

## Influența fertilizării și a amendării în menținerea sănătății solului: concluzii dintr-un experiment de lungă durată de peste 60 de ani

Patrick Ursan, Beniamin Andras, Balasz Acs, Smit Gergely, Suzana Mondici

Stațiunea de Cercetare Dezvoltare Agricolă Livada

Autor corespondent: [ursanpatricklte@gmail.com](mailto:ursanpatricklte@gmail.com)

### Rezumat

Lucrarea prezintă rezultatele obținute în cadrul unor experimente de lungă durată, înființate în 1962, respectiv 1967 pe soluri acide, cu regimuri variate de fertilizare și amendare. Respirația solului a fost măsurată in situ în anul 2022, la mai puțin de un an după amendarea cu oxid de calciu (CaO), într-un context climatic caracterizat printr-o perioadă secetoasă urmată de precipitații moderate. Rezultatele au evidențiat o creștere accentuată a emisiilor de dioxid de carbon (CO<sub>2</sub>) în variantele amendate asociate cu fertilizare organică + minerală. În anul 2023, la aproape doi ani de la amendare și în condiții pluviometrice mai echilibrate, valorile respirației microbiene au fost mai moderate, dar s-au menținut ridicate în variantele cu pH neutru – alcalin.

S-a cuantificat relația dintre producțiile vegetale cumulate (1995-2023) și profilul funcțional al microbiotei solului (determinat în 2023 prin Biolog EcoPlates). Deși producțiile cresc constant cu nivelul de fertilizare (până la +79% la N5), activitatea metabolică microbială atinge un maximum la doze moderate (N3-N4, +12-21%) și scade ușor la doze excesive (N5, +0,5%), sugerând posibile efecte de stres trofic sau acidifiere. Corectarea reacției solului fără aplicare de fertilizanți nu determină o activitate metabolică ridicată, însă amplifică diferențele de producție între tratamente (între 611 q/ha și 888 q/ha).

Bacteriile izolate de *Pseudomonas aeruginosa* din solurile tratate cu doze mari de gunoi de grajd (60 t/ha) au prezentat o rezistență antimicrobiană mai ridicată decât cele din tratamente moderate (20t/ha).

**Cuvinte cheie:** Amendare și fertilizare de lungă durată, respirația solului, dioxid de carbon, Biolog EcoPlates, rezistență antimicrobiană

### Introducere

#### *Respirația solului*

Fiind al doilea cel mai mare flux de carbon (C) dintre ecosistemele terestre și atmosferă, respirația solului joacă un rol important în reglarea rezervelor de carbon din sol și a ciclului acestuia în ecosistemele terestre (Lal, 2004). Respirația solului, inclusiv respirația autotrofă, se referă în mod specific la respirația prin rădăcini, care eliberează dioxid de carbon (CO<sub>2</sub>) pe măsură ce compușii bogați în energie sunt metabolizați pentru a alimenta creșterea și a susține funcțiile vitale ale plantelor. Respirația heterotrofă în sistemele subterane, pe de altă parte, este constituită în principal din dioxid de carbon generat de activitatea metabolică a microflorei în procesele de descompunere (Lal, 2004).

Se evidențiază o problemă complexă, aceea că atingerea unor producții ridicate presupune aplicarea de fertilizanți care să furnizeze azot, fosfor și potasiu. Pe solurile acide, aplicarea azotului accelerează acidifierea, ceea ce impune amendarea periodică pentru menținerea pH-ului optim. Amendarea cu calcar are însă costuri climatice (emisii de CO<sub>2</sub>) și poate modifica ciclul azotului (N), fosforului (P) și potasiului (K).

Utilizarea inputurilor agrochimice a crescut semnificativ în ultimii ani, datorită creșterii populației globale (Fuglie și colab., 2024). Producția alimentară se bazează pe o varietate de

îngrășăminte chimice, cum ar fi îngrășămintele cu azot, care numai în 2022 au reprezentat aproximativ 56% din consumul total global, în timp ce îngrășămintele cu fosfat și potasiu au deținut ponderi de 24%, respectiv 20% (FAO, 2022). În ansamblu, utilizarea globală a îngrășămintelor a crescut cu peste 800% în ultimele patru-cinci decenii, reflectând intensificarea practicilor agricole (FAO, 2022).

Această creștere globală a inputurilor agricole a avut consecințe directe asupra ciclului carbonului, afectând echilibrul dintre fixarea și emisia de CO<sub>2</sub> din sol. Activitățile antropice din ultimii 150 de ani – în special fertilizarea intensivă și prelucrarea mecanică a solului – au lăsat o amprentă profundă asupra ciclurilor biogeochimice (Andrés și colab., 2022).

