CZU: 581.19
DOI: 10.46727/c.v2.07-08-06-2025.p208-216

ANALIZA EXPLORATIVĂ A TENDINȚELOR DE CERCETARE PRIVIND FLAVONOIDELE LA PLANTE

EXPLORATORY ANALYSIS OF RESEARCH TRENDS ON PLANT FLAVONOIDS

Rodica MARTEA, *dr., conf. univ.,*
Universitatea de Stat din Moldova

Rodica MARTEA, *dr. Sc, Associate Professor,*
Moldova State University,
ORCID: 0000-0002-1244-7147
e-mail: rodica.martea@usm.md

Rezumat. În regnul vegetal, flavonoidele reprezintă o clasă diversificată de compuși fenolici cu roluri esențiale în mecanismele de apărare, care contribuie la consolidarea rezistenței împotriva agenților patogeni, prin modularea factorilor de virulență și activarea căilor de semnalizare asociate răspunsului imun. Interesul cercetătorilor pentru flavonoide a crescut semnificativ, în ultimele decenii, reflectând gama largă de funcții biologice pe care aceste substanțe le îndeplinesc. În cadrul studiu de față, a fost realizată analiza tendințelor globale, fiind examinate 13 domenii relevante de cercetare. Conform datelor obținute, studiile *genetice* se disting ca o direcție principală, fiind urmate de cercetările din domeniul *genomicii* vegetale. În același timp, analiza în dinamică a numărului de articole științifice publicate relevă o creștere semnificativă a interesului pentru studiile dedicate flavonoidelor. Articolele reflectă o concentrare pronunțată asupra investigațiilor privind mecanismele *fiziologice*, *biochimice* și *moleculare* asociate acestor compuși. Tendințele identificate indică faptul că acest segment de studiu este de o importanță majoră.
Cuvinte-cheie: *flavonoide, NCBI, PubMed Central, Helianthus annuus.*

Abstract. In the plant kingdom, flavonoids represent a diverse class of phenolic compounds with essential roles in defense mechanisms. They contribute to strengthening resistance against pathogens by modulating virulence factors and

activating signaling pathways associated with the immune response. The interest of researchers in flavonoids has increased significantly in recent decades, reflecting the multitude of biological functions that these substances perform. In the present study, an exploratory analysis of global scientific trends on flavonoids was performed, based on data extracted from the NCBI database. Information from 13 relevant fields was analyzed. This approach allowed the identification of the main research directions, as well as the frequency of recurring themes. One of the major directions highlighted is represented by *genetic* research, followed by those in the field of plant *genomics*. The analysis of the number of publications reviewed at international level indicates a significant focus on the role of flavonoids in the *physiological*, *biochemical* and *molecular* mechanisms of plants. The trends identified in the dynamics of publications reflect an exponential increase in the number of studies dedicated to flavonoids, suggesting a continuous and sustained expansion of research in this field.

Keywords*: flavonoid, NCBI, PubMed Central, Helianthus annuus.*

Introducere

Plantele sunt expuse constant la o gamă variată de factori de stres biotic, incluzând atacurile patogenilor (virusuri, bacterii, fungi), insectelor fitofage și altor organisme dăunătoare [12]. Prin urmare, pentru a supraviețui și a-și menține funcțiile fiziologice esențiale, acestea au dezvoltat o serie de mecanisme de apărare specifice [25]. Studierea acestor mecanisme contribuie semnificativ la elaborarea unor strategii eficiente pentru protecția culturilor și conservarea biodiversității [21].

Flavonoidele reprezintă metaboliți care influențează creșterea și dezvoltarea plantelor, fiind recunoscute în special pentru rolul lor în răspunsul plantelor la stresuri biotice [8, 26] și abiotice [20, 22]. Până în prezent, au fost identificați și caracterizați peste patru mii de compuși flavonoidici, izolați dintr-o varietate de specii de plante, fiind grupați în șase categorii principale, și anume flavonoli, flavone, izoflavone, antociani, flavanone și flavanoli [11].

