc s'anava incrementant fins a arribar al seu màxim 4 dies després de la pela, i a partir de llavors, anava disminuint durant els següents 10 dies fins a tornar a valors semblants als pre-pela. En el nostre cas, els valors més alts van ser just després de la

pela, i la reducció de la respiració va ser molt més progressiva, amb emissions de les zones pelades encara superiors a les de les zones control 90 dies després de la pela. Aquests resultats ens indicarien que la sureda estudiada a Can Vilallonga tindria un temps de recuperació de les condicions pre-pela més perllongat, segurament per presentar una limitació hídrica més acusada que en el cas de l'estudi de Costa-e-Silva (2021) (menys precipitació [veure secció següent] i més densitat d'arbres que generaria més competència per l'aigua).

5.2. Efecte dels canvis en les condicions ambientals al llarg de l'estudi

Es considera que l'alzina surera necessita una precipitació mitjana anual igual o superior a 600 mm per a un desenvolupament equilibrat, essent 500 mm (100 mm a l'estiu) considerat el mínim (Pausas i cols. 2009). Si bé a la zona d'estudi la precipitació total de l'any 2022 va estar lleugerament per sobre d'aquests llindars mínims (517 mm la precipitació total i 143.6 mm la d'estiu), l'any 2023 (any en què es va dur a terme aquest estudi) la precipitació total va estar clarament per sota (401.7 mm), així com també la precipitació a l'estiu (98.8 mm). En concret, durant els mesos d'estiu del 2023, el juliol va ser el mes més sec i calorós, amb només 4.6 L/m² de precipitació i pics de temperatura de fins a 41.2 °C (Figura 11). Alhora també va ser el mes amb una major irradiació solar. Com a resultat, els suros estudiats van presentar els valors més baixos de potencial hídric durant aquest mes (entre -3 i -4 MPa, essent la mitjana -3.29 ± 0.05 MPa; Figura 15B), valors que estarien en la part baixa del rang de potencials hídrics mesurats en suros sans al camp (David i cols. 2007, Pereira i cols. 2009, Camilo-Alves i cols. 2017).

Les fulles dels suros mostrejats van aconseguir mantenir valors de contingut relatiu d'aigua (RWC) força elevats durant tot l'estudi (entre el 68 i el 75% de mitjana), incloent el juliol (Taula 3, Figura 15A), la qual cosa indica que els arbres van poder activar mecanismes per tal d'evitar perdre massa aigua. Un exemple d'aquests mecanismes seria el tancament estomàtic que vam observar durant el juliol (els valors de conductància estomàtica van ser un 27 i un 29% més baixos al juliol en comparació amb els de mitjans de juny o setembre, respectivament, Figura 16). El tancament estomàtic, a més a més d'evitar la deshidratació de les fulles, també redueix el risc de que es produeixi embolisme en els vasos conductors (Camilo-Alves i cols. 2017). Al llarg de l'estudi, també vam observar la pèrdua de fulles per part dels arbres, cosa que els permet reduir la superfície de transpiració, tal i com s'ha descrit en estudis previs (Pausas i cols 2009). De fet, les fulles de la surera, per ser un arbre perennifoli, tenen una vida mitjana curta, de només a l'entorn d'1 any (tot i que algunes fulles poden romandre a l'arbre fins a 3 anys), essent molt més curta que la d'altres quercínies, com ara l'alzina (*Q. ilex* subsp. *ilex*), les fulles de la qual sobreviuen entre 2 i 4 anys (amb una vida mitjana de 2.7 anys) o el garric (*Q. coccifera*), les fulles del qual poden arribar a durar 5-6 anys (Fialho i cols. 2001, Pausas i cols. 2009).