Fertilizarea azotată determină, de regulă, acidifierea solului și acumularea de nitrați, efecte care pot duce, în funcție de condițiile pedoclimatice, la creșterea sau reducerea temporară a fluxurilor de CO<sub>2</sub>. Fosforul și potasiul exercită o influență mai redusă asupra respirației solului atunci când sunt aplicate individual. Totuși interacțiunea lor cu azotul sau calciul poate amplifica semnificativ emisiile de CO<sub>2</sub>, datorită efectelor sinergice asupra activității microbiene și a proceselor de mineralizare. În plus, modificările în conținutul de nitrați din sol pot influența respirația solului pe termen scurt, aceasta putând fi fie redusă, fie intensificată, în funcție de condițiile pedoclimatice și de disponibilitatea substratului organic (Zhang și colab., 2024).

#### ***Azotul (N) – efecte asupra activității microbiene și fluxului CO<sub>2</sub> din sol***

Azotul este adesea elementul cel mai limitativ pentru microorganismele, adăugarea de azot poate stimula direct biomasa microbială dar și radiculară, intensificându-se descompunerea materiei organice și, în consecință, fluxul CO<sub>2</sub> din sol. Studiile de metaanaliza au demonstrat că azotul determină o creștere a respirației solului direct proporțională cu doza aplicată. Efectul depresiv al dozelor mari de azot asupra valorii pH ar putea induce o restrângere a comunităților microbiene care descompun anumite substraturi din sol, în consecință activitatea și respirația microflorei fiind diminuate în cazul acestor tratamente. Formele de azot aplicate influențează de asemenea profund respirația microbială, ionul de amoniu (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) și fertilizantii care îl generează (ureea) tind să acidificeze mai profund solul decât nitrații (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (Li și colab., 2023). De asemenea azotul are o influență deosebită asupra ciclurilor de carbon din agroecosisteme, fiind principalul factor care controlează dinamica pool-urilor de carbon (D. Powlon-When C, think N).

#### ***Fosforul (P) – efecte asupra activității microbiene și fluxului CO<sub>2</sub> din sol***

Fosforul este un element structural esențial (în ATP, acizi nucleici, fosfolipide) și joacă un rol major în metabolismul energetic microbial. Meta analizele la scara globală sugerează că fertilizarea unilaterală cu fosfor nu modifică semnificativ respirația solului. În schimb asocierea azotului cu fosforul poate majora puternic respirația, chiar și în zone unde azotul aplicat unilateral o diminuează, inversând tendința (Khan și colab., 2023).

#### ***Potasiul (K) – efecte asupra activității microbiene și fluxului CO<sub>2</sub> din sol***

Potasiul este un nutrient macro necesar plantelor pentru fotosinteză, reglarea stomatelor, sinteza proteinelor și activarea multor enzime. Spre deosebire de azot și fosfor potasiul nu intră în structura compușilor organici de bază ai microorganismelor; el acționează însă ca ion esențial pentru echilibrul osmotic și cofactor enzimatic în celulele microbiene. Efectul direct al fertilizării cu potasiu asupra ratei respirației microbiene este de obicei redus, fertilizarea unilaterală cu potasiu nu provoacă salturi notabile în CO<sub>2</sub>, decât în situații de carență severă. Prin urmare potasiul influențează respirația solului în principal într-un mod indirect, mediind creșterea plantelor: un nivel optim de potasiu îmbunătățește sănătatea și productivitatea plantelor, conducând la sisteme

radiculare mai viguroase și la un aport mai mare de carbon în sol (exudate radiculare și resturi vegetale) (Hasanuzzaman și colab., 2018).

### ***Amendamente calcaroase (CaCO<sub>3</sub>, CaO) – rolul pH-ului în respirația solului***

Aplicarea de amendamente calcaroase (carbonat de calciu – var nestins, sau oxid de calciu – var stins) are ca scop neutralizarea toxicității ionilor de hidrogen (H<sup>+</sup>) și aluminiu (Al<sup>3+</sup>) și ridicarea pH-ului solului. Amendarea determină o creștere a respirației solului prin mai multe mecanisme complementare. În primul rând, prin adăugarea de calcar, aciditatea solului este neutralizată, iar reacția chimică dintre ionii de carbonat și protonii (H<sup>+</sup>) din sol duce la eliberarea de CO<sub>2</sub>, contribuind la fluxul total de respirație măsurat. În al doilea rând, creșterea valorii pH-ului ca urmare a amendării îmbunătățește semnificativ condițiile de dezvoltare a plantelor. Un pH mai apropiat de neutralitate favorizează formarea unor sisteme radiculare mai dezvoltate și mai active din punct de vedere fiziologic, ceea ce amplifică respirația autotrofă (radiculară) și stimulează procesele metabolice din rizosferă. În al treilea rând, comunitățile microbiene beneficiază direct de creșterea pH-ului. În mediul mai puțin acid, microorganismele neutrofile și alcalofile își intensifică activitatea metabolică, iar descompunerea substraturilor organice este accelerată. Astfel, calcarul favorizează atât creșterea biomasei microbiene, cât și o rată mai ridicată de mineralizare a carbonului. Un fenomen important, adesea trecut cu vederea, este acela că amendarea cu var poate crește disponibilitatea fosfaților prin stimularea mineralizării fosforului organic din sol (Yu și colab., 2023).

