

Soluții inovative pentru nutriția foliară: nanofertilizatori și purtători naturali de tip diatomită

Traian Mihai Cioroianu, Carmen Sîrbu

Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Pedologie, Agrochimie și Protecția Mediului – ICPA
București

Autor corespondent: carmen.sirbu@icpa.com

1. Contextul și importanța fertilizării foliare a culturilor agricole

Agricultura reprezintă forța mortice în majoritatea țărilor care se află în curs de dezvoltare. Este de așteptat ca populația lumii să crească până la 8 miliarde până în 2025 și 9 miliarde până în 2050, iar în acest context se identifică nevoia de creștere a productivității agricole globale. Constrângerile legate de energie, resurse, schimbări climatice și populația aflată într-o creștere rapidă exercită o presiune fără precedent asupra resurselor alimentare, respectiv a celor de apă. (Ghasemzadeh, 2011). Utilizarea tehnologiilor moderne, precum nanotehnologia, este necesară în științele agricole și alimentare.

Fertilizarea foliară este o tehnică esențială în agricultura modernă, utilizată pentru corectarea rapidă a carențelor nutritive și pentru optimizarea randamentului fotosintetic în perioade critice de creștere. În multe sisteme agricole absorbția radiculară poate fi limitată de factori precum pH-ul solului, compactarea, deficitul de umiditate sau temperaturile scăzute ale solului. Prin aplicare extraradiculară, nutrienții sunt furnizați direct prin cuticulă și stomate, atingând vasele conducătoare în câteva ore (Fageria și colab., 2009; Fernández și Brown, 2013). În culturi intensive supuse stresului climatic sau tehnologic și pe soluri degradate, erodate, nisipoase ori amendate, fertilizarea foliară contribuie la menținerea funcțiilor fotosintetice și la calitatea recoltei, mai ales când se alege corect specia de nutrient, forma chimică (de exemplu chelat), concentrația și fenofaza de aplicare (Niu și colab., 2021; Fernández și Eichert, 2009).

Exemple de aplicare foliară a produselor fertilizante care contin azot, fosfor și/sau potasiu și microelemente:

Aplicare îngrășămintă cu azot (N)

- Cereale păioase (grâu, orz) – aplicări foliare de uree 2-4% în faza de burduf cresc conținutul proteic al bobului și randamentul la hectar în condiții de deficit azotat (Gooding și Davies, 1992).

- Porumb – tratamente cu uree și nitrat de amoniu foliar în faza V6-V8 cresc conținutul de clorofilă și fotosinteza, compensând absorbția radiculară scăzută în soluri reci (Fernández și Eichert, 2009).

Aplicare îngrășămintă cu fosfor (P)

- Fosforul este adesea fixat în forme insolubile în soluri acide (Fe/Al fosfați) sau alcaline (Ca fosfați). Aplicarea foliară de fosfați monoamoniu (MAP) sau polifosfați a corectat rapid deficiențele de fosfor la floarea-soarelui și porumb, crescând biomasa cu 15-25% (Noack și colab., 2010).

Aplicare îngrășămintă cu potasiu (K)

- Pomicultură (măr, piersic) – aplicarea foliară de azotat de potasiu (KNO_3) 2-4% înainte de recoltare a crescut mărimea și conținutul de zaharuri al fructelor, îmbunătățind coloritul și calitatea post-recoltare (Wojcik și Wojcik, 2003).

- Cartof – tratamentele cu sulfat de potasiu în timpul formării tuberculilor au crescut conținutul de amidon și producția totală cu 10-18% (Wójcik, 2004).

Aplicare îngrășămintă cu fosfor și potasiu (NP)

- La grâu și orz utilizarea soluțiilor mixte de fosfat monopotasic (KH_2PO_4) 1-2% în stadiile de înfrățire și burduf a sporit conținutul de fosfor în țesuturi și a îmbunătățit rezistența la secetă și

îngheț prin creșterea acumulării de carbohidrați solubili (Fernández și Brown, 2013; Fernández și Eichert, 2009; Noack și colab., 2010).

În **viticultură**, aplicările foliare cu **fosfați de potasiu** ($\text{KH}_2\text{PO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$; inclusiv 0,5% KH_2PO_4) în fazele de fructificare au crescut solidele solubile totale și zaharurile (glucoză, fructoză), au intensificat culoarea prin sporirea antocianinelor și au îmbunătățit raportul zahăr/acid, cu efecte pozitive asupra aromei și calității boabelor (Wu și colab., 2021; Wu și colab., 2023). **La tomate** tratamentele pre-recoltare cu fosfat monopotasasic (KH_2PO_4) au sporit TSS și aciditatea titrabilă, au îmbunătățit fermitatea și culoarea (inclusiv licopenul) și au prelungit durata de păstrare la rece, cu rezultate consistente pe mai multe genotipuri (Zahirul și colab., 2018; Distefano și colab., 2024).

Aplicare îngrășămintă de tip NPK/Nano-NPK foliar

- Grâu de toamnă (*Triticum aestivum*) – nano-NPK foliar. Aplicarea unor doze diferite de nano-îngrășămintă foliare în diferite etape pentru două soiuri de grâu panificabil a avut un rol mai important în îmbunătățirea calității boabelor, detectându-se variații semnificative între soiuri ca răspuns la caracteristicile de calitate la aplicarea foliară de nano-îngrășămintă (doză de 450 mg/l) în două stadii diferite de creștere, în două locații diferite. În ceea ce privește calitatea grâului soiurile au fost principalul factor care a avut cel mai mare impact asupra a patru caracteristici de calitate: hectolitru, protein (Mahmood și colab., 2024).

- **Porumb** – Un **NPK lichid mineral foliar** (cu microelemente: Fe, Mg, B, S, Zn, Cu, Mo etc.) aplicat post-emergentă la 4-6 frunze în amestec cu erbicidul a redus infestarea cu buruieni și a sporit semnificativ producția de boabe față de martor și tratamentul standard, demonstrând compatibilitatea la amestec și utilitatea integrării foliarului NPK în tehnologiile combinate de protecție/nutriție (Hodoșan și colab., 2024).

- **Tomate** – **NPK foliar** (în combinație cu acid salicilic) sub stres de frig, stropiri foliare soluții NPK + 0,5-1,0 mM SA în stadii vegetative/generative, sub temperaturi scăzute. Rezultatul a fost creșterea producției și a calității nutriționale, fermitatea (prin creșterea grosimii pericarpului), solidele solubile și indicii nutraceutici vs. martor (Gao și colab., 2024).

- **Grâu** – **nano-NPK 20-20-20 foliar** (aplicare nano-NPK 20:20:20 la concentrații de 0/150/300/450 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, în doua faze de vegetație, pe două soiuri și în două locații). Rezultatul a fost creșterea semnificativă a parametrilor de creștere și a componentelor de producție; momentele de aplicare și concentrația au fost decisive pentru răspuns (sugerând optimizare varietate \times fază \times doză) (Abdulqadir și colab., 2025).

- **Orez** – **nano-NPK lichid, aplicare foliară** (efecte pe fiziologie și calitatea boabelor), cu evaluări asupra fiziologiei, calității boabelor și comunităților microbiene ale solului.

Rezultatul a fost îmbunătățiri ale răspunsurilor fiziologice și ale calității recoltei cu indicii că nano-NPK poate crește eficiența utilizării nutrienților și reduce dependența de dozele ridicate (necesită adaptări în funcție de condițiile pedoclimatice) (Asha și colab., 2025).

Avantajele cheie ale aplicării foliare față de fertilizarea radiculară sunt:

- Răspuns rapid al culturilor – nutrienții pătrund prin cuticulă/stomate și pot fi absorbiți în câteva ore, ceea ce duce, de regulă, la ameliorări observabile în primele zile după tratament (Fageria și colab., 2009).

- Doze reduse și eficiență crescută – până la 90% din nutrientul aplicat poate fi absorbit prin frunze, în timp ce la sol pierderile prin levigare pot depăși 50% pentru N și P (Fernández și Eichert, 2009).

- Flexibilitate – posibilitatea de a combina N, P, K în funcție de fenofază și de a ajusta dozele în funcție de analizele foliare și de sol.

- Compatibilitate cu agricultura de precizie – integrare cu tehnologii de aplicare variabilă, drone și senzori pentru diagnosticarea deficiențelor.

Mecanisme fiziologice

Penetrarea are loc prin cuticulă (difuzie pasivă) și, atunci când pelicula de pulverizare umezește porii, și prin stomate; rata depinde de grosimea/structura cuticulei, vârsta frunzei, umiditatea relativă și tensiunea superficială a soluției (umectanți) (Fernández și Brown, 2013; Eichert și colab., 2008). Nutrienții în general mobili în floem (N, K, Mg) se translocă rapid, în timp ce calciul (Ca) și, în multe specii, borul (B) prezintă mobilitate redusă; fosforul (P) are mobilitate bună în floem, ceea ce recomandă aplicări precoce și concentrații moderate (Fernández și Brown, 2013; Niu și colab., 2021).