El tancament estomàtic observat durant el mes de juliol va tenir, però, una sèrie de conseqüències negatives per a la planta. Per una banda, una reducció de la transpiració redueix la capacitat de refredar les fulles. D'acord amb això, la màxima temperatura foliar es va enregistrar durant aquest mes (35.35 ± 0.24 °C de mitjana), coincidint amb el període de màxima temperatura de l'aire i màxima insolació (Figura 11). D'altra banda, el tancament estomàtic normalment implica una reducció de la fotosíntesi (ja que la planta no pot absorbir CO_2), cosa que estaria d'acord amb la disminució de la taxa de transport d'electrons (o ETR) de les fulles que es va observar durant aquest mes (Figura 19A). Sota aquestes circumstàncies, no tota l'energia capturada pels pigments cloroplàstics de les fulles pot ser utilitzada per a la fotosíntesi i, per tant, aquest excés d'energia absorbida pot danyar els fotosistemes en generar un estrès oxidatiu. Davant d'aquest fet, la planta pot activar diferents mecanismes de fotoprotecció.

Un mecanisme de fotoprotecció habitual en les plantes, també descrit en el suro (Pereira i cols. 2009), és la pèrdua de clorofil·la a les fulles per tal de reduir l'absorció de llum i, per tant, evitar l'estrès oxidatiu. Ara bé, en el nostre estudi, si bé vam observar una disminució en el contingut foliar de clorofil·la al setembre (Taula 4, Figura 17B), creiem que aquesta reducció estaria més relacionada amb l'aparició de fulles noves al juny (les quals tenien un menor contingut en clorofil·la). Un altre mecanisme que poden presentar les fulles per a evitar que l'excés d'energia danyi l'aparell fotosintètic és la seva dissipació en forma de calor (mesurada com a NPQ), la qual està associada a canvis en la quantitat de diversos carotenoides (Llorens i cols. 2002). Així, per exemple, Pereira i cols (2009) van estimar que més del 60% de l'energia absorbida per les fulles del suro a migdia va ser dissipada en forma de calor en un dia calorós de setembre. D'acord amb això, vam observar valors més alts de NPQ a les fulles dels suros estudiats en els mostres de juliol i setembre, en paral·lel a l'augment en l'aridesa i la reducció en el transport d'electrons (i, per tant, en l'activitat fotosintètica). Al setembre, també vam observar que les fulles eren més petites i gruixudes (Figura 13), cosa que també es considera un mecanisme de fotoprotecció, ja que la reducció de l'àrea foliar fa més eficient la dissipació de la calor, a més a més del control de la pèrdua d'aigua. Aquests canvis morfològics van implicar un augment en el pes específic foliar (relació entre la massa i l'àrea foliar o LMA), la qual cosa optimitzaria el guany de carboni per unitat d'aigua perduda per transpiració a les fulles (Pereira i cols. 2009).

Al llarg de tot l'estudi, però especialment al setembre, els valors d'eficiència fotoquímica màxima (F_v/F_m) van estar per sota del rang que es considera òptim (Figura 19B), cosa que indica una certa fotoinhibició (reducció de la capacitat màxima de l'aparell fotosintètic per a processar la llum). Cal considerar, però, que el fet que les fulles de les espècies mediterrànies presentin una certa fotoinhibició a migdia és un fenomen molt comú durant l'estiu, i sol ser transitori, ja que no implica un dany permanent als fotosistemes (Fleck i cols. 1998, Llorens i cols 2003, Camilo-Alves i cols. 2017, Verdaguer i cols 2018). El fet que, al llarg de tot l'estudi, les fulles dels suros no hagin modificat de

forma significativa el seu contingut en flavonols (un tipus de fenols amb funció antioxidant) (Taula 4, Figura 18A) reforça la idea de que els mecanismes de fotoprotecció van ser efectius i les fulles no van patir un estrès oxidatiu destacable.

La respiració dels troncs va experimentar una estacionalitat moderada (tret de la reducció de les emissions després del pic màxim post-pela en les zones pelades). Els arbres control van presentar unes emissions altes durant les campanyes del juny i juliol, i una lleugera reducció de les emissions al setembre (Figura 21), segurament produïda per una temperatura ambiental més baixa a les portes de la tardor que va fer reduir el metabolisme dels troncs i de les arrels (Teskey i cols. 2018). Una tònica general de totes les campanyes, des del juny abans de pelar fins a la darrera campanya de setembre, va ser que tots els arbres van presentar una respiració dels troncs més elevada a la base dels arbres (≈ 50 cm) que a més alçada (≈ 150 cm), amb independència de si els arbres estaven pelats o eren control. Aquest patró vertical està ben descrit a la bibliografia i s'explica per una major contribució a la base dels arbres del CO_2 provinent del sòl i transportat per la saba (Salomón i cols. 2021, Teskey i cols. 2018).