Inițial, flavonoidele nu erau considerate esențiale pentru creșterea și dezvoltarea plantelor, fiind clasificate drept **metaboliți secundari**. Totuși, în ultimele două decenii, această clasificare a fost reevaluată, datorită rolului lor direct în determinarea plasticității plantelor și în răspunsul adaptativ la diverși factori de mediu. Astfel, flavonoidele au fost reîncadrate în categoria **metaboliților specializați.** Progresele recente în domeniile metabolomicii și genomicii funcționale au permis o explorare extinsă a acestor compuși, inclusiv a enzimelor-cheie implicate

în biosinteza lor. În plus, tehnologiile moderne de secvențiere de înaltă performanță au facilitat obținerea genomurilor complete ale multor specii vegetale, evidențiind importanța genelor implicate în căile biosintetice ale flavonoidelor [15].

Majoritatea funcțiilor flavonoidelor derivă din proprietățile lor antioxidante puternice. Astfel, au fost studiate un șir de mecanisme prin care flavonoidele contribuie la protecția plantelor – de la semnalizare și interacțiuni, până la inducerea căilor de apărare și protecție directă împotriva patogenilor și dăunătorilor [5, 10]. De asemenea, acești compuși reglează expresia genelor implicate în căile de semnalizare de apărare, în special cele influențate de acizii salicilic și jasmonic [28]. Anumiți compuși din subgrupele flavonelor și izoflavonelor au demonstrat activitate în inducerea rezistenței împotriva agenților patogeni [14], fiind implicați în răspunsuri adaptative la stresul biotic cauzat de insecte, erbivore, nematozi și alți factori [2, 16]. Prin urmare, flavonoidele joacă un rol esențial în apărarea plantelor, contribuind la rezistența acestora împotriva stresului biotic prin multiple mecanisme integrate.

Scopul prezentului studiu a fost de a analiza rolul flavonoidelor în răspunsul plantelor la stresul biotic, printr-o revizuire sistematică a informațiilor stocate în baze de date științifice, cu scopul de a identifica tendințele actuale de cercetare și posibile strategii inovatoare pentru sporirea rezilienței plantelor la condiții de mediu extreme.

Material și metode de cercetare

În cadrul acestui studiu, obiectul analizei l-au constituit înregistrările referitoare la flavonoide, stocate în bazele de date informaționale (BD) ale portalului Centrului Național pentru Informații Biotehnologice (NCBI - *National Center for Biotechnology Information*) [17]. Acesta este gestionat de Biblioteca Națională de Medicină a Statelor Unite (*United States National Library of Medicine*) și include toate componentele esențiale pentru investigarea domeniului bioinformaticii, de la baze de date cu structuri primare (*GenBank*), până la arhive de articole științifice (*PubMed* și *PubMed Central*).

Au fost interogate toate bazele de date ale portalului NCBI, utilizând o listă de 13 cuvinte-cheie relevante. Acestea au acoperit diverse arii de interes: *flavonoide în studii proteomice, biochimice, genetice, de ameliorare, genomice, de biologie moleculară, de metabolomică, fiziologice, fenomice, de biologia sistemelor, biotehnologice, biologice pentru creșterea imunității, respectiv biotehnologice pentru controlul fitosanitar.* Cuvintele-cheie au fost, de asemenea, combinate cu termenul *„Helianthus annuus”* pentru a evalua incidența studiilor focalizate pe cultura de floarea-soarelui.

Căutările au fost realizate în luna ianuarie 2025. Numărul de înregistrări a fost extras și structurat tabelar cu ajutorul aplicației Microsoft Excel 2007, valorile fiind ulterior analizate în vederea realizării unei reprezentări grafice a dinamicii acumulării referințelor în funcție de cuvintele-cheie.

Studiul bioinformatic a fost realizat în două etape distincte. Prima etapă a constat în căutarea numărului de înregistrări relevante în toate cele 32 de baze de date ale portalului NCBI, grupate în șase categorii tematice: *Literature* (surse bibliografice), *Genes* (gene), *Proteins* (proteine), *Genomes* (genomuri), *Clinical* (studii clinice) și *PubChem* (analize chimice). A doua etapă a urmărit estimarea evoluției numărului de articole științifice dedicate flavonoidelor, publicate în baza de date PMC – PubMed Central. Evaluarea a fost realizată pe trei perioade de referință: 1995–2004, 2005–2014 și 2015–2024, care reflectă etape esențiale în avansarea studiilor privind acești compuși.

PMC reprezintă o bibliotecă digitală [9], care arhivează aproximativ șase milioane de articole științifice recenzate (*peer-reviewed*) din peste șapte mii de reviste de specialitate din domeniile științelor biomedicale și ale vieții [18].

