ऋतुकाले शुष्केषु उष्णकटिबंधीयवनवृक्षेषु वियुग्मितफेनोलॉजी तथा PSII तापीयप्लास्टिसिटी

राकेश तिवारी [1,2,3] *, प्रतिभा टी. भगवद [2] , शिव नायक एच [2] , रक्षा जी होसामणि [2] , प्रकाश एन [2] , जयनाथ बाबू एम एस [2,3] , श्रीलोक बी एस [2] , मधुर एम एम [2] , सगरा जी [2] , थारुन नाइक [2] , अमानी खानुम सूर [2 , 2] . विजयश्री एन [2] , लवन्य बी एस [2] , किशोर टी. जी [2] , मधुसुधन एन [2] , महेश के पाटिल [2, 3] , नन्द अप्पाजी [2, 3, 4] , सोमशेखर आचार केजी [5] , बसवराजप्पा एसएच [2] , रॉबर्ट मुस्कारेला [1] , योगेन्द्र कम्बलागेरे [2, 3]

[१] वनस्पति पारिस्थितिकी एवं विकास, उप्साला विश्वविद्यालये, स्वीडन

[२] पर्यावरण विज्ञान में पीजी अध्ययन एवं अनुसन्धान विभाग, कुवेम्पू विश्वविद्यालय, भारत

[३] एन.वी.केन्द्रं जलवायुपरिवर्तनं स्थायित्वसमाधानं च, गोवा, भारतम्

[४] जैवविविधता शिक्षा तथा अनुसन्धान प्रयोगशाला, FORT, Shivamogga, India

[५] वनस्पति विज्ञान विभाग, आईडीएसजी शासकीय महाविद्यालय: चिक्कमगलूरु, भारत

* संवाददाता लेखक (ईमेल: shimogarakesh@gmail.com)

पूर्णा लेखः कन्नडभाषायां संस्कृतभाषायां च Supporting section S1 and S2 इत्यत्र उपलभ्यते ।

मूर्त

प्रकाशप्रणाली II (PSII) तापसहिष्णुतायां मौसमीप्लास्टिसिटी व्यापकरूपेण उष्णकटिबंधीयवृक्षेषु पत्रस्य फेनोलॉजिकलरणनीतिं निरीक्षयति इति कल्प्यते, यत्र सदाहरिद्राणि वर्षपर्यन्तं तापसहिष्णुतां नियमितं कुर्वन्ति तथा च पतझड़प्रजातयः शारीरिकसमायोजनस्य अपेक्षया फेनोलॉजिकलपरिहारस्य उपरि अवलम्बन्ते इति अपेक्षा अस्ति तथापि विविधसह-उपस्थितजातीयानां मध्ये तथा शारीरिकरूपेण महत्त्वपूर्णस्य आर्द्र-उत्तर-आर्द्र-संक्रमणस्य पारम् अनुभवजन्यपरीक्षाः दुर्लभाः एव सन्ति । अत्र, वयं आर्द्रस्य समये मध्यपश्चिमघाट्स्, भारतस्य ऋतुकाले शुष्क उष्णकटिबंधीयवने उत्तराधिकारप्रवणतां व्याप्य सदाहरिद्रा, अर्धसदाहरिद्रा, पर्णपाती आदतेषु विस्तृतेषु 27 सह-उपस्थितवृक्षजातीयेषु PSII तापसहिष्णुताप्रारम्भस्य (T_5), क्षतिमध्यबिन्दुस्य (T_{50}), क्षतिविस्तारस्य (DW) च *परिमाणं कुर्मः* (मध्यं अधिकतमं वायुतापमानं २७.५°C) तथा आर्द्रोत्तर (३१.६°C) अवधिः – एकः चरणः यदा तापः अनावृष्टिः च - प्रेरितः वृद्धावस्थातनावः प्लास्टिसिटीसंकेतं न संमिश्रयति फेनोलॉजी-आधारित-अनुमानानाम् विपरीतम्, प्रायः 4°C ऋतु-तापनस्य पारं PSII प्लास्टिसिटी न तु पत्र-अभ्यासेन संरचिता आसीत्, न च उत्तराधिकार-स्थित्या T_5 (लगभग +1.7 °C) तथा T_{50} (लगभग +0.9°C) इत्येतयोः द्वयोः अपि आर्द्रकालात् आर्द्र-उत्तर-कालपर्यन्तं महत्त्वपूर्णं वृद्धिः अभवत्, परन्तु प्लास्टिसिटी बहुधा प्रजाति - विशिष्टं परिवर्तनशीलं च आसीत्, यत्र सदाहरिद्रा-पर्णपाती-जातयः समानरूपेण अनुकूलतां प्राप्नुवन्ति स्म PSII प्लास्टिकप्रतिक्रियातः फेनोलॉजिकल-रणनीतेः एतत् वियुग्मनं सूचयति यत् उष्णता-सहिष्णुता-विनियमनं अनावृष्टि-परिहार-फेनोलॉजीतः बहुधा स्वतन्त्रतया कार्यं करोति; पर्णपातीजातयः केवलं पत्रपातस्य तापसहिष्णुतां बहिः न ददति, न च सदाहरिद्राणि तापनसंक्रमणकाले PSII स्थिरीकरणे असमानुपातिकरूपेण निवेशं कुर्वन्ति *टी* ५ द्वारा गृहीतः निवारण-विरुद्ध-सहिष्णुता-व्यापारः ∝ DW सम्बन्धः ऋतुषु संरक्षितः आसीत्, यद्यपि आर्द्र-उत्तर-स्थितौ अस्मिन् अक्षे सदाहरिद्रा-पर्णपाती-जातयः विचलिताः आसन् । T_{50} आधारितं तापसुरक्षामार्जिनं एकरूपेण बृहत् आसीत्, परन्तु T_5 -आधारितं मार्जिनं कार्यात्मकरूपेण दुर्बलं उपसमूहं चिनोति स्म: विलम्बेन उत्तराधिकारी सदाहरिद्राणि (*Saraca asoca* , *Ficus* spp.) तथा *Careya arborea* , पूर्वमेव ऋतुकालीनतापसीमायाः समीपे कार्यं

कुर्वन्ति । एते परिणामाः अपेक्षां चुनौतीं ददति यत् पत्राभ्यासः PSII तापीयरणनीत्याः विश्वसनीयः प्रॉक्सी अस्ति तथा च एतत् प्रकाशयन्ति यत् व्यापककार्यात्मकसमूहीकरणस्य अपेक्षया प्रजातिपरिचयः SDTFs मध्ये ऋतुसंक्रमणेषु PSII तापसहिष्णुतायां प्लास्टिसिटी चालयति, उष्णकटिबंधीयवनेषु तापनदुर्बलतायाः लक्षणाधारितपूर्वसूचनानां प्रत्यक्षनिमित्तानि च।

कीवर्ड: PSII, तापसहिष्णुता, फेनोलॉजी, उष्णकटिबंधीयवनं, वृक्षाः

आमुख

वैश्विकरूपेण उष्णकटिबंधीय-उपोष्णकटिबंधीय-वनानि स्वस्य परिचालन-तापीय-सीमायाः समीपं गच्छन्ति, जलवायु-तापनेन अस्याः शताब्द्याः अन्तः अनेकाः प्रजातयः स्वस्य ऐतिहासिक-तापमान-सीमायाः परं धकेलितुं प्रक्षेपणं कृतम् अस्ति (Doughty *et al.* 2023) प्रकाशसंश्लेषणात्मकक्वाण्टम-उपजस्य हानिः इति विशेषतां विद्यमानं प्रकाशप्रणाली II (PSII) तापीयक्षतिः वृक्षप्रदर्शनस्य महत्त्वपूर्णं पारिस्थितिकीशारीरिकमापं प्रतिनिधियति, विशेषतः मौसमीरूपेण परिवर्तनशीलवातावरणेषु यत्र तापमानं, जलस्य उपलब्धता तथा वाष्पदाबस्य घाटा (VPD) वार्षिकचक्रस्य पारं पूर्णतया भिन्नं भवति (Kattge *et al.* 2011; Sastry & Barua 2017; Dusenge, Duarte & Way 2019) . वृक्षपत्राणि कदा कथं च तापतनावम् अनुभवन्ति इति अवगन्तुं, अस्य तनावस्य अनुकूलतां वा सहितुं वा शारीरिकक्षमता च अतः तापनस्य विषये जातिप्रतिक्रियाणां पूर्वानुमानार्थं अत्यावश्यकम्

- इतिहासस्य रणनीत्याः सह सम्बद्धा इति वर्धमानसाक्ष्याणां बावजूदपि -यथा यत् निम्नभूमिप्रजातयः तथा च येषां प्रतिक्षेत्रं अधिकपत्रद्रव्यमानं भवति तेषां T50 मूल्यानि अधिकानि प्रदर्शयितुं प्रवृत्ताः भवन्ति (Sastry & Barua 2017; Slot *et al.* 2021) , तथा च उष्णतासहिष्णुता सदाहरिद्रा-पर्णप्रजातीनां मध्ये भिन्ना भवति (Sastry & Barua, 2017) - अधिकांशः उष्णकटिबंधीयः अध्ययनः एकऋतुषु अथवा फेनोलॉजिकल चरमपर्यन्तं बाध्यः एव तिष्ठति । एतेन PSII स्थिरतायां ऋतुकालीनप्लास्टिसिटी उत्पादकवृद्धिऋतौ कथं प्रकट्यते इति अवगमनं सीमितं करोति, विशेषतः आर्द्रपश्चात् कालखण्डे यदा तापमानं वर्धते परन्तु अनावृष्टिः, शिखरतापतनावः च अद्यापि शिखरं न प्राप्तवान् (Tiwari *et al.* 2025)

उष्णकटिबंधीयक्षेत्रेषु PSII तापसहिष्णुतायाः अधिकांशः अध्ययनः यावान् आर्द्रकालस्य समये कृतः अस्ति, यदा परिवेशस्य तापमानं न्यूनं भवति, मृदाः संतृप्ताः भवन्ति, तथा च VPD मध्यमः भवति, परन्तु पत्राणि परिपक्वानि वा युवानि वा भवन्ति तथा च न्यूनतनावस्य अनुभवं कुर्वन्ति (Dusenge *et al.* 2019; Slot *et al.* 2021) अथवा शिखरशुष्कऋतुकाले, यदा तापमानं वीपीडी च चरमस्थाने भवति, परन्तु बहवः पर्णपातीजातयः पूर्वमेव आंशिकरूपेण वा पूर्णतया वा पर्णाः विच्छिन्नाः भवन्ति, अथवा पत्राणि वृद्धानि भवन्ति तथा च तीव्रजलतनावस्य अधीनाः भवन्ति, यदा तु केषुचित् प्रजातीषु ग्रीष्मकालस्य अनन्तरं नूतनाः पर्णप्रवाहाः उद्भवन्ति (Nanda, Prakasha, Murthy & Suresh 2012; Sastry & Barua 2017; Sastry, Guha & बरुआ 2018;सिल्वा, एस्पिरिटो-सांतो, सैंटोस & रोड्रिग्ज *2020*) . एवं च, द्वयोः चरमकालयोः (Sastry & Barua 2017; Tiwari *et al.* 2021) , केन्द्रीकरणेन शारीरिकरूपेण महत्त्वपूर्णस्य मध्यवर्ती अवस्थायाः अवगमने अन्तरं जातम्: आर्द्र-उत्तर-(पूर्व-वृद्धत्वस्य) अवधिः - सः अवधिः यदा पत्राणि पूर्णतया परिपक्वाः भवन्ति तथा च प्रकाशसंश्लेषणकार्यं कर्तुं समर्थाः भवन्ति, जलस्य उपलब्धता अद्यापि अनुकूला भवति, तथा च तापमानं तथा VPD भवति उदयमानं किन्तु अद्यापि अत्यन्तं न। इयं खिडकी ऋतुशुष्क उष्णकटिबंधीयवनेषु (SDTF) पतझड़वृक्षाणां कृते सच्चा शिखरवितानकार्यकालस्य प्रतिनिधित्वं करोति यदा ते सर्वाधिकं उत्पादकाः भवन्ति परन्तु तदा अपि यदा तापीयतनावः निर्जलीकरणस्य च जोखिमः प्रथमवारं सञ्चितुं आरभते (Guan *et al.* 2015; Tiwari *et al.* 2025) तथापि, अस्मिन् आर्द्र-उत्तर-काले पूर्णतया परिपक्वपत्राणां PSII तापसहिष्णुता ऋतुशुष्क-उष्णकटिबंधीय-वनेषु बहुधा अमात्रायां वर्तते