Impact economic și ecologic

Fertilizarea foliară este o strategie țintită care poate completa fertilizarea la sol și permite ajustarea dozelor în raport cu diagnosticul foliar, reducând riscul de pierderi prin interacțiuni cu solul și contribuind la un management mai sustenabil al nutrienților (Fernández și Eichert, 2009; Fernández și Brown, 2013).

2. Nanotehnologia în agricultură – definiție și tipuri de nanomateriale

Progresul realizat în ultimii ani în industrie și tehnologii oferă posibilitatea de a realiza, sintetiza și utiliza material la scară nanometrică. Prin controlul dimensiunii acestora în domeniul 1-100 nm se pot obține noi structuri ale căror proprietăți sunt diferite de cele ale materialelor la scară macoscopică. Roald Hoffmann afirma că: nanotehnologia, prin modul de a controla ingenios construirea unor structuri mici cu proprietăți complexe și structuri proiectate să fie favorabile mediului, reprezintă o cale a viitorului în tot mai multe domenii (Lu și colab., 2004).

Nanofertilizatorii de tip **nanocompozit** (nutrient încorporat într-o matrice polimerică/inorganică, funcționalizată) oferă o eliberare controlată și țintită a N, P, K și a microelementelor, crescând eficiența utilizării nutrienților (NUE) și reducând pierderile prin levigare/volatilizare; performanța depinde de arhitectura particulei (dimensiune, suprafață specifică, încărcare, liganzi/chelatori), care controlează atât rata de eliberare, cât și transportul tisular (inclusiv pentru aplicări la sol și foliare). În consecință, formulările nano permit doze totale mai mici la rezultate agronomice cel puțin echivalente sau superioare (randament, calitate), inclusiv în condiții de stres abiotic/biotic, unde matricea poate acționa ca „amortizor” și vector de disponibilizare graduală a nutrienților (Toksha și colab., 2024).

Nanotehnologia este o posibilă soluție pentru atingerea durabilă și precisă a acestui obiectiv, motiv pentru care se fac eforturi majore în identificarea unei serii de metale și nanoparticule de oxizi ai metalelor pentru utilizarea în nutriția plantelor, reducerea efectelor aplicării produselor de protecție a plantelor și implicit în dezvoltarea unei agriculturi durabile, prietenoasă cu mediul (NNI, 2017). Răspunsul plantelor la nanoparticulă variază cu natura acesteia, tipul speciilor de plante și stadiul de creștere, doza aplicată și matricea în care operează ca fertilizant sau produs de protecție a plantelor.

Nanoscală înseamnă un interval al dimensiunilor de aproximativ 1-100 nm, iar **nanotehnologia** urmărește înțelegerea, manipularea și controlul materiei tocmai în acest registru, pentru a valorifica proprietăți și fenomene care nu apar la scări mai mari. În acest cadru numim „nanomaterial” orice material cu cel puțin o dimensiune (externă sau internă) în nanoscară, iar „nano-obiect” o entitate discretă cu una, două sau trei dimensiuni externe în nanoscară (ISO 80004-1:2023).

Tipologia nanomaterialelor și metode de sinteză

Nanomaterialele pot fi clasificate în funcție de compoziția chimică: carbonice (nanotuburi, grafenă), oxizi metalici (TiO₂, ZnO, Fe₃O₄), metale zero-valente (Fe⁰, Ag⁰, Au⁰), polimeri nanostructurați, dendrimeri și sisteme hibride. Sinteza lor utilizează rute fizice (măcinare de înaltă

energie, omogenizare la presiune ridicată, sonicizare) sau chimice (precipitație controlată, sol-gel, auto-asamblare moleculară). Dimensiunea, morfologia și starea de agregare influențează absorbția și mobilitatea în țesuturile vegetale (US Environmental Protection Agency, 2007; Nakache și colab., 1999; Maurice și colab., 2008; Podsiadlo și colab., 2007; Vasquez și colab., 2008).

Din cauza nevoii și cererii tot mai mari de tehnologii de sinteză a nanomaterialelor ecologice, eficiente și netoxice, biofabricarea nanoparticulelor (NP) folosind metode biologice a atras o atenție deosebită (Abd-El-Hack și colab., 2021; Saad și colab., 2021; El-Saadony și colab., 2018; Akl și colab., 2020; El-Saadony și colab., 2021c; El-Saadony și colab., 2021d; Sheiha și colab., 2020). Proteinele, enzimele, alcaloizii, compușii fenolici, pigmentii (Abdelnour și colab., 2020) și aminele sunt moleculele responsabile de sinteza NP-urilor la plante și microorganisme (Shah și colab., 2015; Hassanin și colab., 2020; El-Saadony și colab., 2021e). Pe de altă parte, metodele fizice sunt costisitoare, în timp ce metodele chimice utilizează solvenți toxici și afectează negativ mediul.

3. Nanofertilizatori

Nanofertilizatorii sunt îngrășăminte formulate parțial sau total cu structuri nanometrice, care asigură absorbția eficientă și/sau eliberarea lentă, controlată a nutrienților (Fraceto și colab., 2020; Demeke și colab., 2025; Beig și colab., 2022). Spre deosebire de fertilizantii clasici, care suferă pierderi prin levigare, volatilizare sau transformări în forme indisponibile, nanofertilizatorii pot îmbunătăți disponibilitatea nutrienților și reduce impactul asupra mediului (Lombi și colab., 2012; Khiew și colab., 2011). Exemplele includ nanoparticulele de ZnO, SiO₂, TiO₂, dar și agregate funcționalizate cu polimeri sau acoperiri controlate.

Nanoparticulele active pot fi utilizate atât ca sursă directă de micronutrienți cât și ca platformă de livrare pentru substanțe agrochimice bioactive pentru a îmbunătăți creșterea, randamentul și calitatea culturilor (Shang și colab., 2019).

La scară nanometrică raportul mare suprafață/volum determină reactivitate chimică crescută și capacitate ridicată de interacțiune cu structurile biologice. Astfel nanoparticulele pot pătrunde prin stomate, cuticulă sau rădăcini și pot fi transportate prin xilem și floem. Această proprietate le transformă în vectori eficienți pentru livrarea direcționată a nutrienților și agenților de protecție (Lombi și colab., 2012; Ghormade și colab., 2011).

Avantaje cheie (Lombi și colab., 2012; Nadiminti și colab., 2013; Ghormade și colab., 2011):

- solubilitate și biodisponibilitate crescute pentru microelemente;
- eliberare controlată sau „la cerere”, adaptată fenofazelor;
- reducerea pierderilor de N și P, limitând eutrofizarea și emisiile de N₂O;
- posibilitatea formulării ca „gloanțe nutritive” cu țintire tisulară;
- reduc aplicațiile pentru produse fitosanitare;
- scad pierderile de nutrienți din îngrășăminte;
- cresc randamentul printr-un management optim de nutrienți;
- fitotoxicitate redusă;
- utilizarea concentrațiilor optimizate.

Comparație între fertilizantii convenționali și nanofertilizatori

Îngrășămintele convenționale prezintă adesea eficiență scăzută, cu absorbție sub 50% pentru azot și fosfor, restul pierzându-se prin levigare, denitrificare sau fixare în forme insolubile. În schimb nanofertilizatorii oferă eliberare controlată și disponibilitate ridicată, reducând consumul total de îngrășăminte și impactul asupra mediului. Formulările nanometrice pot prelungi durata de furnizare a nutrienților și pot fi adaptate fazelor de vegetație. Exemplele includ acoperiri polimerice sensibile la pH sau umiditate, care permit eliberarea „la comandă” (Lombi și colab., 2012; Duhan și colab., 2017).

Mai mult, nano-fertilizatorii permit o eliberare controlată și prelungită a substanțelor nutritive, asigurând disponibilitatea acestora pe parcursul fazelor critice de dezvoltare a plantelor. Utilizarea lor a demonstrat îmbunătățirea toleranței culturilor agricole la stresuri abiotice precum seceta, salinitatea și temperaturile extreme (Prasad și colab., 2017; Beig și colab., 2022). Astfel aplicarea nanoparticulelor de oxid de zinc a demonstrat îmbunătățirea fotosintezei și a toleranței la stres hidric la grâu. Mai mult, nano-fertilizatorii pot susține reducerea utilizării pesticidelor, datorită efectelor lor adjuvante asupra rezistenței plantelor (Mukhopadhyay și colab., 2014).

4. Nanoaplicații pentru protecția plantelor și agricultura de precizie

Utilizarea formulărilor de nanoparticule, inclusiv nano-pesticide, nano-erbicide, nano-îngrășăminte și nano-emulsii, a fost studiată pe larg pentru a îmbunătăți sănătatea culturilor și perioada de valabilitate a produselor agricole (Acharya și colab., 2020; Yadav și colab., 2023; Quintarelli și colab., 2024; Paramo și colab., 2020).