Rezultate și discuții

În ultimele decenii, revizuirea literaturii de specialitate a devenit o practică esențială în cadrul proceselor de cercetare științifică, având un rol fundamental în identificarea surselor relevante pentru studiile sistematice. Această etapă permite consolidarea cunoștințelor existente, delimitarea domeniilor insuficient explorate și orientarea direcțiilor viitoare de investigare.

Analiza după cuvintele cheie a informațiilor provenite din bazele de date ale portalului NCBI a permis identificarea particularităților evoluției cercetărilor privind flavonoidele și stresul biotic la plante. Aceste cercetări au relevat un interes semnificativ, având o fluctuație evidentă a numărului de înregistrări, ceea ce indică o preocupare crescută față de acest subiect.

Analiza cantitativă a relevat un număr total de **3830607 înregistrări** pentru studiile flavonoidelor la plante și **3146435** pentru floarea-soarelui. Studiile *genetice*, care se concentrează pe genele implicate în rezistența la patogeni și adaptabilitatea plantelor la condiții extreme, domină acest domeniu. Aceste cercetări sunt esențiale pentru aprofundarea înțelegerii caracteristicilor plantelor și pot oferi informații cheie pentru noi strategii de protecție și creștere a acestora.

În continuare, ca număr, urmează studiile *genomice*, deși mai puțin numeroase. Acestea sunt axate pe analiza întregului genom al plantelor, fiind esențiale pentru descoperirea unor noi gene și procese biologice implicate în metabolismul plantelor

și în răspunsurile acestora la stres. Aceste studii pot contribui la dezvoltarea unor soiuri de plante mai rezistente și mai eficiente, esențiale pentru viitorul agriculturii sustenabile. De menționat, că studiile genetice au avut o pondere semnificativ mai mare, de 7,42 ori pentru plante și de 7,92 ori pentru floarea-soarelui, comparativ cu studiile genomice, care au ocupat a doua poziție în ceea ce privește frecvența înregistrărilor.

În ceea ce privește studiile flavonoidelor în alte domenii, pentru plante, studiile *fenomice* ocupă locul al doilea, urmate de cele *biochimice*, *fiziologice*, *biotehnologice* și de *biologie moleculară*. Aceste domenii subliniază nu doar interesului global, dar și importanța acestora în dezvoltarea unor strategii inovative pentru protecția plantelor. În cazul florii-soarelui, se evidențiază cercetările în domeniile biochimic și de biologie moleculară.

Analiza rezultatelor conform categoriilor de informații stocate în NCBI oferă o viziune clară asupra evoluției și tendințelor actuale. Informații relevante se evidențiază pentru patru dintre categoriile NCBI (surse bibliografice, gene, proteine și genomuri). În același timp, bazele de date din celelelte două categorii (studii clinice și analize chimice), furnizând un număr nesemnificativ de rezultate, au fost excluse din studiile ulterioare.

În concordanță cu așteptările ipotetice, un volum considerabil de informații este stocat în categoria *Literatură*, sub formă de surse bibliografice. De menționat că această categorie include șase resurse: *Bookshelf, MeSH, NLM Catalog, PubMed* și *PubMed Central*. Dintre acestea, înregistrările identificate în cadrul studiului de față s-au distribuit preponderent în PubMed și PubMed Central.

Analiza numărului de articole științifice indexate în PubMed Central evidențiază faptul că, în decursul a treizeci de ani, au fost publicate un total de **459111 articole științifice** recenzate referitoare la compușii flavonoidici la plante. Dintre acestea, un număr de **11649 de articole** au vizat în mod specific flavonoidele studiate la floarea-soarelui. Datele obținute indică că articolele privind flavonoidele, la nivel mondial, sunt concentrate pe rolul lor esențial în mecanismele *fiziologice*, *biochimice* și *moleculare*.