पत्रदीर्घायुः संरचनात्मकदृढतां फेनोलॉजिकल रणनीतिं च एकीकृत्य भवति; दीर्घायुषः पत्ताः दीर्घकालीनसंपर्कस्य अन्तर्गतं झिल्लीस्थिरतां मरम्मतं च वर्धयन्ति, यदा तु अल्पायुषः चरमसहिष्णुतायाः अपेक्षया उच्चप्रारम्भिक उत्पादकतायां पक्षपातं कुर्वन्ति (Russo & Kitajima 2016; Slot *et al.* 2021) पतझड़-फेनोलॉजी न केवलं शिखर-तापं परिहरति अपितु शिखर-उत्पादकता-विण्डोषु PSII-लक्षणं संयोजयति, सदाहरित-संवैधानिक-सहिष्णुतायाः विपरीतम् (Sastry *et al.* 2018) विशेषतः ऋतुकाले शुष्केषु उष्णकटिबंधीयवनेषु सह-उपस्थिताः वृक्षजातयः विविधाः फेनोलॉजिकल-रणनीतयः प्रदर्शयन्ति, अनावृष्टि-

पर्णपातक-प्रजातयः ये स्वाभाविकतया शिखर-ग्रीष्मकालीन-तापं परिहरन्ति, अन्ये च ये उष्णतर-स्थितिः सहन्ते - अ-अत्यन्त-कालेषु PSII-ताप-सहिष्णुतायां विपरीत-निवेशानां कृते मञ्चं स्थापयन्ति (Tiwari *et al.* 2025) .

अस्मात् फेनोलॉजिकलविपरीततः व्यापकरूपेण धारिता किन्तु दुर्लभतया परीक्षिता धारणा अनुवर्तते यत् पत्राभ्यासेन ऋतुकाले PSII तापप्लास्टिसिटीयाः डिग्री भविष्यति सदाहरिद्रजातयः, वर्षपर्यन्तं पत्राणि धारयन्तः वार्षिकचक्रस्य पूर्णतापसहिष्णुतां च अनुभवन्ति, तापमानस्य वर्धने झिल्लीस्थिरतां, D1 कारोबारं, ताप-आघात-प्रोटीन-संश्लेषणं च निरन्तरं उन्नयनं कुर्वन्तः PSII-उष्मासहिष्णुतां नियन्त्रयितुं अपेक्षिताः सन्ति, तथा च वृद्धि-तापमानस्य प्रतिक्रियारूपेण ऋतुकाले एतान् निवेशान् संयोजयन्ति (Yamori, Hikosaka & Way 2014 स्लॉट *एट अल* 2021) . तस्य विपरीतम्, पतलाप्रजातयः शारीरिक-उष्मासहिष्णुता-विनियमने न्यूनं निवेशं करिष्यन्ति इति अपेक्षा अस्ति यतोहि फेनोलॉजिकल-परिहारः आवश्यकतां पूर्वं निवारयति: यदि शिखर-ताप-तनावस्य आगमनात् पूर्वं पत्राणि पातयन्ति तर्हि चरम-तापमानस्य अन्तर्गतं PSII-स्थिरतां निर्वाहयितुं ऊर्जावानव्ययः पूर्णतया परिहृतः भवति (Sastry & Barua 2017; Sastry *et al.* २०१८) . अस्मिन् रूपरेखायाः अन्तर्गतं PSII सहिष्णुतायां ऋतुकालीनप्लास्टिसिटी सदाहरिद्रेषु पतलाप्रजातीनां अपेक्षया अधिका भवितुमर्हति, अतः पत्राभ्यासः शारीरिकरूपेण तापनं बफरं कर्तुं प्रजातेः क्षमतायाः विश्वसनीयकार्यात्मकप्रॉक्सीरूपेण कार्यं कर्तव्यम् एषा धारणा जलवायुतापनस्य उष्णकटिबंधीयवनप्रतिक्रियाणां भविष्यवाणीं कर्तुं लक्षण-आधारित-दृष्टिकोणान् सूचितवती अस्ति (Doughty *et al.* 2023) , तथापि गैर-तनाव-ऋतु-संक्रमणस्य समये मिलान-स्थितौ मापितानां सह-उपस्थितानां प्रजातीनां विविधसमुदायस्य पारं प्रत्यक्षतया परीक्षणं न कृतम्, सटीकरूपेण ताप-प्रेरित-प्लास्टिसिटी-इत्यस्य संयोजन-प्रभावेभ्यः पृथक्करणाय आवश्यकः सन्दर्भः अनावृष्टितनावः पत्रवृद्धिः च ये शिखरशुष्कऋतुतुलनायाः लक्षणं भवन्ति ।

PSII तापस्थिरता, यत् तापमानेन परिमाणं भवति यस्मिन् F_v / F_m 5% (T_5 , तनावस्य आरम्भः) तथा 50% (T_{50} , अपरिवर्तनीयक्षतिः) न्यूनीभवति, प्रतिक्रिया-केन्द्र-प्रोटीनानां, थाइलाकोइड-झिल्लीनां, लिपिड-संरचना, क्लोरोप्लास्ट-लघु-ताप-आघात-प्रोटीनानां, D1 च सहितं समर्थन-तन्त्राणां अखण्डतां प्रतिबिम्बयति मरम्मत चक्र (Schreiber & Berry 1977; Schreiber 2007; O'sullivan *एट अल.* 2017; तिवारी *एट अल.* 2021; स्लॉट *एट अल.* 2021) . तापस्य अधीनं PSII इत्यस्य निर्वाहः प्रोटीनस्य कारोबारस्य मरम्मतस्य च माध्यमेन ऊर्जावानव्ययः आरोपयति, ये वृद्धितापमानस्य अनुकूलाः भवन्ति परन्तु जैवरासायनिकरूपेण बाध्यं भवन्ति, येन मामूली T_{50} प्लास्टिसिटी भवति यत् दुर्लभतया ऋतुकालीनतापपरिवर्तनस्य पूर्णतया क्षतिपूर्तिं करोति (Yi *et al.* 2022) क्षयचौड़ाई (DW , $T_{95} - T_5$) निरपेक्षदहलीजात् परं प्रतिक्रियागतिशीलतां गृह्णाति: संकीर्ण DW उच्च T_5 (निवारण-केन्द्रित) इत्यस्य अभावे अपि आकस्मिकं PSII विफलतां संकेतयति, यदा तु विस्तृत DW आरम्भोत्तरं बफर-क्षयम् (मरम्मत/सहिष्णुता-केन्द्रितं) सूचयति, यत् मध्ये विशिष्टानि ताप-रणनीत्यानि प्रकाशयति प्रजाति (तिवारी *एट अल.* 2021) .

PSII तापसहिष्णुता आंशिकरूपेण प्लास्टिकरूपेण अपेक्षिता अस्ति यतोहि प्रतिक्रियाकेन्द्रस्य, थाइलेकोइड् झिल्लीनां, तत्सम्बद्धानां मरम्मतयन्त्राणां च अखण्डता ऊर्जावानरूपेण जैवरासायनिकरूपेण च परिवर्तनीयगुणाः सन्ति उन्नतवृद्धितापमानं D1 प्रोटीनस्य संश्लेषणं कारोबारं च अपरेगुलेशनं कृत्वा, क्लोरोप्लास्ट लघुताप - आघातप्रोटीन्स् उत्तेजयित्वा, तथा च लिपिडसंरचनं तथा गैर - प्रकाशरासायनिक शमनघटकानाम् समायोजनं कृत्वा PSII तापसहिष्णुतां वर्धयितुं शक्नोति, ये सर्वे तापस्य अधीनं PSII स्थिरं कुर्वन्ति (Yamori *et al.* 2014; Tiwari *et al.* 2021; Posch *et अल* २०२६) . तथापि, एतेषु प्रत्येकं समायोजनं नाइट्रोजन, प्रोटीनसंश्लेषणं, एटीपी च इत्येतयोः व्ययस्य आरोपणं करोति यत् प्रकाशसंश्लेषणक्षमतायां वृद्धौ च निवेशेन सह प्रतिस्पर्धां करोति, यस्य तात्पर्यं भवति यत् प्रजातयः निवासस्थानस्य तापीयपरिवर्तनशीलतायाः तथा पत्रस्य अर्थशास्त्रस्य आधारेण अनुकूलनक्षमतायाः विरुद्धं संरचनात्मकतापीयदृढतायाः विरुद्धं रणनीतिकरूपेण संतुलनं करिष्यन्ति (Sastry & Barua 2017; Tiwari *et al.* 2021, 2026) .

उष्णकटिबंधीयप्रणालीषु अवलोकितं विशिष्टतया मामूलीं PSII तापीय-अभ्यस्तीकरणं दृष्ट्वा (Tiwari *et al.* 2021; Posch *et al.* 2026) , a ~3–4 °C पश्चिमघाटेषु आर्द्रतः उत्तर - आर्द्रकालपर्यन्तं ऋतुतापनं (कृष्णदास, कुमार & Comita 2016; Tiwari *et al.* 2025) T_5 तथा T_{50} परिवर्तनद्वारा केवलं आंशिकक्षतिपूर्तिं तात्पर्यं करोति , परन्तु अस्य ऋतुकालीनप्लास्टिसिटीयाः विस्तारः, विशेषतः विविधसदाहरिद्राणां पतलानां च प्रजातीनां पूर्णतया परिपक्वपत्राणां कृते, अद्यापि न अभवत् परिमाणं कृतम् । अनुभवजन्यक्षेत्रं नगरीयं च विविधबायोमेषु उद्यानस्य अध्ययनं दर्शयति यत् PSII ताप - सहिष्णुतामापकाः (T_5 , T_{50}) सामान्यतया वृद्धितापमानस्य ऋतुपरिवर्तनस्य च मामूलीरूपेण अनुकूलाः भवन्ति, परन्तु एषा प्लास्टिसिटी आंशिकरूपेण, प्रजाति- तथा रणनीति

- निर्भरं भवति , तथा च जलवायुतापनस्य अन्तर्गतं तापशासनपरिवर्तनस्य पूर्णतया क्षतिपूर्तिं दुर्लभतया करोति (Sastry & Barrua 2017 स्लॉट *एट अल* 2022 ; एते अध्ययनाः एतदपि प्रकाशयन्ति यत् पत्राभ्यासः, आर्थिकलक्षणाः, अनावृष्टेः संपर्कः च अनुकूलतायाः डिग्रीं संयोजयन्ति, तथापि अधिकांशः स्थानिकरूपेण कालगतरूपेण च बाध्यः एव तिष्ठति, यत्र कतिपयानि आँकडासंग्रहाणि फेनोलॉजिकलपदार्थेषु समानवितानसूक्ष्मजलवायुषु च समानव्यक्तिषु अनुसरणं कुर्वन्ति

मध्यपश्चिमघाटस्य मौसमीरूपेण शुष्कवनानि एतेषां प्रश्नानां सम्बोधनाय आदर्शं परिवेशं प्रददति, यत्र स्पष्टमानसून–मानसूनोत्तरसंक्रमणानां (आर्द्रात् आर्द्रपश्चात् ~4°C तापनं) सह-उपस्थितसदाहरिद्रा, अर्धसदाहरिद्रा, पतझड़प्रजातयः च मन्द–तेजवर्णक्रमं व्याप्नुवन्ति (कृष्णदास *इत्यादयः* 2016; तिवारी *इत्यादयः* २०२५) . अत्र वयं PSII तापसहिष्णुतायाः (T_5 , T_{50} , DW), आर्द्र-उत्तर-आर्द्र-कालयोः पारं 27 प्रजातीनां कृते पत्र-अभ्यासस्य परिमाणं कुर्मः , शारीरिकरूपेण महत्त्वपूर्ण-खिडकयोः समये ऋतु-प्लास्टिसिटी-परीक्षणार्थं शिखर-उष्ण–शुष्क-तनावस्य बहिः। वयं निम्नलिखितप्रश्नानां उत्तरं दद्मः।