Nanomaterialele permit dezvoltarea de pesticide și erbicide cu eliberare controlată, reducând doza activă necesară și impactul asupra mediului. Exemple: nanoîncapsularea atrazinei în poli(ϵ -caprolactonă) cu eficiență crescută la *Brassica juncea* (Oliveira și colab., 2015); utilizarea nanoparticulelor de siliciu (Cao și colab., 2018) și nanopolimeri (Kumar și colab., 2017) pentru transport lent al substanțelor active. De asemenea NP metalice (ZnO, CuO, TiO₂) au activitate antifungică și antibacteriană demonstrată împotriva agenților patogeni precum *Fusarium* spp. sau *Xanthomonas* (Dimkpa și colab., 2013; Rajiv P și colab., 2013).

Caracteristicile antimicrobiene ale nanoparticulelor metalice sunt cunoscute și utilizate pe scară largă în agricultură, direct sau indirect, pentru creșterea producției, gestionarea bolilor plantelor și a germinării (Guleria și colab., 2023; Thakur și colab., 2024).

Nanosenzori și monitorizare de precizie

Nanosenzorii fără fir, pe bază de materiale precum grafena, carbon nanotubular sau cupru dopat, sunt dezvoltați pentru monitorizarea în timp real a nutrienților, agenților patogeni și poluanților, permițând managementul de precizie al inputurilor agricole (Wibowo și colab., 2018; Deng și colab., 2016; Geszke-Moritz și colab., 2012; Esser și colab., 2012; Lin și colab., 2011; Jokar și colab., 2016). Aceste tehnologii pot alerta fermierii asupra deficiențelor nutritive, atacurilor patogene sau contaminanților chimici înainte ca acestea să afecteze semnificativ producția. În industria alimentară nano-senzorii oferă securitate pentru producerea, procesarea și transportul produselor alimentare prin intermediul senzorilor pentru detectarea agenților patogeni și a contaminanților (Prasad și colab., 2017).

5. Nanotehnologia, provocări, siguranță și perspective

Deși promițătoare, nanotehnologia agricolă ridică întrebări legate de toxicitate, bioacumulare și impact ecotoxic asupra solului și organismelor non-țintă. Caracterul interdisciplinar al domeniului face dificilă definirea unitară a termenului „nanofertilizant”. Sunt necesare studii privind siguranța umană, animală și ecologică, precum și reglementări clare pentru utilizarea pe scară largă (US Environmental Protection Agency, 2007; Nakache și colab., 1999; Maurice și colab., 2008; Baughman și colab., 2002; Lang și colab., 2011; Elliott, 2011; Duhan și colab., 2017).

Aspecte de reglementare și siguranță ecotoxicologică

Domeniul nanomaterialelor fiind nou aspecte privind sănătatea oamenilor și animalelor și securitatea mediului trebuie luate în considerare, fiind cruciale pentru a determina

toxicitatea/biocompatibilitatea nanofertilizatorilor cu biomediu în care sunt utilizați (Tarafdar și colab., 2013; Raliya și colab., 2013; Gogos și colab., 2012-6; McBratney și colab., 2005; Guo, 2004).

Utilizarea nanomaterialelor în agricultură necesită evaluarea atentă a riscurilor ecotoxicologice și a bioacumulării în sol, apă și lanțul trofic. Nanoparticulele pot interacționa cu microorganismele din sol, modificând activitatea enzimatică și ciclurile nutrienților. Lipsa unor standarde clare pentru definirea și testarea nanofertilizatorilor îngreunează adoptarea pe scară largă. Este necesară dezvoltarea unui cadru reglementar armonizat la nivel internațional, incluzând metodologii de evaluare a toxicității și stabilirii dozelor sigure pentru plante și ecosisteme (US Environmental Protection Agency, 2007; Nakache și colab., 1999; Maurice și colab., 2008; Baughman și colab., 2002; Lang și colab., 2011; Elliott, 2011; Duhan și colab., 2017; Kah și colab., 2018; COM (2012) 572 Final).

6. Concluzii și direcții viitoare

Nanotehnologia reprezintă o inovație majoră pentru agricultura durabilă, oferind fertilizanți și pesticide cu eliberare controlată, eficiență sporită și impact ecologic redus, o alternativă excelentă la îngrășămintele anorganice convenționale (Mohamed și colab., 2021; Huiyuan și colab., 2018; Zhang și colab., 2025). Utilizarea nano-îngrășămintelor, nano-pesticidelor, materialelor de ambalare inteligente și nanosenzorilor contribuie la dezvoltarea unei agriculturi de precizie, eficiente și prietenoase cu mediul. Integrarea acestor soluții cu agricultura de precizie și utilizarea nanosenzorilor pentru monitorizare în timp real pot transforma practicile agricole. Totuși sunt necesare studii aprofundate privind siguranța și reglementări clare pentru a asigura utilizarea responsabilă și eficientă. Investițiile în cercetare și colaborarea interdisciplinară între agronomi, chimiști, ingineri și autorități de reglementare vor determina succesul acestei tehnologii în deceniile următoare. Aplicarea practică a nanotehnologiei și comercializarea produselor pe bază de nanomateriale rămâne totuși incertă, având în vedere capacitatea redusă de a controla proprietățile și interacțiunea materialelor la scară nanometrică, precum și efectul neclar asupra mediului și baza de date redusă privind posibila toxicitate a acestora. Acest lucru limitează de asemenea dezvoltarea corpului de reglementări și legislație, reprezentând încă obstacole în comercializarea și utilizarea acestora (Xiaoja He și colab., 2019).

7. Utilizarea diatomitai ca fertilizant cu aplicare foliară

Aplicarea foliară a compușilor de siliciu este o tehnologie relativ nouă utilizată în agricultură. Inițial în 1990 s-au folosit aplicări foliare de silicați solubili în apă. Începând cu anul 2003 a fost introdusă și aplicarea foliară a acidului silicic (stabilizat), iar mai recent au fost aplicate și pulverizările foliare cu nanoparticule de silice. Pulverizările foliare cu silicați s-au dovedit eficiente ca produse pesticide, în timp ce pulverizările cu acid silicic (stabilizat) au crescut producția și au redus stresul biotic și abiotic. Datele limitate existente privind aplicarea foliară a nanoparticulelor de silice arată o tendință a acestora de a reduce atât stresul biotic cât și cel abiotic și de a asigura o creștere a randamentului de producție (Laane, 2018; Faraone și colab., 2020; Moale și colab., 2021).

Diatomita este o sursă naturală de silice amorfă ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), folosită preponderent ca insecticid anorganic și ameliorator de sol. Dovezile din ultimii 10 ani arată că aplicările foliare cu suspensii de diatomită pot reduce presiunea datorată unor dăunători și pot fi asociate cu creșteri ale unor indici de producție. Totuși, în ceea ce privește utilizarea ca fertilizant foliar de siliciu, diatomita are limitări: solubilitate scăzută și biodisponibilitate redusă a acidului monosilicic (H_4SiO_4), forma efectiv absorbită foliar. Literatura recomandă, pentru nutriție cu siliciu (Si) prin

aplicare foliară, utilizarea silicatului de potasiu sau a acidului silicic stabilizat, ori a dioxidului de siliciu (SiO_2) nano-formulat. În practică, diatomita aplicată foliar s-a dovedit eficientă în protecția plantelor, iar rolul fertilizant este indirect și dependent de formulare, dimensiunea particulei și protocoale de aplicare (Laane, 2018).

Componenta principală a diatomitei de Patârlagele este reprezentată de frustulele de diatomee, cu o dimensiune mediană de 5,4 μm . Conținutul total de silice este de aproximativ 85%, cu 81,2-84,1% SiO_2 amorf (opal-A) și mai puțin de 0,9% SiO_2 cristalin/cuarț, iar alte minerale prezente sunt argila, ilitul și caolinitul.

7.1. Proprietăți relevante și mecanisme de acțiune

Diatomita (diatomaceous earth) este alcătuită din **frustule de diatomee din silice amorfă (opal-A)**, având **porozitate ridicată** și o **rețea micro-/mezoporoasă** caracteristică (Uthappa și colab., 2018; Korsunsky și colab., 2020; Reka, 2022). Pentru a furniza siliciu plantelor forma bio-asimilabilă este H_4SiO_4 . Silica amorfă solidă are o dizolvare foarte lentă, ceea ce limitează aportul de siliciu prin aplicare foliară, de aceea literatura privind acest mod de utilizare a siliciului privilegiază silicații solubili/acidul silicic sau siliciul nanoparticule. Efectele principale la aplicare sunt: asigurarea unei bariere fizice împotriva insectelor cu tegument ceros, efect optic minor și posibil aport redus de siliciu prin solubilizare lentă, dar dificil de cuantificat pe frunză (Faraone și colab., 2020).