Flavonoidele sunt intens studiate în *fiziologia plantelor* (81548 articole generale; 1918 pentru floarea-soarelui), având un rol esențial în răspunsul la stresul biotic. În același timp, flavonoidele sunt studiate în profunzime în *biochimie*, având valori aproape egale cu studiile fiziologice (80256 articole generale; 1807 pentru floarea-soarelui), fiind axate pe interacțiunile chimice și enzimatice ale acestor compuși, care sunt cruciale pentru procesele biochimice din plante, inclusiv pentru

sinteza și metabolizarea diferitelor compuși bioactivi. *Biologia moleculară* reflectă, de asemenea, un interes crescut (64867 articole generale; 1441 pentru floarea-soarelui), vizând rolul flavonoidelor în protecția plantelor, metabolism și aplicabilitatea în domenii precum biotehnologia și farmacologia. Flavonoidele din floarea-soarelui sunt studiate pentru diverse aplicații, cum ar fi îmbunătățirea rezistenței plantelor la dăunători și condiții de stres, precum și creșterea valorii nutriționale a semințelor. De asemenea, sunt investigate și în scopuri biotehnologice, cum ar fi producția de antioxidanți naturali sau utilizarea în farmacologie. Aceasta subliniază importanța flavonoidelor nu doar în cercetarea fundamentală privind funcționarea plantelor, dar și în dezvoltarea de soluții agronomice și biotehnologice care pot contribui la îmbunătățirea producției agricole și la utilizarea sustenabilă a resurselor.

Analiza în dinamică a numărului de articole științifice reprezintă un instrument esențial pentru înțelegerea tendințelor de cercetare și a direcțiilor emergente într-un domeniu științific. În timp ce, estimarea evolutivă a articolelor publicate în jurnalele științifice indexate din PubMed Central oferă o imagine clară asupra evoluției științifice, evidențiind domeniile de interes crescut și impactul acestora asupra dezvoltării cunoștințelor.

Astfel, studiul de față a cuprins trei etape distincte, corespunzătoare următoarelor intervale de timp: 1995–2004, 2005–2014 și 2015–2024, la care vom face referire în continuare.

Totalul articolelor publicate în fiecare perioadă reflectă o creștere semnificativă a interesului pentru studiul flavonoidelor.

În perioada 1995–2004 au fost publicate **4623 articole**, ceea ce reprezentă un început modest al cercetărilor, care corespunde, de fapt, cu primele înregistrări electronice și fondarea primelor baze de date. După un deceniu de cercetare, între 2005 și 2014, numărul articolelor a crescut semnificativ, ajungând la **47489 articole.**

În ultimii 10 ani, numărul articolelor a cunoscut o expansiune exponențială, atingând un total de **361004 articole**, subliniind importanța majoră a flavonoidelor în cercetările contemporane, atrăgând din ce în ce mai mulți cercetători din diverse discipline, atât în *biologia moleculară*, cât și în domenii precum *biochimia*, *biotehnologia* și *agricultura*.

Tendința ascendentă în publicarea articolelor științifice subliniază că studiul flavonoidelor continuă să fie un domeniu activ și de mare importanță, având aplicații semnificative pentru sănătatea umană, protecția mediului și dezvoltarea tehnologiilor agronomice inovative.

Analiza în dinamică a publicărilor științifice nu doar că ne ajută să înțelegem direcțiile curente de cercetare, dar contribuie și la conturarea unor perspective inovative în utilizarea flavonoidelor. Astfel, identificarea acestor direcții științifice de publicare oferă o bază solidă pentru formularea de strategii de cercetare viitoare și pentru avansarea progreselor științifice în domeniu.

Concluzii

Flavonoidele joacă un rol esențial în mecanismele de apărare ale plantelor, participând activ la reglarea căilor de semnalizare celulară și inducerea sintezei proteinelor de apărare. Acești compuși contribuie la formarea barierelor fizice de protecție, consolidând integritatea structurală a țesuturilor vegetale și diminuând impactul exercitat de patogeni și dăunători. O înțelegere aprofundată a acestor procese poate facilita dezvoltarea unor strategii de inginerie genetică orientate spre sporirea rezistenței plantelor la stres. Astfel, flavonoidele nu doar că susțin sănătatea și productivitatea plantelor, ci contribuie și la promovarea unei agriculturi durabile, având potențialul de a consolida securitatea alimentară într-un context marcat de schimbări climatice și resurse naturale în scădere. Creșterea semnificativă a numărului de publicații științifice în ultimele decenii evidențiază importanța deosebită acordată flavonoidelor, acestea reprezentând un subiect de cercetare de actualitate, cu aplicații promițătoare în domenii precum protecția mediului, sănătatea plantelor și dezvoltarea soluțiilor biotehnologice inovatoare.