5.3. Efecte del diàmetre de l'arbre

El diàmetre de l'arbre (el qual podríem considerar un indicador de la seva edat) no va tenir cap efecte significatiu sobre la morfologia foliar, ni sobre els paràmetres relacionats amb l'eficiència fotoquímica o la bioquímica foliar. Pel que fa als paràmetres hídrics, el diàmetre de l'arbre només va afectar significativament la conductància estomàtica de les fulles, ja que els arbres (tant control com pelats) amb un menor diàmetre (per tant, més joves) van tendir a tenir conductàncies estomàtiques més elevades, tot i que això no va modificar el seu estat hídric (Taula 3). Aquest resultat contrasta amb la idea de que els arbres més joves, en tenir arrels menys profundes i no poder arribar a l'aigua freàtica, són més susceptibles a la sequera (Mendes i cols 2016; Camilo-Alves i cols. 2017, Mendes i cols. 2019, Costa & Cherubini 2021). Val a dir, però, que el rang de diàmetres del nostre estudi en comparació al d'aquests estudis previs va ser molt petit, ja que per exemple tots els arbres analitzats (excepte dos) tenien diàmetres inferiors al llindar que Mendes i cols. (2019) van fer servir per a definir els arbres petits ($\varnothing < 35$ cm). Per tant, hagués estat interessant mostrejar arbres amb diàmetres molt més grans per tal de comprovar aquesta relació entre diàmetre (o edat) de l'arbre i susceptibilitat a la sequera, però, malauradament, no hi havia arbres grans a la zona d'estudi.

5.4. Efecte de l'edat de la fulla

El desenvolupament de fulles noves durant el mes de juny va ser molt evident, tot i que no es va produir a tots els arbres. Aquestes fulles (que vam anomenar fulles joves) eren, en el segon mostreig de juny, més petites, més primes i amb un pes específic i una densitat foliar menor al de les fulles velles, tal i

com correspon al seu menor grau de desenvolupament. Al juliol, però, les fulles joves només es diferenciaven de les velles per ser més petites (Figura 13). A nivell bioquímic, les fulles joves van presentar un contingut en clorofil·la menor que el de les velles durant els mostrejos de juny i juliol (Figura 17B), però en el mostreig del setembre ja no es diferenciaven visualment entre sí. El desenvolupament de fulles noves al juny s'ha observat en d'altres estudis (Molinas i cols. 1989, Fialho i cols. 2001), tot i que el període de creixement més important de la surera sol ser a principi de primavera (abril-maig; Molinas i cols. 1989, Pinto i cols. 2011) i si les condicions ho permeten, l'arbre pot tornar a brotar a la tardor (finals de setembre-mitjans d'octubre; Molinas i cols. 1989, Oliveira & Costa 2012).

Pel que fa als paràmetres hídrics, tant en el segon mostreig de juny com en el mostreig de juliol, les fulles joves van mostrar un contingut relatiu d'aigua més elevat que les fulles velles ($74.77 \pm 0.84\%$ vs $69.22 \pm 0.43\%$, respectivament), així com també una major conductància estomàtica ($323.58 \pm 19.85 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ vs $272.80 \pm 7.40 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivament), cosa que explicaria la seva menor temperatura foliar durant el mes de juliol (una major transpiració en aquestes fulles facilitaria el seu refredament). La reducció de la conductància estomàtica amb l'edat foliar s'ha observat en molts estudis (per ex. Patakas i cols. 1997, Alonso-Forn i cols. 2022). De tota manera, en el nostre estudi, les fulles joves no van mostrar un major transport d'electrons (Figura 19A), malgrat tenir un millor estat hídric i una conductància estomàtica més elevada. De fet, van presentar els valors més baixos d'eficiència fotoquímica màxima (F_v/F_m) en el mostreig realitzat durant la segona meitat de juny (Figura 19B), possiblement degut a que estaven en un estadi inicial del seu desenvolupament. Els seus valors més baixos de flavonols (Figura 18A) corroborarien aquesta idea, ja que la síntesi de flavonols competeix directament amb la síntesi de proteïnes que es produeix en els teixits en formació (Laitinen i cols 2002).