Diatomita (DE) poate funcționa ca material filmogen/purtător care amplifică răspunsul culturilor la fertilizării foliare prin: (a) efecte optice (răcire frunză), (b) efecte anti-transpiranți și (c) adsorbție/ion-exchange cu eliberare treptată a nutrienților.

a) Mecanisme fizico-optice – „răcire frunză” și stabilizarea fotosintezei

- Filmul de particule (diatomit, zeolit) depus pe frunză → crește reflectanța (în special în regiunea NIR), reduce încălzirea și temperatura frunzei; în condiții de stres termic/IR ridicat s-a observat scăderea temperaturii cu $\approx 3,7\text{-}4,5^\circ\text{C}$ și creșterea eficienței utilizării apei (WUE) cu până la $\approx 30\%$. Aceste efecte au apărut explicit când diatomita a fost folosită ca purtător împreună cu fertilizanți foliare („SNNMs + foliar”), amplificând efectul fertilizant (randament +8,1% vs. foliar singur, la specii sămburoase) (Moale și colab., 2021).

- Studii pe cultura de nuc confirmă mecanismul: reflectanță \uparrow → $T_{\text{frunză}} \downarrow$ ($\approx 4\text{-}6^\circ\text{C}$), transpirație \downarrow , gaz-schimb \uparrow /optimizat, cu impact favorabil asupra randamentului și calității în veri caniculare. Efectul este relevant ca referință pentru toate filmele minerale (inclusiv DE). (Gharaghani și colab., 2018).

- În livezi de măr și pomi sămburoși combinațiile NPK foliar + DE/zeolit au fost formulate ca „carriers” filmogeni, tocmai pentru a potența răspunsul fiziologic la doze moderate de foliar în ferestre calde (rol „biostimulant-like” datorat filmului) (Sîrbu și colab., 2023).

b) Efecte „anti-transpirant” și stabilizarea regimului hidric

- Filmul mineral reduce fluxul radiativ absorbit și concentrația vaporilor la suprafață, ceea ce scade transpirația fără a penaliza sever A (asimilația netă) în stres termic moderat—având ca efect WUE \uparrow și menținerea stomatelor funcționale în intervale de temperatură altfel limitative. Observațiile de WUE \uparrow până la $\sim 30\%$ și $T_{\text{frunză}} \downarrow \sim 4^\circ\text{C}$ au fost cuantificate pe cais/piersic cu diatomită + foliar (Moale, C. și colab., 2021).

- Consecințe practice: creșterea retenției picăturii și timpului de contact al soluției fertilizante, iar lixivierea după ploii scurte este mai mică față de un foliar clasic (Sîrbu și colab., 2023).

c) Adsorbție/schimb ionic/eliberare treptată – rolul suprafeței silanolice

- Diatomita are suprafață specifică ridicată și grupări silanol (Si-OH) expuse; aceste centre active dau capacitate de adsorbție pentru ioni (NH_4^+ , K^+ , PO_4^{3-}) și molecule polare. Suprafața poate

fi modificată (ex. MgO-DE) pentru afinitate sporită la fosfat și eliberare controlată ulterior. (Samani și colab., 2024).

- În practica foliară diatomita nu livrează „Si solubil” rapid (H_4SiO_4), este în schimb purtător/rezervor: imobilizează parțial cationi/anioni din fertilizantul foliar, reduce pierderile imediate (scurgere, evaporare) și cedează treptat sub peliculă (în funcție de umiditatea relativă, pH, tensioactivi/adjuvanți, încărcarea filmului). Aceasta prelungește timpul de disponibilitate a nutrientului pe suprafața frunzei (Samani și colab., 2024).

Suprafețele diatomitei au grupări hidroxil active care au o capacitate mare de adsorbție și se prezintă sub formă de grupări silanol libere (Si-OH), grupări silanol diol libere (Si-(OH)₂) și punți atomice cu ioni de oxigen (Si-O-Si) la suprafață (Zhuravlev, 2000). Grupările silanol de pe suprafața de silice a diatomitei reacționează ușor cu diverși agenți chimici. Capacitatea de adsorbție a diatomitei depinde de sarcina și electronegativitatea ionilor din soluție; cationii metalici din soluție formează o legătură chimică cu oxigenul siloxan atașat la suprafața diatomitei. Atât grupările silanol cât și cele siloxanice de pe suprafața diatomitei joacă un rol foarte important în capacitatea de adsorbție a cationilor metalelor (Flores-Cano și colab., 2013). Studiile efectuate au arătat faptul că diferența dintre cantitățile de Pb, Cu și Cd adsorbite se poate asocia cu teoria acido-bazică. Plumbul tinde să reacționeze cu grupările hidroxil (bază puternică) de pe suprafața diatomitei, mai mult decât cuprul și cadmiul. Astfel, plumbul este mai predispus la imobilizare din soluții decât cuprul și cadmiul. Reducerea razei de hidratare, a energiei de adsorbție și creșterea electronegativității cresc tendința de adsorbție specifică ionilor. Adsorbția mai mare a ionilor de plumb și cupru decât a celor de zinc este probabil datorată și razei de hidratare mai mici a plumbului (0,401 nm) și cuprului (0,419 nm) comparativ cu a zincului (0,43 nm) și electronegativității lor mai mari (Ye și colab., 2015).

d) Sinergia „diatomită + fertilizant foliar” – rezultate raportate în câmp/seră

- Livezi sâmburoase (cais/piersic): SNNMs (diatomită/zeolit) + NPK foliar → $T_{\text{frunză}} \downarrow$ (max. ~4,5 °C), CO_2 intercelular \uparrow (~15–27%), WUE \uparrow (până la ~30%), randament \uparrow (până la 8,1%) vs. varianta aplicată foliar fără SNNMs; în anii foarte ploioși efectele fotochimice se diminuează (dependență de climă a aplicării produselor foliare) (Moale și colab., 2021).

- Măr (livadă): diatomită/zeolit recunoscute ca *particle film-forming materials* folosite ca *carriers* pentru un fertilizant de tip NPK 5-25-3; s-au observat efecte *biostimulant-like* la T ridicate (pigmenți, parametri fiziologici), nuanțate de fenofaza în care s-au aplicat (Sîrbu și colab., 2023).

- La fistic: stropiri foliare cu diatomită + adjuvanți (K_2HPO_4 + adeziv poliuretanic) au controlat psylla și au demonstrat importanța aderenței/persistenței filmului pe frunză (Panahandeh, 2022).

7. 2. Parametri cheie de proiectare a formulărilor de fertilizanti cu diatomită

a) *Dimensiunea particulelor și dispersia acestora.* Țintește $D_{50} < 20-40 \mu m$ (se evită $> 100 \mu m$), dispersanți neionici și umectanți → film uniform, colmatare minimă a duzelor (analogii din literatura filmelor minerale; pentru diatomită eterogenitatea granulometrică impune agitare continuă a soluției aplicate) (Gharaghani și colab., 2018).

b) *Adjuvanți de aderență de tipul poliuretanic/chitosan* îmbunătățesc retenția; săruri tampon gen K_2HPO_4 pot stabiliza pH și crește co-depunerea nutrienților, efect validat în cazul pistachier; aderența a fost determinantă pentru eficacitatea produsului (Panahandeh și Ahmadi, 2022).

c) *Perioada de aplicare.* Se aplică înaintea vârfurilor de iradiere sau imediat după cu urmărirea T aer de maxim 20-30°C, RH > 60% și fără ploaie 6-8 h. În climă foarte ploioasă avantajul filmelor de diatomită scade (Moale și colab., 2021).

d) *Echipamentul de aplicare*. Duze cu orificiu mare, uneori filtrare 50-80 mesh, agitare continuă; se spală instalația după tratament (suspensiile minerale au risc de colmatare a utilajului cu formare de pelicule dificil de înlăturat) (Gharaghani și colab., 2018).

e) *Limite și când nu se recomandă diatomită ca „fertilizant” foliar*: aportul direct de siliciu solubil din diatomită pe frunză este mic (dizolvare lentă); dacă ținta principală e nutriția cu siliciu se recomandă silicatul de potasiu/acidul silicic stabilizat sau formulări Si-NP validate, folosind diatomită în principal ca film/purtător (Sîrbu și colab., 2023).

8. Dovezi experimentale recente privind utilizarea diatomitei prin aplicare foliara

În lucrările recente diatomita este tratată drept „silice naturală nanostructurată” (SNNM) – nanoporoasă (nu neapărat „nano-dimensională” ca diametru de particulă), folosită ca material filmogen/purtător care amplifică răspunsul la fertilizanți foliari prin efecte optice (răcire frunză), anti-transpiranți și schimb ionic/adsorbție-eliberare. Beneficiile asupra randamentului/calității au fost relevante în cazul experimentărilor efectuate în câmp, în special la temperaturi ridicate. Prezentăm în continuare câteva rezultate:

- Într-un studiu de teren pe doi ani în livezi de fistic, diatomita aplicată foliar în amestec cu fosfat dipotasic (K_2HPO_4) – un fertilizant foliar fosfo-potasic – a redus semnificativ mai mult populația de psyllă față de diatomită singură, iar autorii concluzionează că „fertilizantul foliar dipotasic” este aditivul cel mai potrivit atunci când se utilizează diatomita ca film de particule, depășind inclusiv combinațiile cu silicat de potasiu (aplicare extraradiculară/pe frunză). Această combinație susține ideea că diatomita + nutrient foliar poate crește performanța tratamentului prin efectul de film (aderență/persistență) și prin aportul nutrițional P–K direct la nivelul frunzei (Panahandeh și Ahmadi, 2022).