### ***Limitări***

Rezultatele măsurătorilor respirației solului pot varia semnificativ în funcție de locul și condițiile de efectuare – în laborator sau pe teren. Solul prezintă o eterogenitate spațială ridicată, determinată de textură, umiditate, conținutul de materie organică și activitatea rădăcinilor. Din acest motiv se recomandă ca măsurătorile respirației să fie realizate în mai multe puncte pentru fiecare tratament, iar valorile să fie ulterior mediate pentru a obține o imagine reprezentativă.

Respirația solului este, de asemenea, puternic influențată de variațiile sezoniere și diurne ale temperaturii și umidității. Valorile maxime se înregistrează de regulă în perioada verii, când activitatea biologică este intensă, iar temperatura și umiditatea solului ating niveluri optime. În schimb iarna ratele de respirație scad considerabil, datorită reducerii activității microbiene și a respirației radiculare. Acoperirea terenului cu vegetație contribuie semnificativ la intensitatea procesului, respirația rădăcinilor și a rizosferei putând reprezenta până la jumătate din respirația totală a solului. Totodată dinamica umidității are un rol esențial: perioadele de secetă prelungită urmate de precipitații abundente declanșează un răspuns rapid și intens al microorganismelor din sol, fenomen cunoscut sub denumirea de Birch effect. În aceste situații fluxurile de CO<sub>2</sub> pot crește de două până la trei ori față de perioadele fără stres hidric. Pentru o interpretare corectă se recomandă corelarea valorilor respirației cu parametri concomitenți măsurați (temperatura solului, umiditatea, conținutul de carbon organic, densitatea radiculară) și utilizarea de metode standardizate care să minimizeze efectele variabilității spațiale și temporale.

### ***Biolog Ecoplates Diversitate funcțională***

Diversitatea funcțională a comunităților microbiene reprezintă un indicator esențial al sănătății și stabilității ecosistemelor edafice. Microorganismele controlează ciclurile biogeochimice și procesele de transformare a materiei organice, influențând direct fertilitatea solului. Metoda Biolog Ecoplates permite evaluarea capacității comunităților microbiene de a utiliza diferite substraturi carbonice, oferind o imagine integrată asupra activității metabolice și adaptării la condițiile de mediu. Prin această abordare pot fi identificate variații funcționale între tratamente și

corelate efectele fertilizării sau amendării cu parametri precum pH-ul, umiditatea și aportul de materie organică.

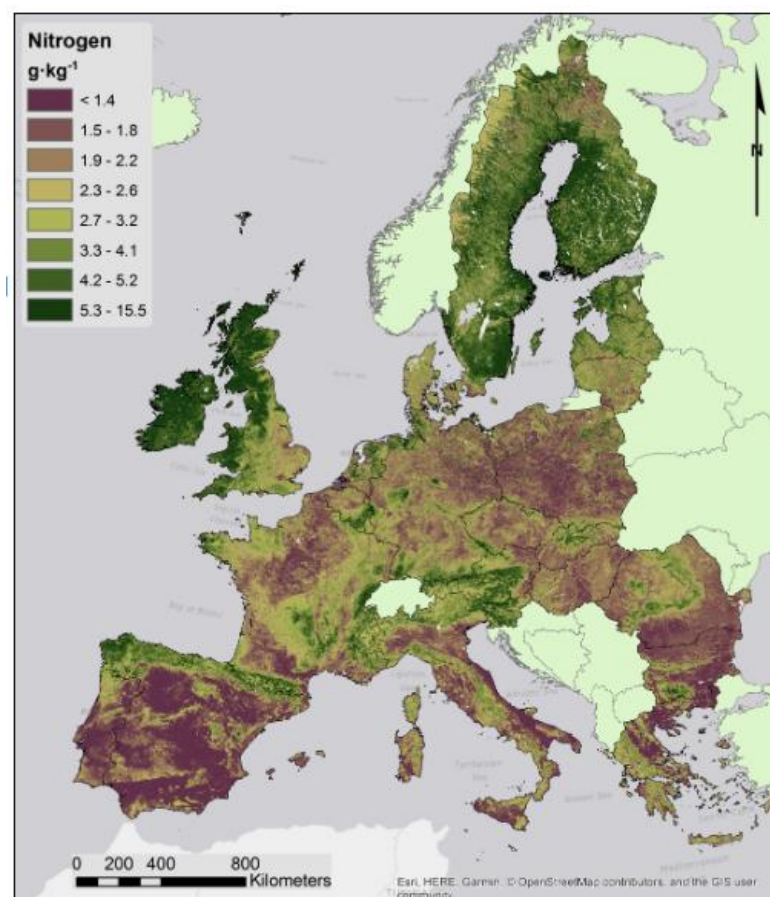
### ***Tipul solurilor și acumulările de elemente nutritive din soluri de la Livada***

Solurile din cadrul experimentului de lungă durată de la Livada sunt încadrate predominant în clasele Brun Luvic și Luvisol albic, dezvoltate pe depozite sedimentare fluviale, cu nivelul apei freactice situat la aproximativ 4-6 metri adâncime. Aceste tipuri de Luvisol sunt reprezentative pentru zona de nord-vest a României, caracterizată printr-un climat temperat-continental și o textură fină, bogată în argilă, care influențează dinamica elementelor nutritive și procesele microbiene din sol.