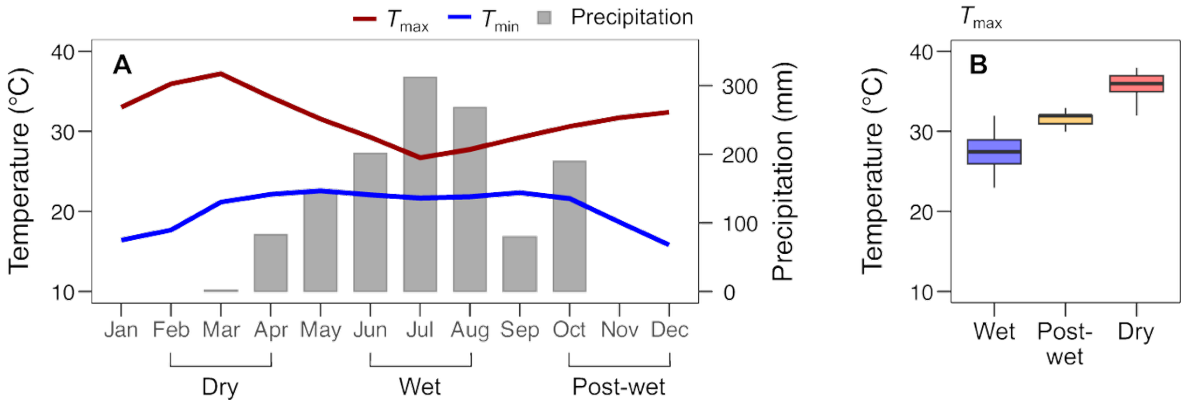
1. किं PSII तापसहिष्णुता (T_5 , T_{50} , DW) आर्द्र-आर्द्र-उत्तर-कालयोः मध्ये प्लास्टिकं भवति, तथा च किं एतत् सदाहरिद्रा/पर्णपात-अभ्यासयोः मध्ये भिन्नं भवति वा उत्तराधिकार-वर्णक्रमेण सह?
2. किं ऋतु/अभ्यास-अन्तराणि ऋतु-शुष्क-उष्णकटिबंधीय-वनेषु तापन-असुरक्षिततातायाः प्रासंगिकानि विशिष्टानि ताप-सुरक्षा-रणनीतयः प्रकाशयन्ति?

फेनोलॉजिकल रणनीतिः PSII तापीयप्लास्टिसिटी इत्यस्य पूर्वानुमानं करोति इति धारणायां निर्माणं कृत्वा वयं भविष्यवाणीं कुर्मः यत् पतलाप्रजातयः आर्द्र-तः-उत्तर-आर्द्र-संक्रमणस्य पारं T_5 तथा T_{50} इत्यस्य सीमित-ऋतु-उच्च-विनियमनं दर्शयिष्यन्ति , यत् एकेन फेनोलॉजिकल-परिहार-रणनीत्या सह सङ्गतम् अस्ति यत् अस्याः खिडकस्य समये शारीरिक-उष्मा-सहिष्णुता-विनियमनं अनावश्यकं करोति यदा सदाबहारजातयः, पर्णपातस्य विकल्पस्य अभावेन, वर्धमानतापमानस्य क्षतिपूर्तिप्रतिक्रियारूपेण अधिकं ऋतुप्लास्टिसिटीं दर्शयिष्यन्ति (Sastry & Barua 2017; Slot *et al.* 2021; Kullberg & Feeley 2024) वयं अग्रे पूर्वानुमानं कुर्मः यत् $T_5 \propto DW$ निवारण-सहिष्णुता-व्यापार-अवरोधः ऋतुषु संरक्षितः भविष्यति, यत् PSII ताप-रणनीतेः स्थिर-अक्षं प्रतिबिम्बयति यत् ऋतु-अनुकूलनात् स्वतन्त्रं भवति, तथा च यत् वर्ष-पर्यन्तं पत्र-धारणं, वर्धमान-तापमानस्य निरन्तरं संपर्कं च दृष्ट्वा आर्द्र-तापन-उत्तर-अन्तर्गतं सदाबहार-वृक्षेषु ताप-सुरक्षा-मार्जिनाः संकीर्णाः भविष्यन्ति 27 सह-उपस्थितानां प्रजातीनां मध्ये एतासां भविष्यवाणीनां परीक्षणं गैर-तनाव-ऋतु-विण्डो-मध्ये यत्र ताप-संकेतः अनावृष्ट्या वा वृद्धावस्थायाः वा भ्रमः न भवति, तत्र मूल्याङ्कनार्थं अद्वितीयं स्वच्छं सन्दर्भं प्रदाति यत् ऋतु-शुष्क-उष्णकटिबंधीय-वनेषु ताप-अनुकूलनस्य युग्मिताः वा स्वतन्त्राः आयामाः वा सन्ति वा इति मूल्याङ्कनार्थं अद्वितीयं स्वच्छं सन्दर्भं प्रदाति

सामग्रीः विधिश्च

अध्ययनस्थलम्

अध्ययनं भारतस्य कर्नाटकस्य शिवमोग्गामण्डलस्य भद्रा आरक्षितवने (१३.७४७४६२° उत्तरम्, ७५.६११९८०° पूर्व; ६८० मी. अस्मिन् स्थले मुख्यतया पर्णपातीवृक्षजातयः सन्ति येषां मध्ये केनचित् सदाहरिद्राणि सन्ति (Krishnamurthy *et al.* 2010) . अस्मिन् ५–६ मासस्य मानसूनस्य (~ १२०० मि.मी. वर्षा) भवति, तदनन्तरं ३–४ मासस्य शिशिरः भवति यत्र दिवा तापमानं वर्धते, रात्रौ तापमानं च न्यूनं भवति (चित्रम् १) उल्लेखनीयं यत् आर्द्रकालस्य (जून–अगस्त) अधिकतमवायुतापमानं आर्द्रकालस्य (अक्टोबर–दिसम्बर) अपेक्षया औसतेन ४°C न्यूनं भवति, यदा दिवा उच्चतमता वर्धते, रात्रौ निम्नतमता न्यूना भवति आर्द्रकालस्य (जून–अगस्त) मध्ये अधिकतमं वायुतापमानं २७.५ आसीत् ± ०.२ °C. आर्द्रोत्तरकालः (अक्टोबर–दिसम्बर) ४.१ आसीत् °C उष्णतरं, यत्र अधिकतमं तापमानं ३१.६ भवति ± ०.१४ इति °C. ग्रीष्मकालस्य अधिकतमं औसतं अधिकतमं तापमानं ३५.८ इति ज्ञातम् ± ०.१७ इति °C, 4.2 आर्द्र-उत्तरकालात् °C अधिकं (चित्रम् १) ।



चित्र 1 : पटल (A) अध्ययनस्थलात् 2 कि.मी दूरे स्थिते सिंगानामने मौसमस्थानके (13.719217°N, 75.634778°E) मौसमी मासिकं औसतवायुतापमानं अधिकतमं/न्यूनतमं, मासिकं कुलवृष्टिः च। आँकडा कवर मार्च २०२५–फरवरी २०२६ (वार्षिक वर्षा: १२८४ मि.मी.) । पटल ख त्रयाणां अवधिषु अधिकतमं वायुतापमानपरिधिं दर्शयति ।

वनस्पतिसामग्री

वयं पत्रदीर्घायुषः स्पेक्ट्रमं व्याप्नुवन्तः सर्वाधिकप्रबलवितान-उपवितानवृक्षजातीनां चयनं कृतवन्तः-अल्पायुषः पत्राणां कृते ये केवलं आर्द्र-उत्तर-आर्द्र-कालयोः माध्यमेन स्थास्यन्ति स्म, वर्ष - परिक्रमण-पर्णैः सह सदाहरिद्राणां यावत् , तस्यैव स्थलस्य कृते नन्दस्य (2012) दीर्घकालीन - फेनोलॉजिकल-आँकडानां आधारेण । अस्मिन् समुच्चये अनावृष्टि - पर्णपाती ताप - परिहारकाः अपि च दीर्घपत्रदीर्घायुः युक्ताः विशिष्टाः सदाहरिद्राः समाविष्टाः आसन्, येन विविधाः पत्र-फेनोलॉजिकल-ताप-अनुकूलन-रणनीतयः समाविष्टाः आसन्

अध्ययने भारतस्य कर्नाटकस्य मध्यपश्चिमघाटेषु ऋतुशुष्कउष्णकटिबंधीयवनानां लक्षणं कुलम् २७ वृक्षप्रजातयः समाविष्टाः सन्ति, ये विविधक्रमिकपदार्थेषु व्याप्ताः सन्ति (पूरकसारणी S1) (Pascal 1988) शुष्कतरस्थानेषु मुख्यतया पर्णपातीतः वर्षाणा स्थलाकृतिकप्रवणतायाः च सह आर्द्रतरवनप्रकारेषु अर्धसदाहरिद्राणां सदाहरिद्राणां च जातिसंरचना स्थानान्तरिता अस्माभिः अध्ययनं कृतं स्थलं *Xylia xylocarpa* , *Terminalia paniculata* , *Lannea* इत्यादीनां पर्णपातीजातीनां प्रधानता अस्ति *coromandelica* , तथा *Careya arborea* , *Terminalia paniculata* तथा *Xylia xylocarpa* संयुक्तरूपेण आधारक्षेत्रस्य >50% भागं धारयन्ति (Krishnamurthy *et al.* 2010) , *Tectona grandis* , *Catunaregam spinosa* , *Terminalia anogeissiana* इत्येतयोः पार्श्वे विशिष्टेषु सदाबहारजातीयेषु *Artocarpus heterophyllus* , *Schleichera oleosa* , *Cassine glauca* , *Ficus benghalensis* , *F. macrocarpa* , *F. religiosa* , तथा *Santalum album* , इत्यादयः सन्ति अस्य वितानस्य ऊर्ध्वता प्रायः १५ मीटर् अस्ति, प्रायः द्वौ स्तरौ च अस्ति । उत्तराधिकारपदं, वितानगुणं च सहितं विस्तृतवर्गीकरणं, परिवाराः, पारिस्थितिकीगुणाः च पूरकसारणी S1 मध्ये सूचीबद्धाः सन्ति । प्रत्येकजातेः कृते वयं पञ्च व्यक्तिगतवृक्षाणां (जैविकप्रतिकृतयः) नमूनानि गृहीतवन्तः । अस्य स्थलस्य विशेषता अस्ति यत् एकः तीव्रः शाकाहारी मांसाहारी च जीवः अस्ति यः अण्डरस्टोरी-वृद्धिं दृढतया दमनं करोति ।

अस्माभिः द्वौ मापन-अभियानौ कृतौ: (क) ग्रीष्मकालीन-मानसून-कालस्य अन्ते (अगस्त-मध्यतः सितम्बर-मासस्य अन्ते यावत्), यः 'आर्द्र-कालः' इति उच्यते, तथा च (ख) नवम्बर-२०२५-मासस्य द्वितीयतः चतुर्थ-सप्ताहः, वर्षा-पश्चात् तथा च न्यून-न्यूनतम-वायु-तापमानेन, अधिकतम-वायु-तापमानेन च वर्धमानेन लक्षणीयः, यस्य 'उत्तर-आर्द्र-कालः' इति उच्यते उभय-अभियानानां कृते वयं प्रत्येकस्मिन् समये प्रधान-फेनोलॉजिकल-पदस्य प्रतिनिधित्वं कुर्वन्तः पत्राणां नमूनानि गृहीतवन्तः – वयं टिप्पणीं कुर्मः यत् सर्वेषु जातिषु द्वयोः अभियानयोः कालखण्डे परिपक्वपत्राणि वहन्ति स्म दूरदर्शनप्रूनरस्य उपयोगेन भूमौ उपरि प्रायः ४-