Un paràmetre que seria interessant avaluar en futurs estudis és l'índex d'àrea foliar dels suros per tal de determinar si la superfície total de fulles de la capçada dels arbres es veu afectada per la pela. En coincidir l'extracció del suro amb el moment del desenvolupament de fulles noves, podria succeir que els arbres pelats al juny haguessin de dedicar les seves reserves de carboni a regenerar la capa de suro i, per tant, no poguessin invertir tant en produir fulles noves. Si això passés, la reducció en la biomassa foliar i/o el fet de no poder regenerar les fulles podria tenir repercussions a nivell de la capacitat fotosintètica global de l'arbre i, per tant, a la llarga, podria repercutir sobre la seva capacitat de creixement, reproducció, defensa, etc. Així doncs, en futurs projectes de recerca, seria molt interessant abordar tots aquests aspectes relacionats amb la interacció entre la pela i el balanç de carboni a nivell d'arbre per a poder descartar afectacions de la pela a llarg termini sobre la "salut" dels suros.

6. CONCLUSIONS

Els resultats indiquen que la pela, a curt termini, no va augmentar l'estrès fisiològic de les fulles del suro, ja que no va afectar el seu estat hídric, la seva eficiència fotoquímica, o el seu contingut en clorofil·les i flavonols. L'únic canvi observat va ser que en els arbres pelats les fulles van passar a ser més petites i gruixudes en comparació amb les dels arbres no pelats, cosa que es considera una estratègia per a no perdre tanta aigua. En canvi, la pela sí que va afectar l'emissió de CO₂ dels troncs, augmentant fins a 5 vegades en comparació amb la dels no pelats o amb la zona no pelada del mateix arbre. Aquest augment es relacionaria amb la disminució de l'efecte "tap" de la capa de suro i amb un augment del metabolisme lligat a la cicatrització i formació de nou fel·lema, la qual cosa explicaria que al cap de 90 dies la diferència fos visible, encara que no tant accentuada. És important destacar que la manca general d'efecte de la pela en l'estat hídric i fisiològic de les alzines sureres i l'increment de la respiració dels troncs ha estat només estudiat en els primers 90 dies després de la pela, i que caldrien estudis a escales temporals més llargues per avaluar l'efecte de la pela en les poblacions d'alzines sureres.

Els suros estudiats van mostrar els valors de potencial hídric més baixos durant el juliol, el mes més càlid i sec, però van poder mantenir un bon estat hídric de les fulles. Per aconseguir-ho van disminuir la pèrdua d'aigua tancant estomes, van reduir el nombre de fulles velles i van produir fulles noves més esclerofil·les (és a dir, més adaptades a la sequera). Al juliol també es van enregistrar els valors més elevats de respiració dels troncs dels arbres control, d'acord amb el que s'esperaria si tenim en compte que va ser el mes amb les temperatures més altes.

El diàmetre de l'arbre (que podríem considerar un indicador de la seva edat) no va afectar cap dels paràmetres estudiats, possiblement perquè es va treballar amb arbres amb un rang diametral bastant reduït (arbres amb diàmetres molt semblants), cosa que suggereix que els arbres mostrejats tenien edats molt similars.

La coincidència temporal entre la pela, la pèrdua de fulles velles i el desenvolupament de fulles noves podria comportar una competència pels recursos que es podria traduir en una disminució de la biomassa foliar i, per tant, de les reserves de carboni dels arbres pelats. Aquest fet podria reduir, a llarg termini, la seva capacitat de resposta a l'estrès. Per això, seria important realitzar nous estudis que permetessin clarificar aquest aspecte.