#### ***Solul brun-luvic (Haplic Luvisol)***

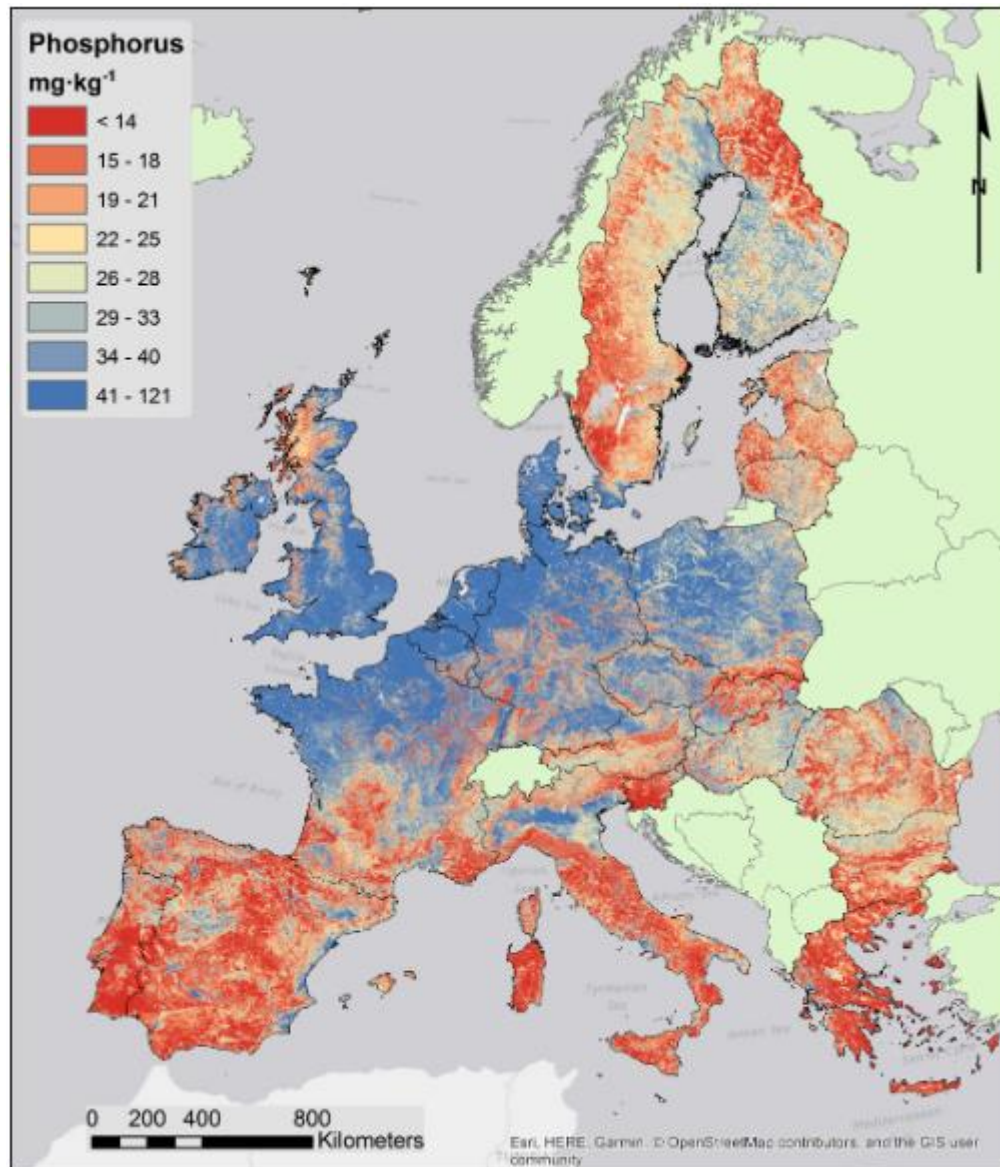
Profilul pedologic al Luvisolului haplic este de tip Ap–E1–EB–Bt1–Bt2–Bt3. Din punct de vedere agrochimic, orizontul Ap prezintă un conținut redus de humus (1,8-2,0%), un nivel scăzut de fosfor mobil (P-AL = 11 mg/kg), un conținut mediu spre bun de potasiu mobil (K-AL = 144 mg/kg) și o reacție moderat până la puternic acidă (pH = 5,5-6,0). Aceste caracteristici corespund unui sol cu fertilitate moderată, în care textura fină și fracția argiloasă favorizează retenția cationilor, însă mobilitatea redusă a fosforului rămâne un factor limitativ. Principalele constrângeri agronomice sunt legate de aciditatea solului și de disponibilitatea limitată a elementelor nutritive, în special a fosforului.