५ मीटर् यावत् पत्रस्य नमूनानि एकत्रितानि आसन् । उभयत्र अभियानेषु पूर्णसूर्यप्रकाशस्य संपर्कं प्राप्तानि पत्राणि प्रातः ९वादनात् पूर्वं एकत्रितानि आसन् । नमूनानि जलयुक्तेषु परिस्थितौ अन्धकारमय-पॉलिथीन-पुटयोः प्रयोगशालां प्रति परिवहनं कृतम् ।

ताप उपचार परीक्षण

वयं तिवारी इत्यादयः, (2021) तथा क्राउस् (2010) इति प्रोटोकॉलं स्वीकृतवन्तः। वयं पत्रस्य २० मि.मी.व्यासस्य पत्रचक्रं जलस्य अधः कटयामः, पत्रस्य प्रमुखं लैमिना भागं चयनं कृत्वा – मध्यपट्टिकां परिहरन् । लघुपत्राणां कृते वयं प्रतिपत्रं एकं चक्रं, बृहत् लैमिनापत्रेषु च प्रतिपत्रं १-३ चक्रं उत्कीर्णं कृतवन्तः । प्रत्येकं परीक्षणं वृक्षात् न्यूनातिन्यूनं १० व्यक्तिगतपत्रचक्राणि भवन्ति स्म । पत्रचक्राणां यादृच्छिकरूपेण चयनं कृत्वा पत्रचक्राणां कटितधारं आच्छादयन् उभयतः आर्द्र ऊतकपत्रस्य स्तरेन वेष्टितम् पत्राणि न स्पृशन्ति इति सावधानता कृता, तथा च पत्रचक्राणि सर्वदा जले एव तिष्ठन्ति स्म अथवा अवायवीयरोगस्य परिहाराय आर्द्र ऊतकपत्रेण आच्छादिताः भवन्ति स्म (Harris & Heber 1993) चक्राणि पृथक् पृथक् प्लास्टिकपुटेषु (५० × ६० मि.मी.) स्थानान्तरितानि सपाटं कृत्वा जलस्य पतले पटलेन आच्छादितानि आसन् । प्रतितापमानबिन्दुं न्यूनातिन्यूनं त्रीणि चक्राणि समुच्चयेषु पुटयोः तापप्रक्रिया कृता । पूर्वतप्तजलेन सह तापमाननियन्त्रित-थर्मोस्-फ्लास्क्-मध्ये ताप-उपचारः कृतः । मापितके-प्रकारस्य उष्मायुग्मजाँचस्य उपयोगेन फ्लास्कस्य केन्द्रीयक्षेत्रे जलस्य तापमानं अभिलेखितम् । पत्रचक्रस्य पृथक् पृथक् समुच्चयः निम्नलिखिततापमानबिन्दुषु एकस्मिन् उपचारिताः आसन् : ३५, ४०, ४२, ४४, ४६, ४८, ५०, ५२, ६० °सेल्सियस च तथा च अउपचारितचक्रसमूहस्य नियन्त्रणरूपेण (प्रायः २५ °सेल्सियस) उपयोगः कृतः तापशुद्धिकरणानन्तरं पत्रचक्राणि टिश्यू पेपरेन जलेन च पेट्री-डिश्स् मध्ये स्थानान्तरितानि आसन् । पेट्री-पात्राणि प्रयोगशाला-स्थितौ २४h यावत् इन्क्यूबेट् कृतवन्तः । ऊष्मायनकालस्य अनन्तरं डिस्कं नल-शुष्कं कृतम्, अन्धकार-अनुकूलनार्थं एल्युमिनियम-लिफाफेषु लपेटितं तदनन्तरं Multispeq v2.0 (PhotosynQ , Michigan State University, USA) (Kuhlgert *et al.* 2016) इत्यस्य उपयोगेन F_v / F_m मापनं कृतम्

PSII तापसहिष्णुतामापदण्डानां निर्धारणम्

F_v / F_m - तापमानप्रतिसादश्रृङ्खलायां निम्नलिखितसमीकरणस्य उपयोगेन त्रि-पैरामीटर्-रसद-वक्रं फिट् कृतम् आसीत् ।

$$f = \frac{a}{1+e^{(b*(log\,(T)-log\,(c))}}$$ समीकरणम् १

अस्मिन् समीकरणे T उपचारतापमानं, b वक्रस्य तीक्ष्णता, a ऊर्ध्वा असममितं, c च विभक्तिबिन्दुः इति परिभाषितः फिट्-भ्यः वयं (i) T_5 , यस्मिन् तापमाने F_v / F_m अधिकतमस्तरस्य 5% यावत् न्यूनीभवति तथा च (ii) T_{50} , यत् तापमानं यत्र F_v / F_m अधिकतमस्य अर्धं भवति तत् निष्कासितवन्तः तदतिरिक्तं *टी* ९५ इति निर्धारितम् । इदं मापदण्डं तस्मिन् तापमाने परिभाषितं भवति यस्मिन् F_v / F_m इत्यस्य मूल्यानि अधिकतमस्तरस्य ९५% यावत् न्यूनीभवन्ति । T_5 तथा T_{95} इत्येतयोः मध्ये अन्तरं अतः परं क्षयविस्तारः ($DW = T_{95} - T_5$) इति उच्यते, यत् तापमानपरिधिरूपेण परिभाषितं भवति यस्मिन् F_v / F_m अधिकतमस्तरस्य 95% तः 5% पर्यन्तं न्यूनता अभवत् (Tiwari *et al.* 2021)

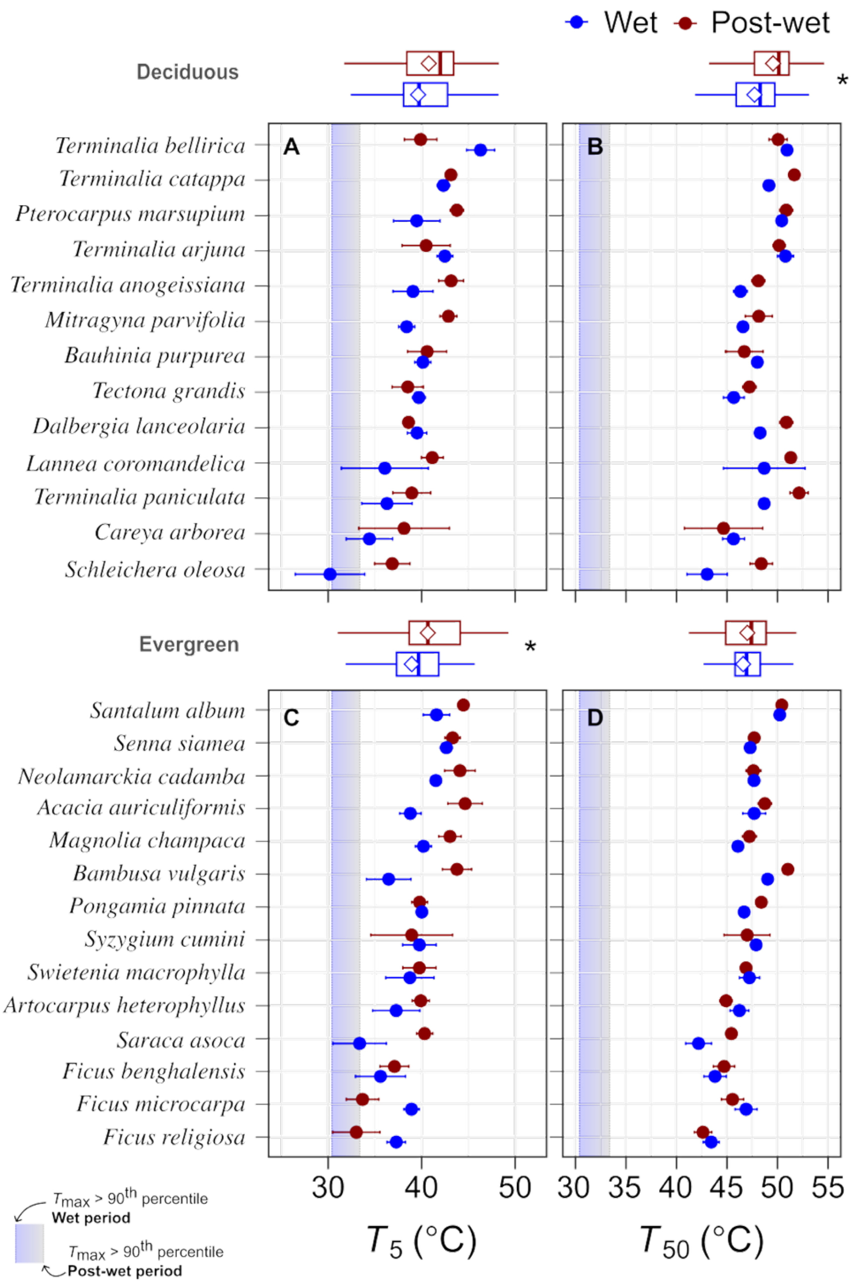
दत्तांशविश्लेषणम्

PSII तापसहिष्णुतामापदण्डाः (T_5 , T_{50}, $DW = T_{95} - T_5$) Fv /Fm-तापमानप्रतिक्रियावक्राणां (समीकरण 1) कृते त्रि-पैरामीटर् लॉजिस्टिक-फिट्-तः प्राप्ताः आसन् प्रजाति-स्तरीय-प्लास्टिसिटी (ΔT_5 = post-wet – wet T_5 ; similarly, ΔT_{50}) इत्यस्य प्रतिरूपणं रेखीयमिश्रित-प्रभाव-प्रतिरूपस्य (lmer ; Bates *et al.* (2015)) पर्ण-अभ्यासेन (सदाहरिद्रा/पर्णपाती), ऋतुः (आर्द्र/उत्तर-आर्द्र), तथा च तेषां परस्परक्रिया नियतप्रभावरूपेण, प्रजातिः यादृच्छिक-अवरोधस्य रूपेण, (lme4 संकुल) इत्यनेन सह । Satterthwaite इत्यस्य स्वतन्त्रतायाः डिग्रीभिः सह प्रकार III ANOVA इत्यनेन नियतप्रभावाः (lmerTest), तथा सीमान्त R^2 मात्राकृताः आदतप्रभावाः (MuMIn package Bartoń (2018)) (पूरक सारणी S2).

समग्रसमुदायस्य अर्थः प्रयुक्ताः अनुरूपाः अवरोध-मात्रप्रतिरूपाः । $T_5 - \Delta T_{50}$ तथा $\Delta T_{5\,-DW}$ इत्येतयोः मध्ये सम्बन्धेषु ΔSMA प्रतिगमन (smatr package) तथा अनुरूपता परीक्षणं नियोजितम् । तापसुरक्षामार्जिनस्य ($TSM_{50} = \Delta T_{50} - T_{air\ (90th)}$; तथैव, $TSM_5 = \Delta T_5 - T_{air\ (90th)}$) मिश्रितप्रतिमानद्वारा तुलना कृता प्रयुक्ताः विश्लेषणाः R 4.5.2 1 (R Core Team, 2025) ; figures via ggplot2 (Wickham 2009) .