7. REFERÈNCIES

- Acácio V, Holmgren M, Rego F, Moreira F, Mohren GMJ (2009). Are drought and wildfires turning Mediterranean cork oak forests into persistent shrublands? *Agroforestry Systems* 76: 389-400.
- Alonso-Forn D, Peguero-Pina JJ, Ferrio JP, García-Plazaola JI, Martín-Sánchez R, Niinemets Ü, Sancho-Knapik D, Gil-Pelegrín E (2022). Cell-level anatomy explains leaf age-dependent declines in mesophyll conductance and photosynthetic capacity in the evergreen Mediterranean oak *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia*. *Tree Physiology* 42: 1988-2002.
- Banqué M, Grau A, Martínez-Vilalta J, Vayreda J (2013). Informe CANVIBOSC: Vulnerabilidad de las especies forestales al cambio climático. CREA. Oficina Catalana del Canvi Climàtic.
- Bates D, Mächler M, Bolker B, & Walker S (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67: 1–48.
- Bishara, A. J., & Hittner, J. B. (2012). Testing the significance of a correlation with nonnormal data: Comparison of Pearson, Spearman, transformation, and resampling approaches. *Psychological Methods*, 17(3), 399–417.
- Brasier CM (1996). *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. *Ann Sci For* 53: 347-358.
- Bugalho MN, Caldeira MC, Pereira JS, Aronson J, Pausas JG (2011). Mediterranean cork oak savannas require human use to sustain biodiversity and ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(5): 278-286.
- Camarero J, Franquesa M, Sangüesa-Barreda G (2015). Timing of drought triggers distinct growth responses in holm oak: implications to predict warming-induced forest defoliation and growth decline. *Forests* 6: 1576-1597.
- Camilo-Alves CSP, Vaz M, Esteves Da Clara MI, De Almeida Ribeiro NM (2017). Chronic cork oak decline and water status: new insights. *New Forests* 48: 753-772.
- Caritat A, Gutiérrez E, Molinas M (2000). Influence of weather on cork-ring width. *Tree Physiology* 20: 893-900.
- Carnicer J, Coll M, Ninyerola M, Pons X, Sanchez G, Peñuelas J (2011). Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108: 1474-1478.
- Cavender-Bares J, Cortes P, Rambal S, Joffre R, Miles B, Rocheteau A (2005). Summer and winter sensitivity of leaves and xylem to minimum freezing temperatures: a comparison of co-occurring Mediterranean oaks that differ in leaf lifespan. *New Phytologist* 168: 597-612.
- Correia OA, Oliveira G, Martins-Loução MA, Catarino FM (1992). Effects of bark stripping on the water relations of *Quercus suber* L. *Sci. Gerundensis* 18: 195–204.
- Correia RA, Bugalho MN, Franco AMA, Palmeirim JM (2018). Contribution of spatially explicit models to climate change adaptation and mitigation plans for a priority forest habitat. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 23: 371-386.