### ***Distribuția spațială a principalilor nutrienți din sol (N, P, K) în Uniunea Europeană (adaptat după Ballabio și colab., 2019)***



**Figura 1.** Distribuția spațială a conținutului total de azot (g/kg) în solurile din Uniunea Europeană (sursa: Ballabio și colab., 2019)

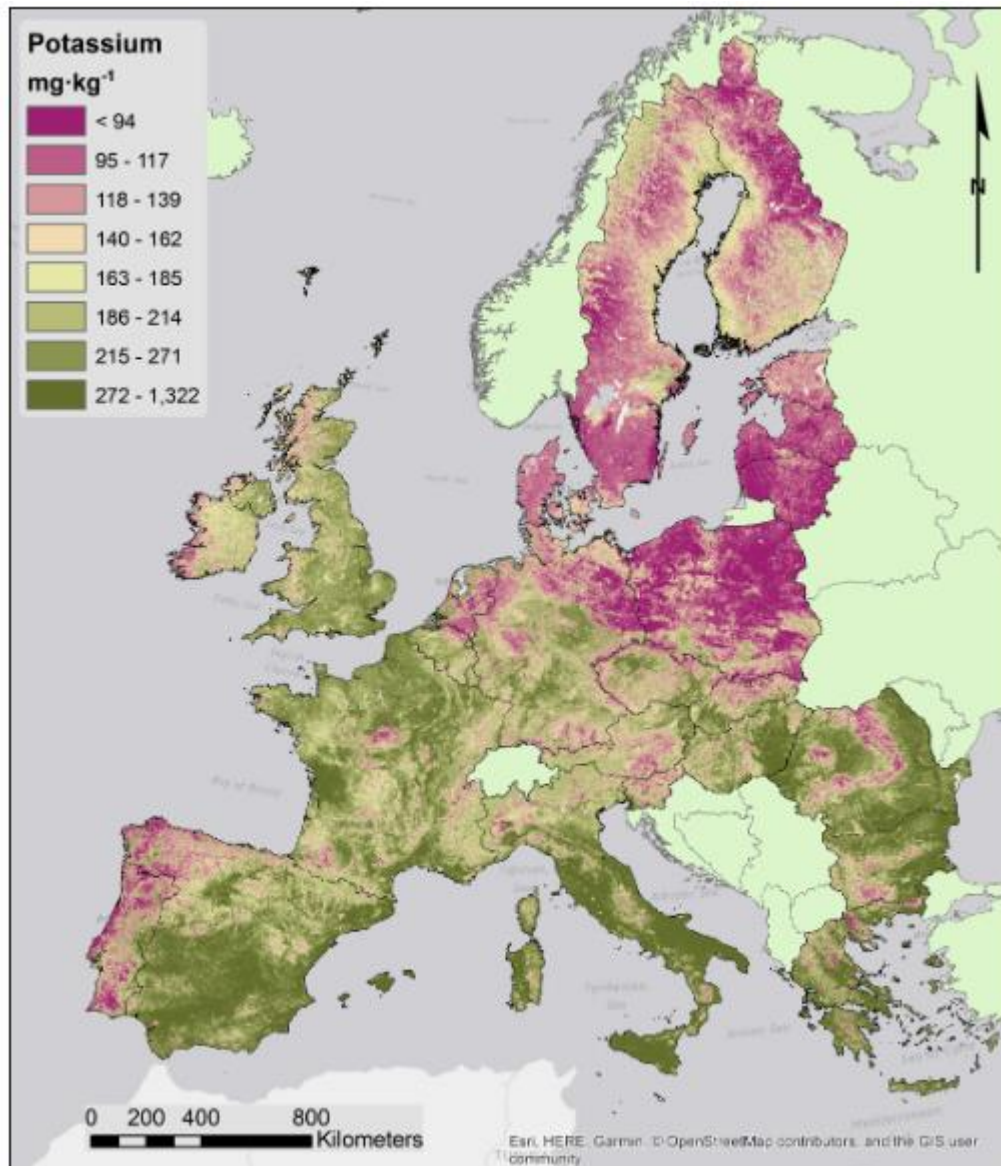
La scară continentală, distribuția nutrienților din sol prezintă gradienti clari datorită climei și utilizării terenului (Ballabio și colab., 2019). În ceea ce privește azotul total (N) (figura 1), cele mai ridicate valori ( $> 3,3$  g/kg) se înregistrează în Europa de Nord și Atlantică, în timp ce regiunile sudice și sud-estice coboară frecvent sub  $2,0$  g/kg. România se situează într-un interval intermediar ( $1,9-2,6$  g/kg), însă în cazul regiunii Livada valorile determinate local sunt considerabil mai reduse ( $NT = 0,111\%$ ), ceea ce indică rezerve limitate de azot total și o fertilitate moderată spre scăzută, influențată de textura solului și de conținutul modest de materie organică.