- La citrice aplicări foliare sau combinate (sol + frunză) cu diatomită au redus flushing-ul vegetativ și incidența psyllidului cu până la ~75% în primele 30 zile; s-au observat și creșteri ale N, P, K, Fe, Si în frunză (0,28-0,50% Si) (Restrepo-García și colab., 2025).

- Aplicarea în livadă a unor formulări cu diatomită/zeolit ca purtători SNNMs (silice naturale nanostructurate) pentru un NPK foliar 5:25:3, arată efecte suplimentare față de NPK singur (concentrația pigmentilor fotosintetici și a randamentului) și evidențiază rolul filmului de particule la T ridicate (Sîrbu și colab., 2023).

- Studii de teren efectuate pe sâmburoase privind aplicarea foliară a unor formule NPK cu diatomită raportează scăderea temperaturii foliajului (până la ~4,5°C), creșterea WUE (~30%) și o creștere cu 8,1% producție față de foliar fără SNNMs, remarcând explicit diatomitul drept material nanoporos pentru purtare/film de nutrient (Moale și colab., 2021).

- Experimentele efectuate cu un îngrășământ foliar de tip NPK, complexat cu SNNMs (diatomită/zeolit) aplicat 7,5 kg/ha, au indicat îmbunătățirea performanței fotosintetice prin efect combinat (optimizarea T frunzei + creșterea CO_2 sub-stomatic); studiul include dimensiunea medie a particulelor de diatomit și schema de formulare/adeziv (chitosan) (Ghiurea și colab., 2020).

- O lucrare de sinteză justifică „ruta nanoporoasă”, inclusiv pentru diatomita ca purtător cu suprafață specifică ridicată, utilizate ca produse nano-agrochimice cu aplicare foliara (Oancea, 2022).

- O recenzie axată pe utilizarea SNNMs (zeolit/diatomită/kieselgur) în agricultură evidențiază aplicările foliare ale acestora ca biostimulator/protector și fundamentele pentru utilizarea diatomitei ca material filmogen și purtător pentru fertilizanți foliari (Constantinescu-Aruxandei și colab., 2020).

Surse de siliciu preferate pentru fertilizantii cu aplicare foliară

Silicatul de potasiu (K_2SiO_3) și acidul silicic stabilizat au biodisponibilitate crescută și eficacitate repetabilă, dovedită la doze moderate (0,5-2 mM Si) și un risc scăzut de sedimentare. Literatura recentă recomandă aceste forme pentru fertilizarea foliară cu siliciu în locul suspensiilor de diatomită, mai pretențios de aplicat.

9. Formulare și tehnologie de aplicare

Mărimea particulei, respectiv particulele mari/aglomerate cresc abrazivitatea și sedimentarea; optimul practic este micronizarea + dispersanți/umectanți + agenți de aderență (ex. adeziv poliuretanic) pentru a menține un film aderent și subțire pe frunză.

Adjuvanți funcționali utilizați: în livezi de fistic s-a utilizat diatomită + K_2HPO_4 (fosfat dipotasic) și un adeziv care au îmbunătățit aderența și persistența pe frunză, cu efecte esențiale pentru creșterea efectului (Panahandeh și Ahmadi, 2022).

Duze și presiunile utilizate cu echipamentul de aplicare: suspensiile tip WP (DE) sunt „notorious” pentru înfundarea duzelor; se folosesc duze cu orificiu mai mare, o agitare continuă a suspensiei și curățarea imediată a echipamentului după aplicare. Scăderea presiunii limitează deriva fluxului de soluție, dar crește diametrul picăturii; calibrarea duzelor și a presiunii sunt obligatorii înainte de aplicarea foliară (<https://sprayers101.com/t100/>).

Frecvență și fenofază: aplicări vegetativ/generativ au fost confirmate pentru efectele fitosanitare ale diatomitei. Pentru rol „nutritiv” trebuie îndeplinite condițiile: ploaie < 6 h post-aplicare, RH > 60% și o temperatură moderată, condiții care cresc timpul de contact cu sistemul foliar.

Pentru îmbunătățirea tehnologiei de aplicare se pot utiliza:

- Micronizarea și utilizarea de adjuvanți (adezivi, umectanți) care îmbunătățesc aderența și persistența pe frunză;
- Duze cu orificiu mare, agitare continuă sunt esențiale pentru a evita înfundarea la suspensiile de diatomită;
- Aplicarea se recomandă în condiții de umiditate ridicată și fără ploaie în primele 6 h post-tratament.

10. Concluzii și recomandări

Fertilizarea foliară reprezintă o tehnologie complementară celei radiculare, utilă pentru corectarea rapidă a curențelor și stabilizarea fotosintezei în ferestre critice (frig, secetă, pH nefavorabil, soluri degradate), cu efecte asupra producției.

Eficiența depinde de asigurarea unui optim între „nutrient – formă chimică – fenofază de dezvoltare a plantei – concentrația soluției și doza aplicată”; chelații și sărurile de fosfor, potasiu aplicate foliar în matrici bine formulate au prezentat răspunsuri reproductibile și creșteri de producție la culturi diverse (cereale, porumb, pomicultură, legume).

Formule N/P/K și NPK aplicate foliar pot îmbunătăți calitatea și randamentul producției, cu efecte consecvente pentru indicatorii de calitate (proteine, TSS, culoare, fermitate) și fotosinteză, atunci când sunt sincronizate etapele de aplicare cu fenofazele de dezvoltare a plantei.

Nanofertilizatorii (în special nanocompozitele) oferă o eliberare controlată a nutrienților, transport tisular eficient și pot reduce dozele totale de fertilizant utilizat, dar cer o proiectare atentă (dimensiune, agregare, încărcarea de suprafață, liganzi) și validare pe culturi/condiții pedo-climatice.

Nanotehnologia aduce beneficii semnificative atât din punct de vedere agronomic, cât și operațional. La nivel agronomic nanofertilizatorii pot crește eficiența utilizării nutrienților, asigurând o eliberare controlată și o absorbție superioară de către plante. Din punct de vedere logistic aceste produse permit reducerea dozelor aplicate, scăderea frecvenței tratamentelor și îmbunătățirea compatibilității cu tehnologiile moderne de aplicare (drone, sisteme de dozare variabilă, soluții concentrate și stabile). Totuși utilizarea pe scară largă solicită evaluări riguroase de siguranță și un cadru reglementar clar, care să gestioneze potențialele riscuri ecotoxice și de bioacumulare.

Diatomita aplicată foliar are rol nutritiv direct limitat ca sursă de siliciu, dar este valoroasă ca material filmogen/purtător: reduce temperatura frunzei, îmbunătățește WUE, crește retenția și persistența soluției pe frunză și poate amplifica efectul fertilizanților foliari.

Când ținta este nutriția cu siliciu literatura recomandă silicat de potasiu sau acid silicic stabilizat; diatomita rămâne utilă în rol de carrier/film (și în unele contexte de protecție).

Formularea și tehnologia de aplicare sunt critice pentru suspensiile minerale (diatomită/zeolit) și presupune o micronizare fină, umectanți/dispersanți, aderenți, filtrare/duze adecvate, agitare și spălare a echipamentului, plus fereastră de aplicare cu RH ridicată și fără ploi imediate.

Efectele „particle film” depind de climă: câștiguri mai clare în ani/zonă cu stres termic și radiație ridicată; avantajele pot fi estompate în perioadele ploioase.

Integrarea cu agricultura de precizie (senzori, imagistică, aplicare variabilă, drone) face posibilă țintirea dozelor și sincronizarea intervențiilor, crescând randamentul investiției și reducând impactul asupra mediului.

Direcții viitoare de abordare a cercetării în domeniul aplicării foliare a diatomitei

Elaborarea unor protocoale factoriale de testare. Este necesară conceperea unor scheme experimentale factoriale care să permită separarea efectului nutritiv propriu-zis de cel fizic („particle film”) al diatomitei.

Optimizarea triadei: varietate × fenofază × doză. Pentru a crește eficiența fertilizanților foliari (inclusiv nano-NPK și combinații cu purtători minerali) sunt necesare studii sistematice care să coreleze răspunsul varietal (diferențe genetice în cuticulă, grosime frunză, stomatație), momentul aplicării (fenofaza BBCH optimă pentru absorbție și translocare) și concentrația/diluția soluției. Prin acest tip de optimizare multifactorială se pot identifica „ferestre fiziologice” ideale pentru aplicare și doze economice care maximizează absorbția, reduc fitotoxicitatea și cresc randamentul net. O astfel de abordare sprijină agricultura de precizie și reduce risipa de nutrienți.