परिणामाः

PSII तापसहिष्णुतायां आर्द्रतः आर्द्रोत्तरकालस्य प्लास्टिसिटी



चित्र 2 : आर्द्रमानसून-उत्तर-आर्द्र-कालयोः सह-उपस्थित-पर्णपाती-सदाहरिद्र-वृक्ष-जातीनां PSII-ताप-सहिष्णुता (T_5 and T_{50}) ऋतु-वायु-तापमान-अधिकतमस्य (T_{max} > 90 th percentile) सापेक्षम् बक्सप्लॉट् मध्ये पर्णपाती (ऊर्ध्वपङ्क्तिः) तथा सदाहरिद्रा

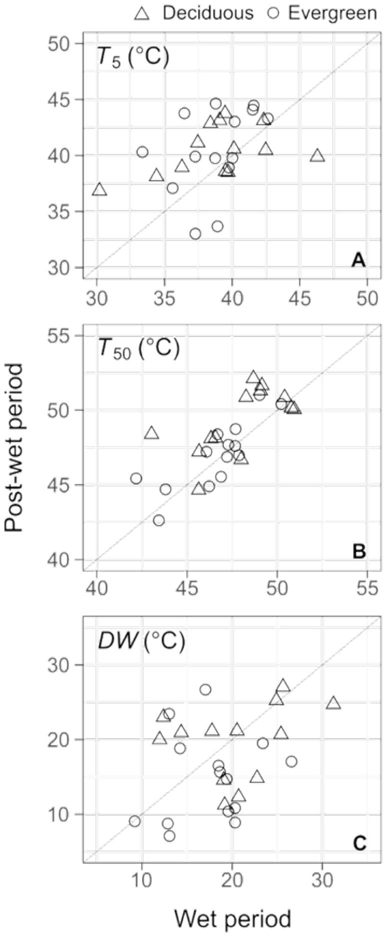
(मध्यपङ्क्तिः) प्रजातिषु पत्रतापसहिष्णुतायै T_5 (वामपटलाः, A,C) तथा T_{50} (दक्षिणपटलाः, B,D) सीमाः चित्रिताः सन्ति T_5 अंकाः 5% F_v / F_m क्षयः (कार्यात्मकः आरम्भः), T_{50} अंकः 50% क्षयः (क्षतिमध्यबिन्दुः)। अधः पटलेषु T_{max} वितरणं (30.4°C आर्द्रं; 33.4°C आर्द्रपश्चात्) दृश्यते, येन अधिकांशः प्रजातयः बृहत् T_{50} बफरं धारयन्ति, यदा तु सदाबहाराः चयनं कुर्वन्ति (*Saraca asoca* , *Ficus* spp.) तथा Careya arborea T_5 कार्यात्मकसीमानां समीपे कार्यं कुर्वन्ति ।

PSII तापसहिष्णुताप्रारम्भः (T_5) आर्द्रकालात् उत्तर-आर्द्रकालपर्यन्तं ($F_{(1, 241)} = 9.24$, $p = 0.0026$) महत्त्वपूर्णतया वर्धितः, यत् ऋतुकालीनप्लास्टिसिटीं सूचयति, यद्यपि एतत् सरलं प्रतिरूपं केवलं 2.7% विचरणस्य (सीमनीय R^2) व्याख्यातवती (चित्रम् 2, A & C)। एकं प्रजाति × ऋतुपरस्परक्रियाप्रतिरूपं प्रबलं अन्तरविशिष्टविविधतां ($F_{(27, 215)} = 3.69, p < 0.0001$) प्रकटितवान् तथा च ऋतुवृद्धेः ($F_{(1, 215)} = 10.14, p = 0.0017$) पुष्टिं कृतवान्, यत्र महत्त्वपूर्णप्रजाति × ऋतुपरस्परक्रिया ($F_{(26, 215)} = 1.71, p =$ ०.०२१), यत् सूचयति यत् T_5 प्लास्टिसिटी इत्यस्य परिमाणं प्रजातीनां मध्ये पर्याप्तरूपेण भिन्नं भवति स्म (सीमान्त $R^2 = 0.36$) । एते परिणामाः दर्शयन्ति यत् यद्यपि T_5 स्पष्टं ऋतुकालिकं अनुकूलनं प्रदर्शयति तथापि प्रजातयः तापनस्य प्लास्टिकप्रतिक्रियायां लक्षणीयरूपेण भिन्नाः सन्ति । न तु पत्राभ्यासः न च उत्तराधिकारस्थितिः ऋतुषु T_5 प्लास्टिसिटीं महत्त्वपूर्णतया संयोजितवती (अभ्यासः : ऋतुः $F_{(1, 240)} = 0.0025$, p = 0.96; उत्तराधिकारः : ऋतुः $F_{(2, 239)} = 0.13, p = 0.88$), मुख्यऋतुप्रभावः निरन्तरं ($F_{(1, 240)} = 9.18, p = 0.0027$) परन्तु सीमितविचरणं ($R^2 < 7\%$) व्याख्यायन् (पूरकचित्रं S1A)। T_5 , ΔT_5 इत्यस्मिन् आर्द्र-उत्तर-आर्द्र-परिवर्तनेषु पर्णपाती -सदाहरिद्र-जातीयेषु ($F_{(1, 240)} = 0.009, p = 0.93$) भेदः नासीत्, तथा च पत्र-अभ्यासः मूलतः प्लास्टिसिटी-मध्ये किमपि विचरणं न व्याख्यातवान् (चित्रम् 3, A)

PSII तापीयक्षतिमध्यबिन्दुः (T_{50}) आर्द्रकालात् उत्तर-आर्द्रकालपर्यन्तं ($F_{(1, 241)} = 8.61, p = 0.0037$) महत्त्वपूर्णतया वर्धितः, यत् ऋतुकालीनप्लास्टिसिटीं सूचयति, यद्यपि एतत् सरलं प्रतिरूपं केवलं 1.8% विचरणस्य (सीमनीय R^2) व्याख्यातवती (चित्रम् 2, B & D)। एकं प्रजाति × ऋतुपरस्परक्रियाप्रतिरूपं प्रबलं अन्तरविशिष्टविविधतां ($F_{(26, 122)} = 8.19, p < 0.0001$) प्रकटितवान् तथा च ऋतुवृद्धेः पुष्टिं कृतवान् ($F_{(1, 122)} = 9.16, p = 0.0030$), एकेन गैर-महत्त्वपूर्णप्रजाति × ऋतुपरस्परक्रियायाः ($F_{(26, 115)} = 1.28$, p = 1.28, $p = 0.19$), T_{50} प्लास्टिसिटी (सीमान्त $R^2 = 0.49$) परिमाणे सीमितप्रजातिस्तरीयविविधतां सूचयति । पत्राभ्यासेन मुख्यप्रभावः ($F_{(1, 25)} = 4.76, p = 0.039$) दर्शितः परन्तु ऋतुना सह कोऽपि अन्तरक्रिया (अभ्यासः : ऋतुः $F_{(1, 240)} = 2.60, p = 0.11$), यदा तु उत्तराधिकारस्थितिः सीमान्तरूपेण ऋतुप्लास्टिसिटी (उत्तराधिकार : ऋतु $F_{(2, 239)} = 2.79, p = 0.064$) संयोजयति स्म, सह मुख्य ऋतुप्रभावः निरन्तरं ($F_{(1, 239)} = 5.04, p = 0.026$) परन्तु सीमितविचरणं व्याख्यायते ($R^2 < 10\%$) (पूरकचित्रं S1B)। एते परिणामाः दर्शयन्ति यत् यद्यपि T_{50} मामूली ऋतु-अनुकूलनं प्रदर्शयति तथापि प्लास्टिसिटी-परिमाणं जातिषु बहुधा सुसंगतं भवति, यत्र पत्र-अभ्यासेन दुर्बल-मॉडुलेशनं भवति, उत्तराधिकार-स्थितेः सीमान्त-प्रभावः च भवति T_{50} , ΔT_{50} इत्यस्मिन् आर्द्र-उत्तर-आर्द्र-परिवर्तनेषु पर्णपाती -सदाहरिद्रा-जातीयेषु भिन्नता नासीत् ($F_{(26, 115)} =$ २.१४, $p =$ ०.१६), पत्राभ्यासेन सह (चित्रम् ३, ख) ।

PSII क्षयचौड़ाई (DW) आर्द्रकालात् आर्द्रोत्तरकालपर्यन्तं सीमान्तवृद्धिं दर्शितवती ($F_{(1, 241)} = 3.10, p = 0.079$), यत् दुर्बलऋतुप्लास्टिसिटीं सूचयति, यत्र एतत् सरलं प्रतिरूपं केवलं 1.0% विचरणस्य (सीमनीय R^2) व्याख्यायते एकं प्रजाति × ऋतुपरस्परक्रियाप्रतिरूपं प्रबलं अन्तरविशिष्टविविधतां ($F_{(26, 215)} = 3.11, p < 0.0001$) प्रकटितवान् तथा च सीमान्तऋतुप्रवृत्तेः ($F_{(1, 215)} = 3.39, p = 0.067$) पुष्टिं कृतवान्, यत्र महत्त्वपूर्णप्रजाति × ऋतुपरस्परक्रिया ($F_{(26, 215)} = 1.64, p =$ ०.०३१), प्रजातयः DW प्लास्टिसिटी परिमाणे (सीमान्त $R^2 = 0.32$) पर्याप्तरूपेण भिन्नाः इति सूचयति । पत्राभ्यासेन मुख्यप्रभावः ($F_{(1, 25)} = 5.99, p = 0.022$) परन्तु ऋतुना सह कोऽपि अन्तरक्रिया (अभ्यासः : ऋतुः $F_{(1, 240)} = 0.91, p = 0.34$) न दर्शितः, यदा तु उत्तराधिकारस्थितिः ऋतुप्लास्टिसिटी (उत्तराधिकारः : ऋतुः F (2, 239) = 1.49, p = 0.23) इत्यस्य कोऽपि मॉडुलेशनं न दर्शितवती, यदा तु ऋतुः $F_{(2, 239)} = 1.49, p = 0.23$)। मुख्यऋतुप्रभावः सीमान्तरूपेण ($F_{(1, 239)} = 4.66, p = 0.032$) परन्तु सीमितविचरणं व्याख्यायते ($R^2 < 6\%$) । एते परिणामाः दर्शयन्ति यत् यद्यपि DW दुर्बलऋतुप्लास्टिसिटी प्रदर्शयति तथापि प्रजातयः स्वप्रतिक्रियायां लक्षणीयरूपेण भिन्नाः सन्ति, यद्यपि न आदतिः न च उत्तराधिकारस्थितिः एतस्य प्लास्टिसिटीं महत्त्वपूर्णतया संयोजयति DW , ΔDW इत्यस्मिन् आर्द्र-उत्तर-

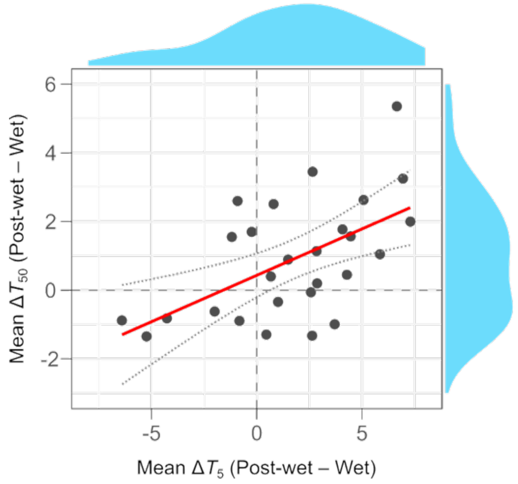
आर्द्र-परिवर्तनेषु पर्णपाती-सदाहरिद्रा-जातीयेषु भिन्नता नासीत् ($F_{(26,\ 115)}$ = ०.६५, p = ०.४३), पत्राभ्यासः प्लास्टिसिटी-विचरणस्य केवलं ०.७% व्याख्यायते (चित्रम् ३, ग)।



चित्र 3: भारतस्य मध्यपश्चिमघाटस्य मौसमीशुष्कस्य उष्णकटिबंधीयवने 27 वृक्षप्रजातीनां पारं PSII तापसहिष्णुतामापदण्डेषु (T_5 , T_{50} तथा क्षयचौड़ाई, पैनल AC) आर्द्रतः आर्द्रोत्तरकालस्य प्लास्टिसिटी। वृत्ताः सदाहरिद्रजातीनां प्रतिनिधित्वं कुर्वन्ति; त्रिकोणाः पर्णपातीजातीनां प्रतिनिधित्वं कुर्वन्ति । प्रत्येकं चिह्नं जातिमात्रा (n=5 वृक्षाः) दर्शयति । विच्छिन्नरेखा १:१ सम्बन्धं सूचयति ।