- Costa A, Pereira H & Oliveira Â (2002). Influence of climate on the seasonality of radial growth of cork oak during a cork production cycle. *Annals of Forest Science* 59(4): 429–437.
- Costa A, Nunes C, Spiecker H, Graça J (2015). Insights into the Responsiveness of Cork Oak (*Quercus suber* L.) to Bark Harvesting. *Economic Botany* 69(2): 171–184.
- Costa A, Barbosa I, Roussado C, Graça J, Spiecker H (2016). Climate response of cork growth in the Mediterranean oak (*Quercus suber* L.) woodlands of southwestern Portugal. *Dendrochronologia* 38: 72–81.
- Costa A, Cherubini P (2021). Is Cork Growth a Reliable Proxy for Stem Diameter Growth in Cork Oak (*Quercus suber* L.)? Implications for Forest Management under Climate Change in Mediterranean Regions. *Applied Sciences* 11 (11998): 1–13.
- Costa-e-Silva F, Correia AC, Pinto CA, David JS, Hernandez-Santana V, David TS (2021). Effects of cork oak stripping on tree carbon and water fluxes. *Forest Ecology and Management* 486: 118966.
- David TS, Ferreira MI, Cohen S, Pereira JS, David JS (2004). Constraints on transpiration from an evergreen oak tree in southern Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology* 122: 193–205.
- David TS, Henriques MO, Kurz-Besson C, Nunes J, Valente F, Vaz M, Pereira JS, Siegwolf R, Chaves MM, Gazarini LC, David JS (2007). Water-use strategies in two co-occurring Mediterranean evergreen oaks: Surviving the summer drought. *Tree Physiology*, 27(6): 793–803.
- David TS, Pinto CA, Nadezhdina N, Kurz-Besson C, Henriques MO, Quilhó T, Cermak J, Chaves MM, Pereira JS, David JS (2013). Root functioning, tree water use and hydraulic redistribution in *Quercus suber* trees: A modeling approach based on root sap flow. *Forest Ecology and Management* 307: 136–146.
- De la Cruz AC, Gil PM, Fernández-Cancio A, Minaya M, Navarro-Cerrillo RM, Sánchez-Salguero R, Grau JM (2014). Defoliation triggered by climate induced effects in Spanish ICP Forests monitoring plots. *Forest Ecology and Management* 331: 245–255.
- Dias AC, Boschmonart-Rives J, González-García S, Demertzi M, Gabarrell X, Arroja L (2014). Analysis of raw cork production in Portugal and Catalonia using life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(12).
- Díaz-Delgado R, Lloret F, Pons X *et al* (2002). Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires. *Ecology* 83: 2293–2303
- Duque-Lazo J, Navarro-Cerrillo RM, Ruíz-Gómez FJ (2018). Assessment of the future stability of cork oak (*Quercus suber* L.) afforestation under climate change scenarios in Southwest Spain. *Forest Ecology and Management* 409: 444–456.
- Fernández-Cancio A, Sánchez-Salguero R, Gil PM, Manrique Menéndez E, Fernández Fernández R, Navarro-Cerrillo RM (2012). Efectos del cambio climático sobre la distribución de los alcornoques españoles. Una aproximación fitoclimática para la futura gestión. *Ecosistemas* 21(3): 50–62.
- Fialho C, Lopes F, Pereira H (2001). The effect of cork removal on the radial growth and phenology of young cork oak trees. *Forest Ecology and Management* 141: 251–258.

- Fleck I, Hogan KP, Llorens L, Abadía A, Aranda X (1998). Photosynthesis and photoprotection in *Quercus ilex* resprouts after fire. *Tree Physiology* 18: 607-614.
- Gea-Izquierdo G, Martín-Benito D, Cherubini P, Canellas I (2009). Climate-growth variability in *Quercus ilex* L. west Iberian open woodlands of different stand density. *Ann. For. Sci.* 66 (8): 802.
- Godinho S, Guiomar N, Machado R, Santos P, Sá-Sousa P, Fernandes JP, Neves N, Pinto-Correia T (2016). Assessment of environment, land management, and spatial variables on recent changes in montado land cover in southern Portugal. *Agroforestry Systems* 90(1): 177–192.
- Gómez-Aparicio L, Ibáñez B, Serrano MS, De Vita P, Ávila JM, Pérez-Ramos IM, García LV, Esperanza Sánchez M, Marañón T (2012). Spatial patterns of soil pathogens in declining Mediterranean forests: Implications for tree species regeneration. *New Phytologist* 194(4): 1014–1024.
- Hutchinson GL & Mosier AR (1981). Improved Soil Cover Method for Field Measurement of Nitrous Oxide Fluxes. *Soil Science Society of America Journal* 45(2): 311–316. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500020017x>
- IPCC (2021). In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (eds Masson-Delmotte, V. et al.). Cambridge University Press.
- Jeffrey L, Maher D, Tait D, Johnston S (2020). A Small Nimble In Situ Fine-Scale Flux Method for Measuring Tree Stem Greenhouse Gas Emissions and Processes (S.N.I.F.F). *Ecosystems* 23. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00496-6>
- Knapic S, Louzada JL, Leal S, Pereira H (2007). Radial variation of wood density components and ring width in cork oak trees. *Annals of Forest Science* 64(2): 211–218.
- Kurz-Besson C, Otieno D, Lobo do Vale R, Siegwolf R, Schmidt M, Herd A, Nogueira C, Soares David T, Soares David J, Tenhunen J, Santos Pereira J, Chaves M (2006). Hydraulic lift in cork oak trees in a savannah-type Mediterranean ecosystem and its contribution to the local water balance. *Plant and Soil* 282: 361-378.
- Kurz-Besson C, Lobo-do-Vale R, Rodrigues ML, Almeida P, Herd A, Grant OM, Soares David T, Schmidt M, Otieno D, Keenan TF, Gouveia C, Mériaux C, Chaves MM, Pereira JS (2014). Cork oak physiological responses to manipulated water availability in a Mediterranean woodland. *Agricultural and Forest Meteorology* 184: 230-242.
- Kuznetsova A, Brockhoff PB, Christensen RH (2017). lmerTest Package : Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82, 1–26.
- Laitinen M-L, Julkunen-Tiitto R, Rousi M (2002). Foliar phenolic composition of European white birch during bud unfolding and leaf development. *Physiologia Plantarum* 114: 450-460.
- Leal S, Nunes E, Pereira H (2008). Cork oak (*Quercus suber* L.) wood growth and vessel characteristics variations in relation to climate and cork harvesting. *European Journal of Forest Research* 127(1): 33–41.
- Leite C, Oliveira V, Lauw A, Pereira H (2019). Cork rings suggest how to manage *Quercus suber* to mitigate the effects of climate changes. *Agricultural and Forest Meteorology* 266–267: 12–19.