**Figura 2.** Distribuția spațială a conținutului de fosfor disponibil ( $\text{g kg}^{-1}$ ) în solurile din Uniunea Europeană (sursa: Ballabio și colab., 2019).

Fosforul (P): Harta la scară continentală indică niveluri reduse de fosfor (figura 2) ( $< 20$   $\text{mg/kg}$ ) în Europa de Est, aspect care este în concordanță cu valorile determinate la Livada ( $P\text{-AL} = 11-16$   $\text{mg/kg}$ ), reflectând un conținut scăzut de fosfor disponibil în sol.

Potasiul (K): Potasiul prezintă o tendință inversă (figura 3), cu concentrații mai ridicate în regiunile sudice și centrale ale Europei. Solurile din Livada, cu valori ale  $K\text{-AL}$  cuprinse între 90 și 144  $\text{mg/kg}$ , se încadrează în clasa medie, fapt susținut de capacitatea mare de schimb cationic determinată de textura lor bogată în argilă.

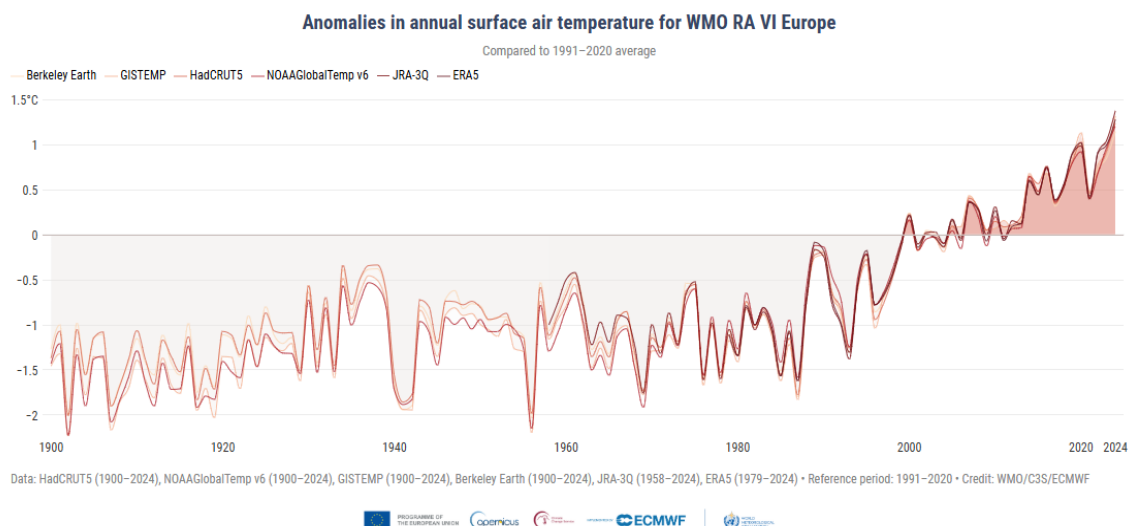


**Figura 3.** Distribuția spațială a conținutului de potasiu schimbabil ( $\text{g kg}^{-1}$ ) în solurile din Uniunea Europeană (sursa: Ballabio și colab., 2019).

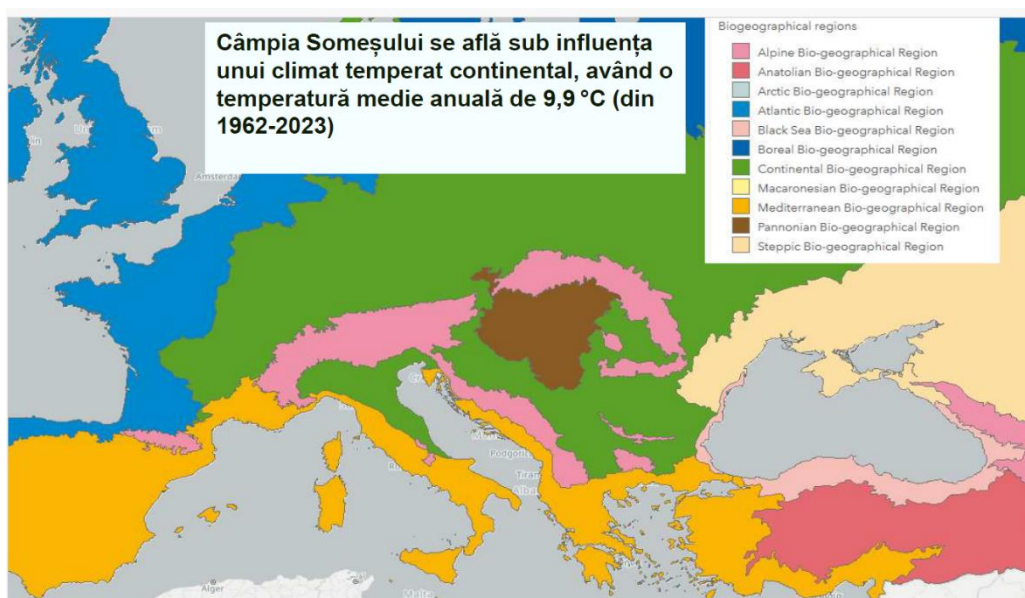
### ***Condițiile climatice din Europa și Livada***