टी$_{५}$ तथा टी$_{५०}$ मध्ये समन्वित ऋतुपरिवर्तन

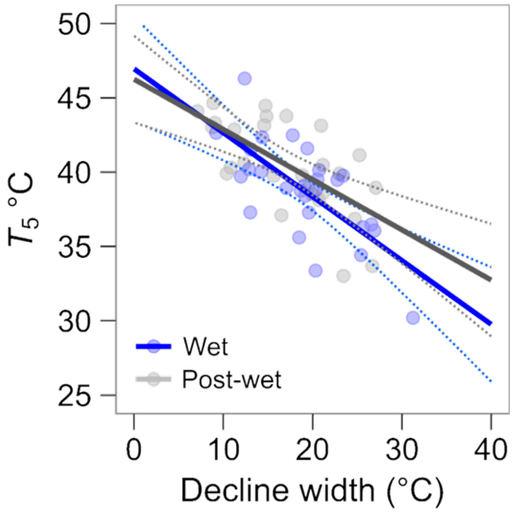
टी$_{५}$ तथा टी$_{५०}$ मध्ये ऋतुपरिवर्तनस्य औसतं मध्यमरूपेण सहसंबद्धम् आसीत् ($r = 0.59$, 95% CI: 0.24–0.80, $p = 0.0023$)। एकेन चिह्नाधारितेन अनुरूपतायाः परीक्षणेन सूचितं यत् अधिकांशजातयः T_5 तथा T_{50} इत्यत्र समानान्तरं परिवर्तनं प्रदर्शयन्ति | फिशरस्य सटीकपरीक्षणेन सूचितं यत् सकारात्मकं ΔT_5 (आर्द्रकालस्य अनन्तरं अधिकं मूल्यं युक्ताः) युक्ताः प्रजातयः सकारात्मकं ΔT_{50} अपि दर्शयितुं पर्याप्ततया अधिकाः आसन् (विषमता अनुपातः = 7.3, 95% CI: 0.82–106), यद्यपि एषः सम्बन्धः केवलं सीमान्तरूपेण महत्त्वपूर्णः आसीत् ($p = 0.061$) एते परिणामाः सूचयन्ति यत् टी$_{५}$ तथा टी$_{५०}$ ऋतुषु समानदिशि परिवर्तनं कुर्वन्ति (चित्रम् ४)।



चित्र 4: ऋतुशुष्कउष्णकटिबंधीयवने, मध्यपश्चिमघाटेषु 24 वृक्षजातीयेषु T_5 तथा T_{50} इत्येतयोः समन्वितऋतुपरिवर्तनानि । प्रजाति-मध्यम ΔT_5 (उत्तर-आर्द्र-माइनस आर्द्र T_5, °C) बनाम ΔT_{50} (उत्तर-आर्द्र-माइनस आर्द्र T_{50}, °C) सकारात्मकसहसंबन्धं (r = 0.56, p = 0.0023) प्रकटयति, यत्र अधिकांश-प्रजातयः समानान्तर-शिफ्टं (विषमता अनुपातः = 7.3, p = 0.061) दर्शयन्ति मानक प्रमुख अक्ष ढलान = 2.08, 95% सीआई: 1.49-2.90 (*आर* ^{2} = 0.32, *पी* < 0.01)।

*टी*५ ∝विस्तारः क्षीणः भवति

आर्द्र (ढाल = −0.61, 95% CI: −0.81 तः −0.46, $R^2 = 0.50$, $p < 0.001$) तथा च आर्द्र (ढाल = −0.52, 95% CI: −0.70 तः −0.38, R^2) इत्येतयोः *कालखण्डे* महत्त्वपूर्णः नकारात्मकः T_{5} – DW सम्बन्धः प्रकटितः = 0.43, $p < 0.001$) अवधिः, ऋतुषु समानप्रवणैः ($\chi 2$ 1 = 0.62, $p = 0.43$)। रेखीय मिश्रित-प्रभावप्रतिरूपणेन सशक्त *DW* मुख्यप्रभावस्य पुष्टिः कृता ($F_{(1, 36)} = 79.4$, $p < 0.001$; सीमांत $R^2 = 0.59$) परन्तु आर्द्र-उत्तर-स्थितीनां (ऋतु × आदतः: $F_{(1, 28)} = 4.71$, $p = 0.039$; त्रि-मार्गीयः: F (1, 0.039; त्रि-मार्गीयः: $F_{(1, 0.039); २८)}$ = ५.७७, प = ०.०२३) (चित्र ५)। एवं च, यद्यपि उच्च- T_5 प्रजातयः निरन्तरं संकीर्ण DW (निवारण-केन्द्रितं) दर्शयन्ति, तथापि सदाहरिद्राणि पतलानि च प्रजातयः तापनस्य अधीनम् अस्मिन् व्यापारे विचलन्ति एतेन विविध-एसडीटीएफ-समुदाये ऋतु-गतिशीलतायाः कृते निवारण/सहिष्णुता-रूपरेखायाः विस्तारः भवति।



चित्र 5 : PSII तापसंवेदनशीलता आरम्भस्य (T_{5}) तापमानस्य क्षयविस्तारस्य च सम्बन्धः, T_{95} तः T_{5} पर्यन्तं तापमानविण्डो । मानक प्रमुख अक्ष प्रतिगमन (रेखीय) मॉडल फिट आर्द्र तथा आर्द्र-उत्तर अवधियोः कृते महत्त्वपूर्णः आसीत् ढलानाः सांख्यिकीयदृष्ट्या उदासीनाः आसन्।

PSII कार्यात्मकसीमानां सामीप्यम् : तापीयसुरक्षामार्जिनम्

T_{50} इत्यस्य आधारेण तापसुरक्षामार्जिनं सर्वेषां प्रजातीनां कृते बृहत् आसीत्, यथा 90 तमस्य प्रतिशतात् उपरि ऋतुकाले अधिकतमं वायुतापमानं कदापि PSII क्षतिमध्यबिन्दून् समीपं न गच्छति स्म, द्वयोः अपि अवधियोः तस्य विपरीतम्, T_{5} -आधारित-मार्जिनेषु ज्ञातं यत् कतिपयानि प्रजातयः कार्यात्मक-दहलीजस्य समीपे एव कार्यं कुर्वन्ति स्मः आर्द्रकालस्य समये, *Saraca asoca* तथा *Schleichera oleosa* इत्येतयोः आर्द्र-ऋतुस्य $T_{max} > 90$ th percentile इत्यस्य समीपे T_{5} मूल्यानि आसन् , तथा च आर्द्र-उत्तर-कालस्य *Ficus macrocarpa* तथा *F. religiosa* *इत्यनेन आर्द्र-उत्तर-* T_{max} इत्यस्य सापेक्षतया समानरूपेण लघु-मार्जिनाः दर्शिताः पतलाप्रजातयः सामान्यतया आरामदायकं बफरं निर्वाहयन्ति स्म, यत्र कोऽपि प्रत्यक्षतया ऋतुकाले T_{max} -इत्येतत् आच्छादयति स्म , यद्यपि Careya arborea इत्यनेन न्यूनीकृतं मार्जिनं दर्शितं तथा च आर्द्रोत्तर-उच्चसीमानां प्रति प्रवृत्तिः अभवत् समग्रतया, अधिकांशजातयः T_{5} तथा साक्षात्कृतवायुतापमानस्य चरमयोः मध्ये पर्याप्तं पृथक्त्वं धारयन्ति स्म, परन्तु विलम्बित-उत्तराधिकार-सदाहरिद्राणां लघु-उपसमूहः एकः प्रारम्भिक-उत्तराधिकार-पर्णपाती-जातिः च पूर्वमेव उदयमान-ऋतु-ताप-प्रतिबन्धानां समीपे कार्यं करोति

विवरण

फेनोलॉजिकल रणनीतेः वियुग्मनं तथा PSII तापीयप्लास्टिसिटी

उष्णकटिबंधीयपारिस्थितिकीशरीरविज्ञाने एकः केन्द्रीयः धारणा अस्ति यत् पत्रस्य फेनोलॉजिकल रणनीतिः शारीरिकः तापसहिष्णुताविनियमः च युग्मिताः सन्ति; अर्थात्, वर्षव्यापी PSII स्थिरीकरणे निवेशं कुर्वन्तः सदाबहाराः, पर्णपातकप्रजातयः पर्णपातनस्य माध्यमेन परिहारस्य उपरि निर्भराः (Sastry & Barua 2017; Sastry *et al.* 2018) अस्माकं परिणामाः प्रत्यक्षतया एतां धारणाम् आव्हानं कुर्वन्ति। T_{5} तथा T_{5} इत्येतयोः द्वयोः अपि समुदाये आर्द्रकालात् आर्द्र-उत्तरकालपर्यन्तं मामूली किन्तु महत्त्वपूर्णतया वृद्धिः अभवत्, तथापि अस्य अनुकूलनस्य परिमाणं पत्र-अभ्यासेन वा उत्तराधिकार-स्थित्या वा संरचितस्य अपेक्षया प्रचण्डतया जाति-विषमता आसीत् शारीरिक-पीएसआईआई-विनियमनं तथा फेनोलॉजिकल-ताप-परिहारः एवं ताप-रणनीत्याः बहुधा स्वतन्त्र-अक्षरूपेण कार्यं कुर्वन्तः प्रतीयन्ते, पर्णपाती-जातयः पत्र-पातने ताप-सहिष्णुतां न प्रत्याययन्ति, तथा च सदाबहाराः असमानुपातिक-पीएसआईआई-उच्च-विनियमनस्य माध्यमेन दीर्घकालं यावत् संसर्गस्य क्षतिपूर्तिं न कुर्वन्ति उभयसमूहः समानमात्रायां अनुकूलतां प्राप्नोति इति सूचयति यत् प्रजातयः व्यापककार्यात्मकसमूहीकरणस्य अपेक्षया व्यक्तिगतजीवन-इतिहास-प्रक्षेपवक्रतां प्रतिबिम्बयन्तः संयोजनेषु एकत्रैव द्वयोः रणनीतयोः आकर्षणं कुर्वन्ति

समीक्षात्मकरूपेण अस्माकं नमूनाकरणं अ-तनाव-जालकस्य समये एतत् प्लास्टिसिटीं गृह्णाति, आर्द्र-आर्द्र-उत्तर-कालयोः यदा पत्राणि पूर्णतया परिपक्वानि भवन्ति, जलं सीमितं नास्ति, तथा च तापमानं वर्धमानं भवति परन्तु अद्यापि शुष्क-ऋतु-अत्यन्तं शिखरं न प्राप्तम् इदं डिजाइनं जानी-बुझकर सूचनाप्रदं च अस्ति: शुष्क-ऋतु-मापनस्य शिखर-शुष्क-ऋतु-मापनस्य लक्षणं भवन्ति इति शुष्क-तनावस्य, पत्रस्य वृद्धत्वस्य, पर्ण-विच्छेदनस्य च भ्रमित-प्रभावं बहिष्कृत्य (Sastry & Barua 2017; Slot *et al.* 2021) , वयं PSII प्लास्टिसिटीयां तापसंकेतं पृथक् कुर्मः। अत्र ज्ञातः मामूली किन्तु महत्त्वपूर्णः अनुकूलनः, T_{5} मध्ये प्रायः 1.7°C तथा T_{50} मध्ये 0.9°C — अतः PSII अखण्डतायां तनाव-प्रेरितं वा वृद्धावस्था-सम्बद्धं परिवर्तनं न अपितु वास्तविकं ताप-प्रेरितं शारीरिकं समायोजनं प्रतिबिम्बयति इदं विविधबायोम् (Tarvainen *et al.* 2022; Kullberg & Feeley 2024; Manzi *et al.* 2025) , परन्तु तान् निष्कर्षान् समुदायव्यापी, युग्मित, गैर-तनावसन्दर्भे विस्तारयति यत् पूर्वं SDTFs मध्ये परिमाणं न कृतम् अस्ति। एवं गैर-तनाव-विण्डो शिखर-ऋतु-तुलनायाः