- Leite C, Oliveira V, Miranda I, Pereira H (2020). Cork oak and climate change: Disentangling drought effects on cork chemical composition. *Scientific reports* 10: 7800.
- Lenth RV (2024). *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means* [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Llorens L, Aranda X, Abadía A, Fleck I (2002). Variations in *Quercus ilex* chloroplast pigment content during summer stress: involvement in photoprotection according to principal component analysis. *Functional Plant Biology* 29: 81-88.
- Llorens L, Peñuelas J, Estiarte M (2003). Ecophysiological responses of two Mediterranean shrubs, *Erica multiflora* and *Globularia alypum*, to experimentally drier and warmer conditions. *Physiologia Plantarum* 119: 231-243.
- López-Tirado J & Hidalgo PJ (2016). Predictive modelling of climax oak trees in southern Spain: insights in a scenario of global change. *Plant Ecology* 217(4): 451–463.
- Matías L, Abdelaziz M, Godoy O, Gómez-Aparicio L (2019). Disentangling the climatic and biotic factors driving changes in the dynamics of *Quercus suber* populations across the species' latitudinal range. *Diversity and Distributions* 25(4): 524–535.
- Mendes MP, Ribeiro L, David TS, Costa A (2016). How dependent are cork oak (*Quercus suber* L.) woodlands on groundwater? A case study in southwestern Portugal. *Forest Ecology and Management* 378: 122–130.
- Mendes MP, Cherubini P, Plieninger T, Ribeiro L, Costa A (2019). Climate effects on stem radial growth of *Quercus suber* L.: Does tree size matter? *Forestry* 92(1): 73–84.
- Molinas M, Oliva M, Vazquez P (1989). Organización y variaciones estacionales del ápice vegetativo del alcornoque. *Scientia Gerundensis* 15: 39-52.
- Moreira F, Duarte I, Catry F, Acácio V (2007) Cork extraction as a key factor determining post-fire cork oak survival in a mountain region of southern Portugal. *For Ecol Manage* 253: 30–37.
- Mundet R, Baiges T, Beltrán M, Torrell A (2018). Guía de recomendaciones y medidas de adaptación al cambio climático en la gestión de *Quercus suber*. Proyecto Life+SUBER.
- Oliveira G, Correia OA, Martins-Loução MA, Catarino FM (1992). Water relations of cork-oak (*Quercus suber* L.) under natural conditions. *Vegetatio* 99-100: 199-208.
- Oliveira G, Werner C, Correia O (1996). Are ecophysiological responses influenced by crown position in cork-oak? *Annals of Forest Science* 53: 235-241.
- Oliveira G & Costa A (2012). How resilient is *Quercus suber* L. to cork harvesting? A review and identification of knowledge gaps. *Forest Ecology and Management* 270: 257-272.
- Oliveira V, Lauw A, Pereira H (2016). Sensitivity of cork growth to drought events: insights from a 24-year chronology. *Climatic Change* 137: 261-274.
- Palma JHN, Paulo JA, Pacheco Faías S, Garcia-Gonzalo J, Borges JG, Tomé M (2015). Adaptive management and debarking schedule optimization of *Quercus suber* L. stands under climate change: case study in Chamusca, Portugal. *Reg Environ Change* 15: 1569-1580.