Implementarea unei monitorizări multi-indicator pentru validarea eficienței. Evaluarea efectelor combinării diatomitei cu fertilizanți foliari ar trebui să se bazeze pe o analiză complexă de indicatori fiziologici și biochimici, nu doar pe randament. Parametrii propuși includ:

- **ΔT frunză** (diferența de temperatură a foliajului față de martor, prin termografie IR);
- **WUE (Water Use Efficiency)** sau indicatori proxy (gaz-schimb, transpirație, conductanță stomatică);
- **pigmenți fotosintetici (clorofilă, carotenoizi, antociani)** ca indicatori ai stării fiziologice;
- **conținut foliar de N, P, K și microelemente**, pentru a urmări mobilitatea nutrienților;
- **parametri de calitate ai recoltei** (TSS, proteină, conținut de zaharuri, culoare, fermitate);
- **randament final și raport cost/beneficiu.**

Coroborarea acestor indicatori într-o analiză integrată (fiziologică, chimică și economică) oferă o imagine completă asupra eficienței tratamentului și permite ajustarea fină a tehnologiei de aplicare.

Cercetările au fost realizate în cadrul Programul 5.7 – Parteneriat pentru Inovare, subprogramul 5.7.1 – Parteneriate pentru competitivitate, PN-IV-P7-P7.1-PTE-2024-0361, Contractul de finanțare nr.55PTE/2025, denumirea proiectului: „Produce multifuncționale cu aplicare foliară pe baza de diatomită”

Bibliografie

- Abdulqadir S. H., Bahar J. Mahmood, Hama S. J., Shakir S. B. 2025. *Effect of Spraying NPK-Nano Fertilizer at Two Application Times on the Growth and Yield Components of Two Wheat Cultivars in Two Locations*. Zanco Journal of Pure and Applied Sciences, 37(3), 143-156.
- Abdelnour S. A., El-Saadony M. T., Saghir S. A. M., Abd El-Hack M. E., Al-Shargi O. Y. A., Al-Gabri N., Salama A. 2020. *Mitigating negative impacts of heat stress in growing rabbits via dietary prodigiosin supplementation*. Livest. Sci. 240, 104220.
- Abd-El-Hack A., Mohamed E., Alaidaroos B. A., Farsi R. M., Abou-Kassem D. E., El-Saadony M. T., Ashour E. A. 2021. *Impacts of supplementing broiler diets with biological curcumin, zinc nanoparticles and Bacillus licheniformis on growth, carcass traits, blood indices, meat quality and cecal microbial load*. Animals 11 (7), 1878.
- Acharya A., Pal P. K. 2020. *Agriculture nanotechnology: Translating research outcome to field applications by influencing environmental sustainability*, NanoImpact, Volume 19, 2020, 100232, ISSN 2452-0748, <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100232>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452074820300264>)
- Akl B., Nader M. M., El-Saadony M. 2020. *Biosynthesis of silver nanoparticles by Serratia marcescens ssp sakuensis and its antibacterial application against some pathogenic bacteria*. J. Agric. Chem. Biotechnol. 11, 1-8.
- Ali Gharaghani A., Mohammadi Javarzari A., Vahdati K. 2018. *Kaolin particle film alleviates adverse effects of light and heat stresses and improves nut and kernel quality in Persian walnut*. Scientia Horticulturae, 239, 35-40.
- Ammar M. I., Hanafy H. 2024. *Effect of Diatomaceous Earth on Certain Pests as well as Yield Quality of Cucumber Plants Under Greenhouse Conditions*. New Valley Journal of Agricultural Science, 4(4).
- Asha S. G., Manivannan V., Parasuraman P., Kannan P., Thirukumaran K., Sivakumar R., et al. *Evaluating the efficacy of nano-NPK liquid fertilizer on rice: Impact on physiology, grain quality and soil microbial communities*. Plant Sci. Today (Internet). 2025 Sep. 29 (cited 2025 Sep. 29);12(sp1).
- Attia E. A., Elhawat N. 2021. *Combined foliar and soil application of silica nanoparticles enhances the growth, flowering period and flower characteristics of marigold (Tagetes erecta L.)*. Scientia Horticulturae, 282, 110015.
- Baughman R. H., Zakhidov A. A., de Heer W. A. 2002. *Carbon nanotubes – the route toward applications*. Science, 297(5582), 787–792.
- Beig B., Niazi M. B. K., Sher F., et al. 2022. *Nanotechnology-based controlled release of sustainable fertilizers. A review*. Environ Chem Lett 20, 2709–2726. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01409-w>
- Cao L., Zhou Z., Niu S., Cao C., Li X., Shan Y., Huang Q. 2017. *Positive-charge functionalized mesoporous silica nanoparticles as nanocarriers for controlled 2,4-dichlorophenoxy acetic acid sodium salt release*. Journal of agricultural and food chemistry, 66(26), 6594-6603.
- COM(2012) 572 final, *Second Regulatory Review on Nanomaterials*, Brussels, 3.10.2012.
- Constantinescu-Aruxandei D., Lupu C., Oancea F. 2020. *Siliceous natural nanomaterials as biorationals – Plant protectants and plant health strengtheners*. Agronomy, 10(11), 1791.

- Demeke E. D., Natei Ermias Benti N. E., Gizaw M., Teshome Taye Anbessa T., Mengistu W. M., Mekonnen Y. S. 2025. *A Comprehensive Review on Nano-Fertilizers: Preparation, Development, Utilization, and Prospects for Sustainable Agriculture in Ethiopia*. *Nanoscale Advances* 7(18), DOI: 10.1039/D4NA01068J.
- Deng H., Gao Y., Dasari T. P. S., Ray P. C., Yu H. 2016. *A facile 3D construct of graphene oxide embedded with silver nanoparticles and its potential application as water filter*. *J Miss Acad Sci*, 61(2), 190-197.
- Diao M., Yao M. 2009. *Use of zero-valent iron nanoparticles in inactivating microbes*. *Water Research*, 43(20), 5243-5251.
- Dimkpa C. O., McLean J. E., Britt D. W., Anderson A. J. 2013. *Antifungal activity of ZnO nanoparticles and their interactive effect with a biocontrol bacterium on growth antagonism of the plant pathogen *Fusarium graminearum**. *Biometals*, 26(6), 913-924.
- Duhan J. S., Kumar R., Kumar N., Kaur P., Nehra K., Duhan S. 2017. *Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture*. *Biotechnology Reports*, 15, 11-23.
- Distefano M., Cincotta F., Giuffrida F., Conduro C., Verzera A., Leonardi C., Mauro R. P. 2024. *Preharvest applications of monopotassium phosphate to improve fruit quality and volatiline composition in cold-stored cherry tomatoes*. *Horticultural Plant Journal* (in press). <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2023.12.016>
- El-Saadony M. T., El-Wafai N. A., El-Fattah A., Mahgoub S. 2018. *Biosynthesis, optimization and characterization of silver nanoparticles biosynthesized by *Bacillus subtilis* ssp *spizizenii* MT5 isolated from heavy metals polluted soil*. *Zagazig J. Agric. Res.* 45 (6), 2439-2454.
- El-Saadony M. T., Almoshadak A. S., Shafi M. I. E., Albaqami N. M., Saad A. M., El-Tahan A. M., Desoky El-S. M., Elnahal A. S. M., Almakas A., Abd El-Mageed T. A., Taha A. E., Elrys A. S., Helmy A. M. 2021. *Vital roles of sustainable nano-fertilizers in improving plant quality and quantity – an updated review*, *Saudi Journal of Biological Sciences*, Volume 28, Issue 12, 2021, Pages 7349-7359, ISSN 1319-562X, <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.032>.
- El-Saadony M. T., Desoky E. S. M., Saad A. M., Eid R. S., Selem E., Elrys A.S. 2021c. *Biological silicon nanoparticles improve *Phaseolus vulgaris* L. yield and minimize its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil*. *J. Environ. Sci.* 106, 1-14.
- El-Saadony M. T., Sitohy M. Z., Ramadan M. F., Saad A. M., 2021d. *Green nanotechnology for preserving and enriching yogurt with biologically available iron (II)*. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 69, (1) 102645.
- Elliott K. C. 2011. *Nanomaterials and the precautionary principle*. *Environmental Health Perspectives*, 119(6), A240-A240.
- El-Saadony M. T., Saad A. M., Taha F. T., Najjar A. A., Zabermaawi N. M., Nader M. M., AbuQamar Synan F., El-Tarabily K. A., Salama A., 2021e. *Selenium nanoparticles, from *Lactobacillus paracasei* HM1 capable of antagonizing animal pathogenic fungi, as a new source from human breast milk*. *Saudi J. Biol. Sci.* In press.
- Esser B., Schnorr J. M., Swager T. M. 2012. *Cover Picture: Selective Detection of Ethylene Gas Using Carbon Nanotube-based Devices: Utility in Determination of Fruit Ripeness*. *Angew. Chem. Int. Ed.* 23/2012. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(23), 5507-5507.
- Fageria N. K., Barbosa Filho M. P., Moreira A., Guimarães C. M. 2009. *Foliar Fertilization of Crop Plants*. *Journal of Plant Nutrition*, 32(6), 1044-1064. DOI: 10.1080/01904160902872826.
- Faraone N., Evans R., LeBlanc. 2020. *Soil and foliar application of rock dust as natural control agent for two-spotted spider mites on tomato plants*. *Scientific Reports*, 10, 12108. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69060-5>
- Fernández V., Brown P. H. 2013. *From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients*. *Frontiers in Plant Science*, 4, 289.