BIBLIOGRAFIE

1. AGATI, G., et al. Flavonoids as antioxidants in plants: Location and functional significance. *Plant Science*, 2012, 196, 67-76.
2. AGATI, G., et al. The biosynthesis of flavonoids is enhanced similarly by UV radiation and root zone salinity in *L. vulgare* leaves. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(3), 204-212.
3. AHUJA, I., KISSEN, R., BONES, A.M. Plant defense mechanisms against herbivory: A review. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2012, 16(2), 327-338.
4. APEL, K., HIRT, H. Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55, 373-399.
5. BOUDET, A. M. Flavonoid biosynthesis and its regulation in plants. In *Encyclopedia of Life Sciences*, John Wiley & Sons, Ltd., 2007.

6. DANGL, J. L., DIETRICH, R. A., RICHBERG, M. H. Death don't have no mercy: Cell death programs in plant-microbe interactions. *The Plant Cell*, 1996, 8(10), 1793-1807.
7. DIXON, R. A., PAIVA, N. L. Stress-induced phenylpropanoid metabolism. *The Plant Cell*, 1995, 7(7), 1085-1097.
8. DYER, M.A., et al. Flavonoids in plant defense. In *Flavonoids in Biology and Medicine* (pp. 209-227), Springer, 2010.
9. GASPARYAN, A.Y., et al. Scholarly publishing and journal targeting in the time of the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) pandemic: A cross-sectional survey of rheumatologists and other specialists. *Rheumatology International*, 2020, 40(12), 2023-2030.
10. GORLACH, J., et al. Flavonoids: A new class of plant protectants against plant pathogenic fungi. *Phytopathology*, 1996, 86(11), 1220-1226.
11. HOLLMAN, P.C.H., KATAN, M.B. Absorption, metabolism and health effects of dietary flavonoids in man. *Biomed. & Pharmacotherapy*, 1999, 53(4), 183-197.
12. HU, Z., et al. Biotic and abiotic stress responses in plants: A comprehensive overview. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8, 1577.
13. KUC, J. Concepts and direction of induced systemic resistance in plants and its application. *European Journal of Plant Pathology*, 2001, 107(1), 7-12.
14. LIU, Q., et al. Phytotoxic allelochemicals from roots and root exudates of *Trifolium pratense*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(26), 6321-6327.
15. LIU, Z., et al. Advances in genomics and metabolomics for enhancing the production of plant natural products. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7, 1266.
16. NAKABAYASHI, R., et al. Enhancement of oxidative and drought tolerance in *Arabidopsis* by overaccumulation of antioxidant flavonoids. *Plant Journal*, 2014, 77(3), 367-379.
17. National Center for Biotechnology Information (NCBI). Disponibil la: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/.
18. SAYERS, E. W., et al. GenBank. *Nucleic Acids Research*, 2020, 48(D1), D84–D86.
19. SIMMONDS, M. S. J. Flavonoid–insect interactions: Recent advances in our knowledge. *Phytochemistry*, 2003, 64(1), 21-30.

20. SMITH, D.L., GROSS, K.C., SALTVEIT, M. E. Flavonoids as antioxidants in plants: Location and functional significance. *Plant Science*, 2017, 196, 67-76.
21. SUTHERLAND, W. J., et al. Ten priorities for global plant conservation. *Nature Plants*, 2018, 4, 105-111.
22. TANAKA, Y., et al. Flower color modification by engineering of the flavonoid biosynthetic pathway: Practical perspectives. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2010, 74(9), 1760-1769.
23. TREUTTER, D. Significance of flavonoids in plant resistance: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 2005, 3(3), 147-157.
24. Van LOON, L. C., REP, M., PIETERSE, C. M. J. Significance of inducible defense-related proteins in infected plants. *Annual Review of Phytopathology*, 1998, 36, 453-483.
25. VLOT, A.C., et al. Systemic acquired resistance in plants: Signaling networks and induced defenses. *Plant Cell*, 2009, 21(1), 16-26.
26. WINKEL-SHIRLEY, B. Biosynthesis of flavonoids and effects of stress. In *Plant Metabolism* (3rd ed., pp. 48-63), Springer, 2002.
27. ZAHRAN, H.H. Rhizobium–legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. *Microbiology and Molecular Biology Reviews,* 1999, 63(4), 968–989.
28. ZHAO, J., et al. Flavonoids and plant defense: Regulatory functions in growth and resistance. *Molecular Plant*, 2013, 6(3), 672-683.