अपेक्षया PSII-प्लास्टिसिटी-सीमानां तन्त्राणां च अवगमनाय स्वच्छतरं आधाररेखां प्रदाति, अस्माकं सुझावः अस्ति यत् भविष्ये ताप-अभ्यास-अध्ययनेषु अधिकव्यवस्थितरूपेण समावेशः करणीयः

पर्णपातीजातयः सदाहरिद्राणां अपेक्षया अधिकं T_{50} दर्शयन्ति : एकः पत्र अर्थशास्त्रस्य व्याख्या

अस्माकं अध्ययने सदाहरिद्रजातीनां सापेक्षपर्णपातीषु अवलोकितं उच्चतरं T_{50} Sastry and Barua (2017) इत्यनेन सह विपरीतम् अस्ति , येषां विपरीतप्रतिमानस्य सूचना दत्ता तथा च दीर्घकालीनतापीयतनावस्य संपर्कं प्राप्तेषु सदाबहारेषु अधिकं संरचनात्मकझिल्लीनिवेशं प्रतिबिम्बयति इति व्याख्या कृता। तथापि, एकः महत्त्वपूर्णः सन्दर्भान्तरः अवश्यं द्रष्टव्यः: तेषां अध्ययनं नगरीय-उद्यान-परिवेशे कृतम् यत्र परिवर्तित-सूक्ष्म-जलवायु-अन्तर्गतं प्रजातयः वर्धन्ते स्म, परिवर्तित-मृदा-स्थितौ, तथा च वितान-प्रतियोगिता न्यूनीकृता, एतादृशाः परिस्थितयः आन्तरिक-तापसहिष्णुता-रणनीतयः अभिव्यक्तिं भ्रमितवन्तः इति संभावनाः अस्माकं अध्ययनं तस्य विपरीतम्, प्रजातीनां नमूनानि तेषां प्राकृतिकवनसन्दर्भे गृह्णाति, यत्र वितानस्य स्थितिः, अन्तरविशिष्टस्पर्धा, ऋतुसूक्ष्मजलवायुः च पत्रलक्षणानाम् आकारं दातुं परस्परं क्रियान्वयं कुर्वन्ति यथा विकासात्मकचयनस्य अन्तर्गतं भवन्ति

अस्माकं प्राकृतिकवनसमुदायस्य अन्तः वयं सुचयामः यत् उच्चतरः पर्णपाती T_{50} दीर्घायुषः संसाधनविनियोगस्य च मूलभूतं पत्र अर्थशास्त्रस्य तर्कं प्रतिबिम्बयति। पर्णपातीजातयः संक्षिप्त-आर्द्र-ऋतु-विण्डो-काले पत्रनिर्माणे बहुधा निवेशं कुर्वन्ति, एतादृशानि पत्राणि उत्पादयन्ति येषां प्रकाशसंश्लेषण-प्रतिफलं बाध्य-आयुषः अन्तः अधिकतमं कर्तव्यं भवति, तथा च वृद्धावस्थायाः पूर्वं आर्द्र-उत्तर-तापमानं वर्धमानं सहते इदं संपीडितं कार्यात्मकं खिडकं बीमारणनीत्याः रूपेण उच्चतर आधाररेखायाः PSII तापीयदृढतायाः चयनं कर्तुं शक्नोति, न तु यतोहि पर्णपाती प्रजातयः अधिकदीर्घकालीनतापसंपर्कस्य सामनां कुर्वन्ति, अपितु यतोहि मध्यऋतुपत्रप्रतिस्थापनं व्यवहार्यं नास्ति इदं मन्द-द्रुत-संसाधन-अधिग्रहण-स्पेक्ट्रमेण सह संरेखितम् अस्ति, यत्र पतला-जातीयेषु अल्पायुषः, उच्च-प्रतिफल-पत्राणां दीर्घायुषः सदाबहार-पत्राणां अधिक-रूढिवादी-निवेशानां सापेक्षं विशिष्टं ताप-लक्षण-संयोजनं दर्शयितुं अपेक्षितम् (Russo & Kitajima 2016; Slot *et al.* 2021) सदाहरिद्रजातयः, तस्य विपरीतम्, PSII क्षतिं मरम्मतव्ययञ्च दीर्घपत्रायुषः मध्ये प्रसारयितुं शक्नुवन्ति, संरचनात्मकदृढतायाः अपेक्षया D1 कारोबारस्य माध्यमेन मध्यमपुनरावृत्तितापक्षोभं सहितुं शक्नुवन्ति तथा च वृद्धिशीलं अनुकूलनं सहन्ते (Yi *et al.* 2022) उभयदत्तांशसमूहेषु विशिष्टपत्रक्षेत्रं, पत्रनाइट्रोजनं, पत्रायुः च इत्यादीनां पत्रानाम् आर्थिकलक्षणानाम् प्रत्यक्षतुलना अस्याः व्याख्यायाः परीक्षणार्थं उत्पादकमार्गः भविष्यति

T_5–DW निवारण-सहिष्णुता-व्यापारस्य संरक्षणम्

नकारात्मकः $T_5 - DW$ सम्बन्धः यत्र उच्चतरतापप्रारम्भतापमानयुक्ताः प्रजातयः संकीर्णतरक्षयविण्डोः दर्शयन्ति, सः द्वयोः ऋतुयोः मध्ये संरक्षितः आसीत्, यत् पुष्टिं करोति यत् निवारण-बनाम-सहिष्णुता-अक्षः ऋतु-कलाकृतेः अपेक्षया PSII-तापीय-रणनीत्याः स्थिर-आयामस्य प्रतिनिधित्वं करोति (Tiwari *et al.* 2021) आर्द्र-आर्द्र-उत्तर-कालयोः समानाः प्रवणाः सूचयन्ति यत् यथा यथा प्रजातयः तापनेन सह स्वस्य ताप-प्रारम्भं ऊर्ध्वं स्थानान्तरयन्ति तथा तथा तेषां F_v / F_m - तापमानप्रतिक्रियायाः आकारः निर्वाह्यते परन्तु आर्द्र-उत्तर-स्थितौ अस्मिन् सम्बन्धे आदत-विशिष्ट-विचलनं उल्लेखनीयम् अस्ति : तापमानस्य वर्धमानेन निवारण-सहिष्णुता-अक्षेण सह पृथक् भवन्ति सदाहरित-पर्णपाती-जातयः, येन सूचितं भवति यत् यदा व्यापारः एव संरक्षितः भवति, तदा तस्य पार्श्वे स्थिता स्थानं तापन-अन्तर्गतं आदतेन सूक्ष्मतया संयोजितं भवति एतेन फेनोलॉजिकल-रणनीत्याः ताप-प्रतिक्रिया-गतिशीलतायाः च मध्ये एकं अन्तरक्रियां सूचयति यत् पूर्णवार्षिकचक्रे अग्रे अन्वेषणस्य आवश्यकतां जनयति

आदतान्तरविविधता तथा द्विचक्रीय-फेनोलॉजिकल-वर्गीकरणस्य सीमाः

सदाहरित-पर्णपाती-समूहयोः अन्तः व्यक्तिगतजातीयानां ऋतुपरिवर्तनस्य दिशि पर्याप्तं भिन्नता दृश्यते स्म: केचन आर्द्रतः आर्द्रोत्तरपर्यन्तं T_5, T_{50}, अथवा *DW वर्धितवन्तः, अन्ये कोऽपि ज्ञातुं शक्यः परिवर्तनं न दर्शितवन्तः, उपसमूहः च मामूलीक्षयः दर्शितवान्* इयं आदतान्तर्गतविषमता एतत् निष्कर्षं सुदृढं करोति यत् द्विचक्रीयपत्राभ्यासवर्गीकरणं केवलं तापीयरणनीतिविविधतायाः मोटे अक्षं गृह्णाति, तथा च अत्र दस्तावेजितायाः PSII प्लास्टिसिटीयाः प्रजातिविशिष्टप्रकृतिः वास्तविकजैविकवैविध्यं प्रतिबिम्बयति यस्य समाधानं कार्यात्मकसमूहीकरणं कर्तुं न शक्नोति परिपक्वपत्रधारणस्य अवधिः, पत्रस्य वृद्धत्वस्य उदयस्य च समयः गतिः च, पत्रस्य परिवर्तने ऋतुप्राथमिकता च समाविष्टाः सूक्ष्मपरिमाणस्य फेनोलॉजिकलगुणाः सरलसदाहरिद्र-पर्णपातकद्विविधतायाः अपेक्षया ताप-रणनीतयः अधिकसटीकतया व्याख्यातुं शक्नुवन्ति अध्ययनं कृतेषु २७ जातिषु एतेषु फेनोलॉजिकलगुणेषु सार्थकाः भेदाः सन्ति ये अस्माकं द्विचक्रीयवर्गीकरणेन न गृहीताः आसन्। उदाहरणार्थं, यदा अधिकांशः अनावृष्टि-पर्णपातक-जातिः तापमानस्य शिखरात् बहुपूर्वं पत्राणि (Eg, *L. coromandelica* , *C. arborea, S. oleosa*) पातयित्वा शिखर-ग्रीष्मकालं परिहरन्ति, तदा अस्मिन् समुदाये अल्पसंख्याकाः प्रजातयः उत्तर-ग्रीष्म-मासेषु (*A. heterophyllus* , *N. cadamba* , and *Ficus* spp .; एताः प्रजातयः स्वस्य आदत-समूह-समवयस्कानाम् सापेक्षतया विशिष्टानि ताप-सहिष्णुता-रणनीतयः परिनियोजयन्ति वा इति एकः मुक्तः प्रश्नः एव अस्ति यः समर्पित-अनुसन्धानस्य आवश्यकतां जनयति एतेषां आदति-अन्तर्गत-विपरीतानाम् समाधानार्थं पूर्णवार्षिकचक्रे सूक्ष्म-आवृत्ति-फेनोलॉजिकल-निरीक्षणस्य आवश्यकता भविष्यति, यत् पत्र-चरणं तथा कारोबार-दरं प्रत्यक्षतया मेल-कृत-समय-बिन्दुषु मापित-PSII-तापीय-मापकानां सह सम्बद्धं करिष्यति

फेनोलॉजिकलजटिलतायाः परं, पत्रतापसहिष्णुतायै संसाधनविनियोगः संरचनात्मकपर्णलक्षणं च अत्र अवलोकितैः तापरणनीतिभिः सह अन्तरक्रियां कर्तुं अपेक्षितम् अस्ति झिल्ली-उष्मास्थिरतायां निवेशः, D1 प्रोटीन-परिवर्तनं, तथा च ताप-आघात-प्रोटीन-संश्लेषणं च सर्वे प्रकाशसंश्लेषण-क्षमतायां तथा पत्ता-संरचनात्मक-दृढतायां निवेशेन सह प्रतिस्पर्धां कुर्वन्ति, यस्य तात्पर्यं भवति यत् पत्ता-अर्थशास्त्रं संरचनात्मक-उष्मासहिष्णुतां तस्य ऋतु-प्लास्टिसिटी च द्वयोः संयोजनं कर्तव्यम् (Russo and Kitajima 2016; Sastry and Barua 2017) अतः वयं पश्यामः प्लास्टिसिटीयां जाति-प्रेरितः भिन्नता न्यूनातिन्यूनं अंशतः एतेषु प्रतिस्पर्धात्मकमागधेषु प्रजातयः संसाधनानाम् आवंटनं कथं कुर्वन्ति इति भेदं प्रतिबिम्बयितुं सम्भाव्यते, भेदाः ये केवलं आदत्या एव न गृहीताः भवन्ति तथा च येषां उलझनविच्छेदार्थं लक्षणस्तरीयदत्तांशस्य आवश्यकता भविष्यति यद्यपि अस्मिन् अभियाने अस्माभिः पत्र-आर्थिक-लक्षण-आँकडानां संग्रहः न कृतः, तथापि एषः एकः जानी-बुझकर विकल्पः आसीत्: अस्माकं उद्देश्यं प्रथमं स्थापितं यत् रूपात्मक-रासायनिक-लक्षण-विविधतायाः अतिरिक्त-जटिलतां प्रवर्तयितुं पूर्वं फेनोलॉजिकल-रणनीतिः PSII-तापीय-विनियमनं च युग्मितं वा स्वतन्त्रं वा इति। अत्र विकसितस्य ऋतुकाले PSII-रूपरेखायाः सह विशिष्टपत्रक्षेत्रं, पत्रनाइट्रोजनं, पत्रायुषं च एकीकृत्य भविष्यस्य अध्ययनं अस्मिन् समुदाये प्रजातिविशिष्टप्लास्टिसिटीं किं चालयति इति अधिकं सम्पूर्णं यंत्रवत् विवरणं प्रदास्यति तथा च उच्चतरपर्णपातक T_{50} इत्यस्य व्याख्यानार्थं अत्र प्रस्तावितः पत्र अर्थशास्त्रस्य तर्कः मापितगुणभेदैः समर्थितः अस्ति वा इति प्रत्यक्षपरीक्षणस्य अनुमतिं दास्यति