- Fernández V., Eichert T. 2009. *Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: Current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization*. Critical Reviews in Plant Sciences, 28(1-2), 36-68. <https://doi.org/10.1080/07352680902743069>
- Flores-Cano J. V., Leyva-Ramos R., Padilla-Ortega E., Mendoza-Barron J. 2013. *Adsorption of heavy metals on diatomite: mechanism and effect of operating variables*. Adsorption Science & Technology, 31(2-3), 275-291.
- Fraceto L. F., Grillo R., de Medeiros G. A., Scognamiglio V., Rea G., Bartolucci C. 2020. *Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have?* Front. Environ. Sci., 22 March 2016, Sec. Green and Sustainable Chemistry, Volume 4 – 2016. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>
- Gao Y. I. K. E., Zahid A., Naveed S. A., Attia K. A., Mohammed A. A., Chishti S. A., Uzair M. 2024. *Exogenous application of salicylic acid and NPK promotes tomato growth parameters, yield, and nutraceutical quality under cold stress*. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 52(4), 13667-13667.
- Geszke-Moritz M., Clavier G., Lulek J., Schneider R. 2012. *Copper- or manganese-doped ZnS quantum dots as fluorescent probes for detecting folic acid in aqueous media*. Journal of Luminescence, 132, 987-991.
- Ghasemzadeh A. 2012. *Global issues of food production*. Agrotechnology, 1, e102. <https://doi.org/10.4172/2168-9881.1000e102>
- Ghiurea M., Moale C., Oancea, F. 2020. *Effect of foliar application of siliceous nanomaterial on photosynthesis performance in sweet almond (Prunus dulcis)*. Proceedings, 57(1), 74. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020057074>
- Ghormade V., Deshpande M. V., Paknikar K. M. 2011. *Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants*. Biotechnology Advances, 29(6), 792-803.
- Gogos A., Knauer K., Bucheli T. D. 2012. *Nanomaterials in plant protection and fertilization: Current state, foreseen applications, and research priorities*. J. Agric. Food Chem., 60: 9781-9792.
- Gooding M. J., Davies W. P. 1992. *Foliar urea fertilization of cereals: A review*. Fertilizer Research, 32(2), 209–222. DOI: 10.1007/BF01048783
- Guo L. J. 2004. *Recent progress in nanoimprint technology and its applications*. J. Phys. D. Appl. Phys., 37(11): R123.
- Guleria G., Thakur S., Shandilya M., Sharma S, et al. 2023. *Nanotechnology for sustainable agro-food systems: The need and role of nanoparticles in protecting plants and improving crop productivity*. Plant Physiology and Biochemistry, Volume 194, 2023, Pages 533-549, ISSN 0981-9428. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.12.004>
- Hassanin A. A., Saad A. M., Bardisi E. A., Salama A., Sitohy M. Z. 2020. *Transfer of anthocyanin accumulating delila and rosea1 genes from the transgenic tomato micro-tom cultivar to moneymaker cultivar by conventional breeding*. J. Agric. Food Chem. 68 (39), 10741-10749.
- Hodoşan C., Nistor L., Poşan P., Bărbuică S. I., Ianiţchi D., Luţă G., Szilagyi L. 2024. *Pilot study on a liquid mineral foliar fertilizer mixed with herbicides for maize protection and nutrition*. Agriculture, 14(12), 2129.
- Huiyuan G., Jason C. W., Zhenyu W., Baoshan X. 2018. *Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients*. Curr. Opin. Environ. Sci. Health. 6, 77-83.
- ISO. 2023. *ISO 80004-1:2023—Nanotechnologies—Vocabulary—Part 1: Core vocabulary*. Geneva: International Organization for Standardization. (Implementat ca SR EN ISO 80004-1:2023 în România.)
- Jokar M., Safaralizadeh M. H., Hadizadeh F., Rahmani F., Kalani M. R. 2016. *Design and evaluation of an apta-nano-sensor to detect Acetamiprid in vitro and in silico*. Journal of Biomolecular Structure and Dynamics, 34(11), 2505-2517.

- Kah M., Kookana R. S., Gogos A., Bucheli T. D. 2018. *A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues*. Nature Nanotechnology, 13(8), 677-684. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0131-1>
- Khiew P. S., Tan T. K., Chiu W. S., Radiman S., Abd-Shukor R., Chia C. H. 2011. *Capping effect of palm-oil based organometallic ligand towards the production of highly monodispersed nanostructured material*. In Palm oil: Nutrition, uses and impacts. 189-219.
- Korsunsky A. M., Bedoshvili Y. D., Cvjetinovic J., Aggrey P., et al. 2020. *Siliceous diatom frustules: A smart nanotechnology platform*. Materials Today: Proceedings, 33, 2032-2040. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.571> [SciSpace+1](#)
- Kumar S., Kumar D., Dilbaghi N. 2017. *Preparation, characterization, and bio-efficacy evaluation of controlled release carbendazim-loaded polymeric nanoparticles*. Environmental Science and Pollution Research, 24, 926-937.
- Laane H. M. 2018. *The effects of foliar sprays with different silicon compounds*. Plants, 7(2), 45. <https://doi.org/10.3390/plants7020045>
- Lang X., Hirata A., Fujita T., Chen M. 2011. *Nanoporous metal/oxide hybrid electrodes for electrochemical supercapacitors*. Nature Nanotechnology, 6(4), 232-236.
- Lin Y. W., Huang C. C., Chang H. T. 2011. *Gold nanoparticle probes for the detection of mercury, lead and copper ions*. Analyst, 136(5), 863-871.
- Lombi E., Nowack B., Baun A., McGrath S. P. 2012. *Evidence for effects of manufactured nanomaterials on crops is inconclusive*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(49), E3336.
- Lu G.Q., Zhao X.S. 2004. *Nanoporous materials: Science and engineering*, Series on Chemical engineering, 4, Imperial Coll. Press, 897.
- Mahmood B. J., Shakir S. B., Sabir D. A., Abdulqadir S. H., Hama S. J. 2024. *Response of two bread wheat (Triticum aestivum L.) varieties to foliar application of Nano fertilizers at two growing stages and its effect on their qualitative characteristics*. Journal of Kirkuk University for Agricultural Sciences, 15(1).
- Maurice P. A., Hochella M. F. 2008. *Nanoscale particles and processes: A new dimension in soil science*. Advances in Agronomy, 100, 123-153.
- McBratney A., Whelan B., Ancev T., Bouma J. 2005. *Future directions of precision agriculture*, Prec. Agric., 6: 7-23.
- Moale C., Ghiurea M., Sîrbu C. E., Somoghi R., Cioroianu T. M., Faraon V. A., Lupu C., Trica B., Constantinescu-Aruxandei D., Oancea F. 2021. *Effects of siliceous natural nanomaterials applied in combination with foliar fertilizers on physiology, yield and fruit quality of the apricot and peach trees*. Plants, 10(11), 2395.
- Mukhopadhyay S. S. 2014. *Nanotechnology in agriculture: prospects and constraints*. Nanotechnol Sci Appl. 2014 Aug 4;7:63-71. doi: 10.2147/NSA.S39409. PMID: 25187699; PMCID: PMC4130717.
- Nadiminti P. P., Dong Y. D., Sayer C., Hay P., Rookes J. E., Boyd B. J., Cahill D. M. 2013. *Nanostructured liquid crystalline particles as an alternative delivery vehicle for plant agrochemicals*. ACS applied materials & interfaces, 5(5), 1818-1826.
- Nakache E., Poulain N., Candau F., Orecchioni A. M., Irache J. M. 2000. *Biopolymer and polymer nanoparticles and their biomedical applications*. In Handbook of nanostructured materials and nanotechnology. 577-635. Academic Press.
- National Nanotechnology Initiative (NNI). <http://www.nano.gov/> (accessed March 1, 2017).
- Niu J., Liu C., Huang M., Liu K., Yan D. 2021. *Effects of foliar fertilization: A review of current status and future perspectives*. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21, 104-118. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00346-3>