Creșterea accentuată a temperaturilor în Europa, vizibilă mai ales după anul 1980, stimulează procesele biologice și microbiene din sol, intensificând respirația solului și eliberarea de  $\text{CO}_2$  în atmosferă. Astfel, încălzirea contribuie la un efect de feedback pozitiv, prin care solurile devin surse tot mai active de carbon.

Subprovincia Panonică de Nord, care include zona de câmpie corespunzătoare teritoriului Stațiunii de Cercetare-Dezvoltare Agricolă (SCDA) Livada, este influențată de un climat temperat cu nuanță subatlantică (figura 4), conform clasificării Köppen, având formula climatică cfbx. Pentru caracterizarea agroclimatică analiza se concentrează asupra resurselor termice, precum și asupra caracteristicilor și fluctuațiilor resurselor de umiditate, factori cheie care determină potențialul de producție agricolă și intensitatea respirației solului.



**Figura 4.** Creșterea temperaturii la suprafața solului în perioada 1900–2024 (sursa: COPERNICUS).

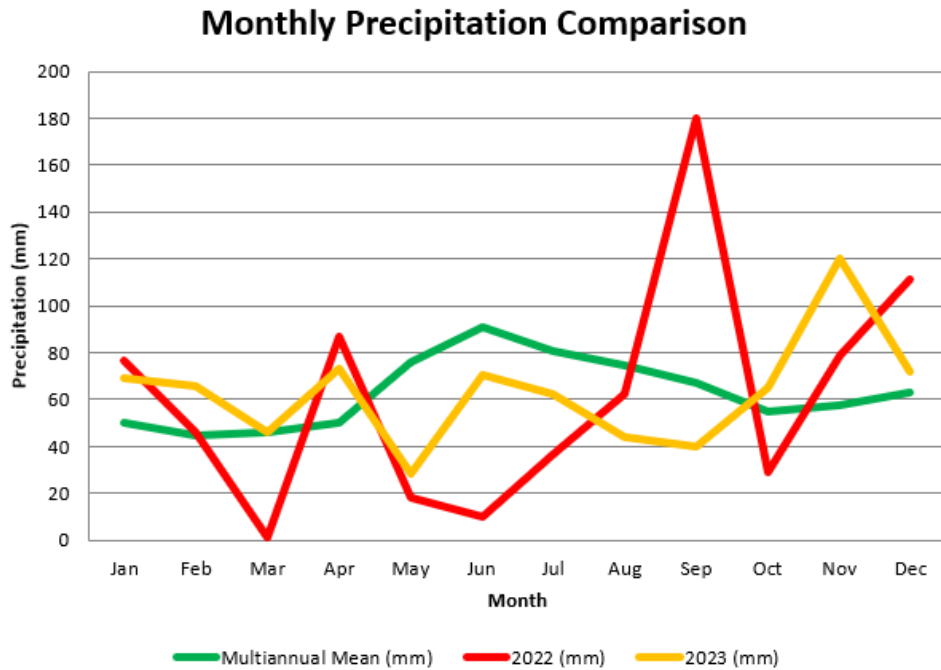


Schimbări ale temperaturii (°C)	Schimbări ale precipitațiilor (mm)
1962-1984: 23 ani (9.20°C)	1962-1984: 23 ani (742.38 mm)
1985-1994: 10 ani (10.75°C)	1985-1994: 10 ani (605.81 mm)
1995-2004: 10 ani (10.76°C)	1995-2004: 10 ani (676.89 mm)
2005-2023: 19 ani (11.33°C)	2005-2023: 19 ani (790.04 mm)