- Pausas JG (1997). Resprouting of *Quercus suber* in NE Spain after fire. *J Veg Sci* 8:703–706.
- Pausas JG, Pereira JS, Aronson J (2009). The tree. In: Aronson J, Pereira JS, Pausas JG (eds) *Cork oak woodlands on the edge*. Island Press, Washington, DC, USA
- Patakas A, B Noitsakis, D Stavrakas (1997). Water relation parameters in *Vitis vinifera* L in drought period. Effects of leaf age. *Agronomie* 17 (3): 129-138.
- Peñuelas J, Lloret F, Montoya R (2001). Severe drought effects on Mediterranean woody flora in Spain. *For Sci* 47: 214–218.
- Pereira JS, Kurz-Besson C, Chaves MM (2009). Copping with drought. In: Aronson J, Pereira JS, Pausas JG (eds) *Cork oak woodlands on the edge*. Island Press, Washington, DC, USA
- Pinto CA, Henriques MO, Figueiredo JP, David JS, Abreu FG, Pereira JS, Correia I, David TS (2011). Phenology and growth dynamics in Mediterranean evergreen oaks: Effects of environmental conditions and water relations. *Forest Ecology and Management* 262: 500-508.
- Pumpanen J, Kolari P, Ilvesniemi H, Minkinen K, Vesala T, Niinistö S, Lohila A, Larmola T, Morero M, Pihlatie M, Janssens I, Yuste JC, Grünzweig JM, Reth S, Subke J-A, Savage K, Kutsch W, Østreng G, Ziegler W, Anthoni P, Lindroth A, Hari P (2004). Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Meteorology* 123(3–4): 159–176.
- R Core Team (2024). A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rheault, K., Christiansen, J. R., & Larsen, K. S. (2024). goFlux: A user-friendly way to calculate GHG fluxes yourself, regardless of user experience. *Journal of Open Source Software*, 9(96), 6393.
- Salomón SL, Roo LD, Oleksyn J, Steppe K (2021) Mechanistic drivers of stem respiration: A modelling exercise across species and seasons. *Plant, Cell & Environment* 45 (4): 1270-1285
- Sánchez ME, Caetano P, Ferraz J, Trapero A (2002). Phytophthora disease of *Quercus ilex* in south-western Spain. *Forest Pathology* 32(1): 5–18.
- Sierra-Pérez J, Boschmonart-Rives J, Gabarrell X (2015). Production and trade analysis in the Iberian cork sector: Economic characterization of a forest industry. *Resources, Conservation and Recycling* 98: 55–66.
- Stocker TF, Qin D, Plattner G-K i cols. (2013) *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Teskey RO, McGuire MA, Bloemen J, Aubrey DP, Steppe K (2018). Respiration and CO₂ Fluxes in Trees In: Tcherkez G, Ghashghaie J (eds) *Plant Respiration: Metabolic Fluxes and Carbon Balance. Advances in Photosynthesis and Respiration*, vol 43. Springer.
- Tiberi R, Branco M, Bracalini M, Croci F, Panzavolta T (2016). Cork oak pests: a review of insect damage and management. *Annals of Forest Science* 73(2): 219–232.

- Vessella F, López-Tirado J, Simeone MC, Schirone B, Hidalgo PJ (2017). A tree species range in the face of climate change: cork oak as a study case for the Mediterranean biome. *European Journal of Forest Research* 136(3): 555–569.
- Verdaguer D, Molinas M (1992). Anatomía y caracterización del sistema radicular del alcornoque. *SCIENTIA gerundensis* 18: 39-51.
- Verdaguer D, Díaz-Guerra L, Font J, González JA, Llorens L (2018). Contrasting seasonal morphological and physio-biochemical responses to UV radiation and reduced rainfall of two mature naturally growing Mediterranean shrubs in the context of climate change. *Environmental and Experimental Botany* 147: 189-201.