- Noack S. R., McBeath T. M., McLaughlin M. J. 2010. *Potential for foliar phosphorus fertilisation of dryland cereal crops*. Plant and Soil, 325, 209-219.
- Oancea F. 2022. *Development of safe nanoagrochemicals – The nanoporous route*. Chemistry Proceedings, 7(1), 68.
- Oliveira H. C., Stolf-Moreira R., Martinez C. B. R., Grillo R., de Jesus M. B., Fraceto L. F. 2015. *Nanoencapsulation enhances the post-emergence herbicidal activity of atrazine against mustard plants*. PLoS One, 10(7), e0132971.
- Panahandeh S., Ahmadi K. 2022. *Diatomaceous earth foliar spraying along with adjuvants in pistachio orchards associated with the common pistachio psylla, Agonoscena pistaciae*. Journal of Pesticide Science, 47(3), 125-130.
- Paramo L. A., Feregrino-Pérez A. A., Guevara R., Mendoza S., Esquivel K. 2020. *Nanoparticles in Agroindustry: Applications, Toxicity, Challenges, and Trends*. Nanomaterials, 10(9), 1654. <https://doi.org/10.3390/nano10091654>
- Podsiadlo P., Kaushik A. K., Arruda E. M., Waas A. M., Shim B. S., Xu J., Nandivada H., Pumplin B. G., Lahann J., Ramamoorthy A., Kotov N. A. 2007. *Ultrastrong and stiff layered polymer nanocomposites*. Science, 318(5847), 80-83.
- Prasad R., Bhattacharyya A., Nguyen Q. D. 2017. *Nanotechnology in Sustainable Agriculture: Recent Developments, Challenges and Perspectives*. Front. Microbiol. 8:1014. doi: 10.3389/fmicb.2017.01014
- Rajiv P., Rajeshwari S., Venckatesh R. 2013. *Bio-Fabrication of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of Parthenium hysterophorus L. and its size-dependent antifungal activity against plant fungal pathogens*. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 112, 384-387.
- Raliya R., Tarafdar J. C., Gulecha K., Choudhary K., Ram R., Mal P., Saran R. 2013. *Review article: Scope of nanoscience and nanotechnology in agriculture*, J. Appl. Biol. Biotechnol., 1: 41-44.
- Restrepo-García A. M., Hurtado-Salazar A., Soto-Giraldo A. 2025. *Silicon as a Tool to Manage Diaphorina citri and Relation Soil and Leaf Chemistry in Tahiti Lime*. Agriculture, 15(18), 1961.
- Reka A. A. 2022. *Diatomaceous earth: A literature review*. Journal of Natural Sciences and Mathematics of UT, 7(13-14), 256-268. PDF: <https://eprints.unite.edu.mk/1086/1/JNSM%2013-14%20e%20formatuar-256-268.pdf>
- Rizzello L., Pompa P. P. 2014. *Nanosilver-based antibacterial drugs and devices: Mechanisms, methodological drawbacks, and guidelines*. Chemical Society Reviews, 43(5), 1501-1518.
- Quintarelli V., Ben Hassine M., Radicetti E., Stazi S. R., Bratti A., Allevato E., Mancinelli R., Jamal A., Ahsan M., Mirzaei M., et al. 2024. *Advances in Nanotechnology for Sustainable Agriculture: A Review of Climate Change Mitigation*. Sustainability 2024, 16, 9280. <https://doi.org/10.3390/su16219280>
- Saad A. M., El-Saadony M. T., El-Tahan A. M., Sayed S., Moustafa M. A., Taha A. E., Ramadan M. M. 2021. *Polyphenolic extracts from pomegranate and watermelon wastes as substrate to fabricate sustainable silver nanoparticles with larvicidal effect against Spodoptera littoralis*. Saudi J. Biol. Sci. In press.
- Samani M., Ahlawat Y. K., Golchin A., Alikhani H. A., Baybordi A., Mishra S. 2024. *Modified diatomite for soil remediation and its implications for heavy metal absorption in Calendula officinalis*. BMC Plant Biology, 24(1), 357.
- Simko I., Zhao R., Peng H. 2025. *Differential Impact of SiO₂ Foliar Application on Lettuce Response to Temperature, Salinity, and Drought Stress*. Plants, 14(12), 1845.
- Shang Y., Hasan M. K., Ahammed G. J., Li M., Yin H., Zhou J. 2019. *Applications of Nanotechnology in Plant Growth and Crop Protection: A Review*. Molecules. Jul 13;24(14):2558. doi: 10.3390/molecules24142558. PMID: 31337070; PMCID: PMC6680665.

- Sheiha A. M., Abdelnour S. A., El-Hack A., Mohamed E., Khafaga A. F., Metwally K. A., Ajarem J. S., Maooda S. N., Allam A. A., El Saadony M. T. 2020. *Effects of dietary biological or chemical-synthesized nano-selenium supplementation on growing rabbits exposed to thermal stress*. *Animals* 10, 430.
- Sîrbu C. E., Deşliu-Avram M., Cioroianu T. M., Constantinescu-Aruxandei D., Oancea F. 2023. *High-temperature influences plant bio-stimulant-like effects of the combination particle film-forming materials – Foliar fertilizers on apple trees*. *Agriculture*, 13(1), 178.
- Thakur N., Thakur Nikesh, Kumar A., Vijay Kumar Thakur, Kalia S., Arya V., Kumar A., Kyzas G. 2024. *A critical review on the recent trends of photocatalytic, antibacterial, antioxidant and nanohybrid applications of anatase and rutile TiO₂ nanoparticles*, *Science of The Total Environment*, Volume 914, 2024, 169815, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169815>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723084474>)
- Toksha B., Joshi S., Chatterjee A. 2024. *The Potential of Nanocomposite Fertilizers for Sustainable Crop Production*. In: Abd-El Salam, K.A., Alghuthaymi, M.A. (eds) *Nanofertilizers for Sustainable Agroecosystems. Nanotechnology in the Life Sciences*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41329-2_4
- Tarafdar J. C., Sharma S., Raliya R. 2013. *Nanotechnology: Interdisciplinary science of applications*, *Afr. J. Biotechnol.*, 12: 219-226.
- Vasquez Y., Henkes A. E., Bauer J. C., Schaak R. E. 2008. *Nanocrystal conversion chemistry: A unified and materials-general strategy for the template-based synthesis of nanocrystalline solids*. *Journal of Solid State Chemistry*, 181(7), 1509-1523.
- Wibowo K. M., Sahdan M. Z., Ramli N. I., Muslihati A., Rosni N., Tsen V. H., Saim H., Ahmad S.A., Sari Y., Mansor Z. 2018. *Detection of Escherichia coli bacteria in wastewater by using graphene as a sensing material*. In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.995, No.1, 012063. IOP Publishing.
- Yadav N., Garg V. K., Chhillar A. K., Rana J. S. 2023, *Recent advances in nanotechnology for the improvement of conventional agricultural systems: A review*. *Plant Nano Biology*, Volume 4, 2023, 100032, ISSN 2773-1111, <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100032>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773111123000098>)
- Ye X., Kang S., Wang H., Li H., Zhang Y., Wang G., Zhao H. 2015. *Modified natural diatomite and its enhanced immobilization of lead, copper and cadmium in simulated contaminated soils*. *Journal of hazardous materials*, 289, 210-218.
- Zhang Y., Lv S., Wang H., Tu M., Xi Z., et al. 2025. *Applications of nanomaterials in agricultural production*. *Fruit Research* 5: e004, <https://doi.org/10.48130/frures-0024-0037>
- Zhuravlev L. T. 2000. *The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 173(1-3), 1-38.
- Uthappa U. T., Brahmkhatri V., Sriram G., Jung H. Y., Yu J., Kurkuri N., Aminabhavi T. M., Altalhi T., Neelgund G. M., Kurkuri M. D. 2018. *Nature-engineered diatom biosilica as drug delivery systems*. *Journal of Controlled Release*, 281, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.05.013> [PubMed+1](#)
- Wojcik P., Wojcik M. 2003. *Effects of potassium and calcium foliar sprays on apple tree yield and fruit quality*. *Journal of Plant Nutrition*, 26(4), 639-657.
- Wu L., Wang F., Sha R., Li X., Yu K., Feng J. 2023. *The effect of N and KH₂PO₄ on skin color, sugars, and organic acids of 'Flame Seedless' grape*. *Agronomy*, 13(3), 902. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030902>
- Wu L., Zhang B., Lu P., et al. 2021. *The effect of foliar application of K₂SO₄ or KH₂PO₄ on skin color of the 'Kyoho' grape*. *Agronomy*, 11(11), 2361. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112361>
- Ye X., Kang S., Wang H., Li H., Zhang Y. 2015. *Modified natural diatomite and its enhanced immobilization of lead, copper and cadmium in simulated contaminated soils*. *Journal of Hazardous Materials*, 289, 210-218.

Zahirul I. M., Lee Y. T., Akter M. M., Kang H. M. 2018. *Effect of pre-harvest potassium foliar spray and postharvest storage methods on quality and shelf life of cherry tomatoes*. Research Journal of Biotechnology, 13(7), 49-54. (text disponibil online)

Zhuravlev L. T. 2000. *The surface chemistry of amorphous silica*. Colloids and Surfaces, 173, 1-39.

Xiaojia He, Hua Deng, Huey-min Hwang 2019. *The current application of nanotechnology in food and agriculture*. Journal of Food and Drug Analysis, Volume 27, Issue 1, 2019, 1-21, ISSN 1021-9498.
<https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.12.002>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S102194981830173X>)