एसडीटीएफ-मध्ये तापनार्थं दुर्बलाः प्रजातयः निहितार्थाः च

सामान्यतया आरामदायकस्य T_{50} -आधारितस्य तापसुरक्षामार्जिनस्य अभावेऽपि, अन्येभ्यः उष्णकटिबंधीयवनेभ्यः निष्कर्षेभ्यः सङ्गतम् यत्र T_{50} बफराः परिवेशस्य अधिकतमस्य सापेक्षतया बृहत् एव तिष्ठन्ति (Slot *et al.* 2021; Kullberg & Feeley 2024) T_5 -आधारित मार्जिनेषु कार्यात्मकरूपेण महत्त्वपूर्णः दुर्बलः उपसमूहः प्रकाशितः । *सरका* सहित उत्तराधिकारी सदाहरिद्रा *asoca* and *Ficus* species, alongside the early-successional deciduous *Careya arborea* , आर्द्रतापमानपश्चात् अधिकतमस्य सापेक्षतया लघुतमं बफरं दर्शितवान् एताः प्रजातयः आदतवर्गयोः क्रमिकस्थानयोः च व्याप्ताः इति निष्कर्षं पुष्टयति यत् व्यापककार्यात्मकसमूहीकरणेन दुर्बलता सुपूर्वसूचिता नास्ति तेषां न्यूनीकृताः मार्जिनाः सम्भवतः विशिष्टतन्त्राणि प्रतिबिम्बयन्ति : *सरका asoca* तथा *Ficus प्रजातिः छाया-अनुकूलितस्य अथवा गला गला घोषक-वृद्धि-रणनीतयः* (Schmidt & Tracey 2006) व्यापार-अवरोधं प्रतिबिम्बयितुं शक्नोति यत् तापीय-दृढतायाः अपेक्षया कार्बन-कप्चरं प्राथमिकताम् अददात्, यदा *Careya arborea* 's अग्नि-अनुकूलित-खुले-वितान-अभ्यासः (Malasiya *et al.* 2022) बन्द-वितानस्य अपेक्षया अधिक-पत्र-तापमानस्य संपर्कं कर्तुं शक्नोति विजाति। यथा जलवायुतापनस्य अन्तर्गतं ऋतुकालस्य अधिकतमं तापमानं निरन्तरं वर्धमानं वर्तते, वर्तमानकाले T_5 सीमासमीपे कार्यं कुर्वतीनां प्रजातीनां कार्यात्मकसीमानां पारगमनस्य सर्वाधिकं जोखिमं भवति, न तु शिखरशुष्कऋतुस्य चरमपरिणामेषु, अपितु पूर्वस्य आर्द्रतापनोत्तर-संक्रमणस्य समये यत् अयं अध्ययनं विशेषतया गृह्णाति लक्षण-आधारितरूपरेखाः ये प्रजातीनां

सदाहरिद्रा-पर्णपाती-कार्यप्रकारेषु समुच्चयन्ति, समुदाय-अन्तर्गत-विषमताम् अस्य मुखौटस्य जोखिमं कुर्वन्ति, अस्माकं निष्कर्षाः च एसडीटीएफ-मध्ये ताप-असुरक्षा-पूर्वसूचनार्थं प्रजाति-समाधान-दृष्टिकोणानां कृते तर्कयन्ति

निगमन

मध्यपश्चिमघाटस्य ऋतुकाले शुष्कउष्णकटिबंधीयवने २७ सह-उपस्थितवृक्षजातीनां पारं, PSII तापसहिष्णुता आर्द्रकालात् आर्द्रकालपश्चात् मामूलीरूपेण किन्तु महत्त्वपूर्णतया वर्धिता, शारीरिकरूपेण महत्त्वपूर्णस्य गैर-तनाव-विण्डो-काले प्रायः ४°C ऋतु- तापनस्य अनुसरणं कृत्वा इयं प्लास्टिसिटी वास्तविकं किन्तु आंशिकं आसीत्, उष्णकटिबंधीयप्रणालीषु दस्तावेजितानां PSII-अभ्यस्तीकरणस्य जैवरासायनिकबाधाभिः सह सङ्गतम्, तथा च ऋतुकालीनतापमानपरिवर्तनस्य पूर्णतया क्षतिपूर्तिं कर्तुं अपर्याप्तम् महत्त्वपूर्णतया, अस्य अनुकूलनस्य परिमाणं पत्राभ्यासस्य वा उत्तराधिकारस्य वा स्थितिः न तु जातिपरिचयेन चालितम् आसीत्, यत्र सदाहरिद्राणि पतलानि च प्रजातयः समानमात्रायां अनुकूलतां प्राप्तवन्तः, येन प्रत्यक्षतया एषा धारणा मिथ्या कृता यत् फेनोलॉजिकल-रणनीतिः शारीरिक-उष्मा-सहिष्णुता-विनियमस्य पूर्वानुमानं करोति T_5 तथा DW *अक्षेषु* निवारण-विरुद्ध-सहिष्णुता-व्यापारः ऋतुषु स्थिरः आसीत्, येन PSII तापीय-रणनीत्याः संरक्षित-आयामरूपेण तस्य पुष्टिः अभवत्, यदा तु $T_{5\text{ -आधारित-ताप-सुरक्षा-मार्जिनैः}}$ प्रजातीनां कार्यात्मकरूपेण दुर्बल-उपसमूहस्य पहिचानः कृतः यत्र विलम्बेन उत्तराधिकारी सदाबहाराः अपि च एकः प्रारम्भिकः क्रमिकः पतला-प्रजातिः च चिह्नितः यत्र पूर्वमेव ऋतु-ताप-ताप-समीपे पूर्वमेव कार्यं कुर्वती आसीत् शुष्कऋतुस्य शिखरस्य चरमपर्यन्तं न तु आर्द्रोत्तरसंक्रमणम्।

एते निष्कर्षाः तापनस्य प्रति उष्णकटिबंधीयवनप्रतिक्रियाणां पूर्वानुमानार्थं लक्षणाधारितदृष्टिकोणानां प्रत्यक्षसन्देशं वहन्ति; केवलं पत्राभ्यासः PSII तापीय-असुरक्षायाः अविश्वसनीयः प्रॉक्सी अस्ति, तथा च ये मॉडलाः प्रजातीनां सदाहरित-पर्णपात-कार्य-प्रकारेषु विभाजनं कुर्वन्ति, ते एकस्मिन् समुदायस्य अन्तः संचालित-तापीय-रणनीतयः विषमताम् व्यवस्थितरूपेण दुर्निरूपयिष्यन्ति पत्रदीर्घायुः, वितानस्य स्थितिः, व्यक्तिगतजीवन-इतिहास-सन्दर्भः च एकीकृत्य प्रजाति-निराकरण-मूल्यांकनस्य आवश्यकता वर्तते यत् के वृक्षाः उदयमान-ताप-बाधायाः अधिकतया संपर्कं कुर्वन्ति इति चिन्तयितुं शक्यते यथा यथा जलवायुपरिवर्तनस्य अन्तर्गतं आर्द्रतापनस्य अनन्तरं संक्रमणं तीव्रं भवति, पूर्वं आगत्य उच्चतरतापमानं प्राप्नोति, तथैव अत्र लक्षणीयः अतनाव-विण्डो क्रमेण संकीर्णः भविष्यति, तथा च वर्तमानकाले T_5 -दहलीजस्य समीपे एव कार्यं कुर्वन्तः प्रजातयः प्रथमतया कार्यात्मक-ताप-सीमायाः अनुभवं करिष्यन्ति यत् वर्तमानकाले तेषां शिखर-उत्पादक-कालः अस्ति

पूरक दत्तांश

पूरकदत्तांशः D1: पाण्डुलिप्याः संस्कृतभाषासंस्करणम्।

पूरक दत्तांश D1: पाण्डुलिप्याः कन्नडभाषा संस्करणम्।

पूरकसारणी S1: अध्ययनं कृताः प्रजातयः: मध्यपश्चिमघाटेषु ऋतुकाले शुष्केषु उष्णकटिबंधीयवने वर्गीकरणम्, पत्राभ्यासः, पारिस्थितिकीभूमिका च

पूरकसारणी S2: तापसहिष्णुतामापदण्डानां कृते मिश्रित - प्रभावप्रतिरूपपरिणामानां सारांशः ।

पूरक चित्र S1: उत्तराधिकारवर्गेषु सह-उपस्थितवृक्षजातीनां PSII तापसहिष्णुतायां (T_5 and T_{50}) आर्द्रावधिपश्चात् प्लास्टिसिटी ।

लेखक योगदान

आरटी इत्यनेन संशोधनस्य परिकल्पना कृता । आरटी, वाईके च अध्ययनस्य योजनां कृत्वा डिजाइनं कृतवन्तौ । पीटीबी, एसएनएच, आरजीएच, पीएन, जेबीएम, एसबीएस, एमएमएम, एसजी, टीएन, एकेएस, वीएन, एलबीएस, केटीजी, इत्यनेन तापसहिष्णुतामापनं क्षेत्रदत्तांशसङ्ग्रहणं च कृतम्। वाईके आरटी च क्षेत्राभियानानां निरीक्षणं कृतवन्तौ । एनए, एसबीएस, एमएमएम च फेनोलॉजिकललक्षणीकरणस्य समर्थनं कृतवन्तः । आरटी इत्यनेन दत्तांशसङ्ग्रहः विश्लेषणं च कृत्वा पाण्डुलिपिः लिखिता । सर्वे सहलेखकाः पाण्डुलिपिपुनरीक्षणे योगदानं दत्तवन्तः, अन्तिमसंस्करणं च प्रस्तुत्यर्थं अनुमोदितवन्तः ।

हितविग्रहः

लेखकाः हितविग्रहं न घोषयन्ति।

वित्तपोषण विवरण

अध्ययनस्य वित्तपोषणं वेनर-ग्रेन्, बिर्गिट्टा सिन्ट्रिंग् फाउण्डेशन्स् तथा स्वीडिश वेजिटेशन सोसाइटी इत्यनेन उप्साला-नगरे पोस्ट-डॉक्टरेल्-वित्तपोषणाय तथा केयू-नगरे इन्ट्रामुरल्-निधिभ्यः कृतम्

स्वीकृतिः

पाण्डुलिप्याः संस्कृत-कन्नडभाषा-संस्करणयोः साहाय्यार्थं वासुदेव-एच.आर. आरटी तथा आरएम उप्सालानगरे पोस्टडॉक्टरलवित्तपोषणार्थं वेनर-ग्रेन्, बिर्गिट्टा सिन्ट्रिंग् फाउण्डेशन्स् तथा स्वीडिश वेजिटेशन सोसाइटी इत्येतयोः धन्यवादं कुर्वतः। आरटी श्रृंगेरी-नगरस्य शारदा -चन्द्रमौलीश्वर-उभय-जगठगुरुभ्यः मार्गदर्शनार्थं धन्यवादं वदति ।