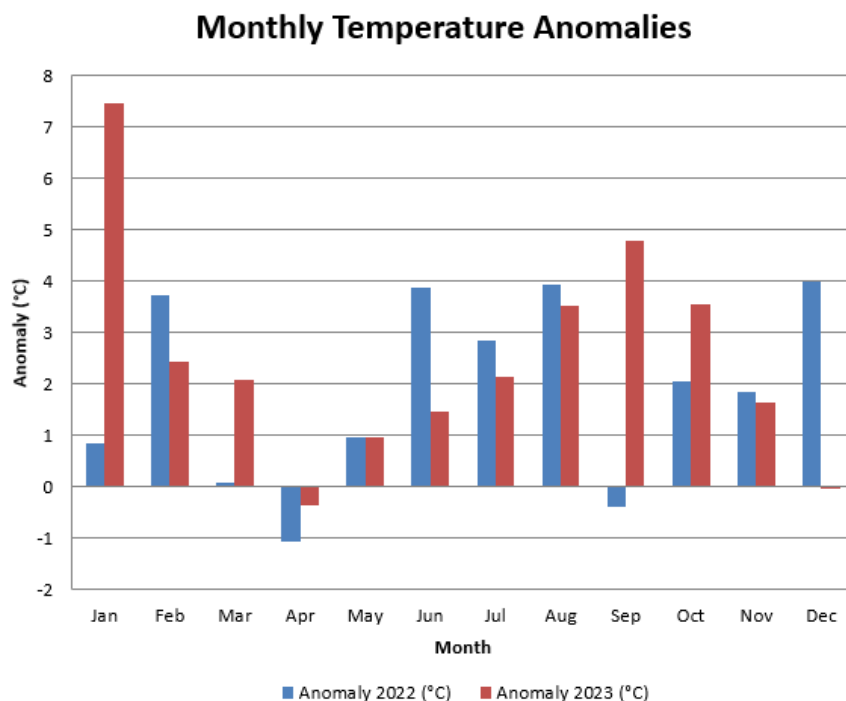
**Figura 5.** Regimul temperaturii și al precipitațiilor în perioada 1985–2023 comparativ cu perioada de referință 1962–1984. Livada, 2023.

În prezent, comunitatea științifică acceptă faptul că clima se schimbă și că o parte din această schimbare trebuie atribuită activităților umane. Schimbările climatice se manifestă prin schimbări de temperatură, precipitații și decalaje în lungimea anotimpurilor (Smith și colab., 2008). Conform analizei prezentată în figura 5 se constată în perioada 2005-2023 o creștere medie a precipitațiilor de peste 4 mm/lună față de perioada de bază (1962-1984), iar temperaturile înregistrează o creștere de 2,14°C în ultimii 20 de ani față de aceeași perioadă.

Emisiile de dioxid de carbon au consecințe importante pentru schimbările climatice (aproximativ 30% conform FAO) deoarece solurile sunt mari rezervoare de carbon.



**Figura 6.** Abaterea temperaturilor medii lunare față de media multianuală (perioada de referință 1962–2021), Livada.



**Figura 7.** Abaterea temperaturilor medii lunare față de media multianuală (perioada de referință 1962–2021), Livada.

Anul 2022 s-a caracterizat printr-o distribuție inegală a precipitațiilor (figura 7), cu alternații bruște, luna martie fiind caracterizată foarte secetoasă, urmată de aprilie – umed. Pe parcursul perioadei de vegetație a porumbului, din luna mai, s-a instalat o secetă cruntă, atât atmosferică

cât și pedologică. Luna septembrie s-a caracterizat prin precipitații excedentare, cu o sumă a precipitațiilor de 180 mm. În anul 2023 lipsa precipitațiilor a fost din nou simțită, luna mai, care este deosebit de importantă pentru perioada de semănat a porumbului, a fost caracterizată printr-un deficit al precipitațiilor destul de serios. Grație cantităților căzute în lunile iunie și iulie porumbul s-a dezvoltat fără pierderi serioase de plante.

## Materiale și metode

Măsurătorile respirației solului au fost efectuate in situ, utilizând un analizator de gaze cu infraroșu ADC BioScientific Ltd – LCI (Marea Britanie), echipat cu o cameră închisă special concepută pentru determinarea fluxului de CO<sub>2</sub> al solului. Determinările au fost realizate în perioada de vegetație a porumbului, pe parcursul anilor agricoli 2022 și 2023. Determinarea pH-ului solului s-a efectuat prin metoda electrometrică, în suspensie sol-apă în raport de 1:2,5, utilizând patru repetiții de câmp și trei repetiții de laborator, pentru asigurarea preciziei și reproductibilității rezultatelor.

Pentru stabilirea influenței fiecărui element nutritiv asupra obținerii producției s-a aplicat metoda diferenței cumulate (SVÁB), care permite cuantificarea contribuției factorilor de fertilizare la realizarea producției medii. Analizele statistice au fost realizate utilizând programele RStudio și Polifact, pentru calculul valorilor medii, testelor de semnificație și compararea variantelor prin testul LSD (Least Significant Difference) sau testul Tukey.

Analizele funcționale ale solului au fost realizate în 2023 utilizând sistemul Biolog EcoPlates™ pentru evaluarea profilului funcțional microbial. Plăcile au fost incubate timp de 96 de ore, iar citirea absorbției s-a efectuat la lungimea de undă de 590 nm, folosind un spectrofotometru.

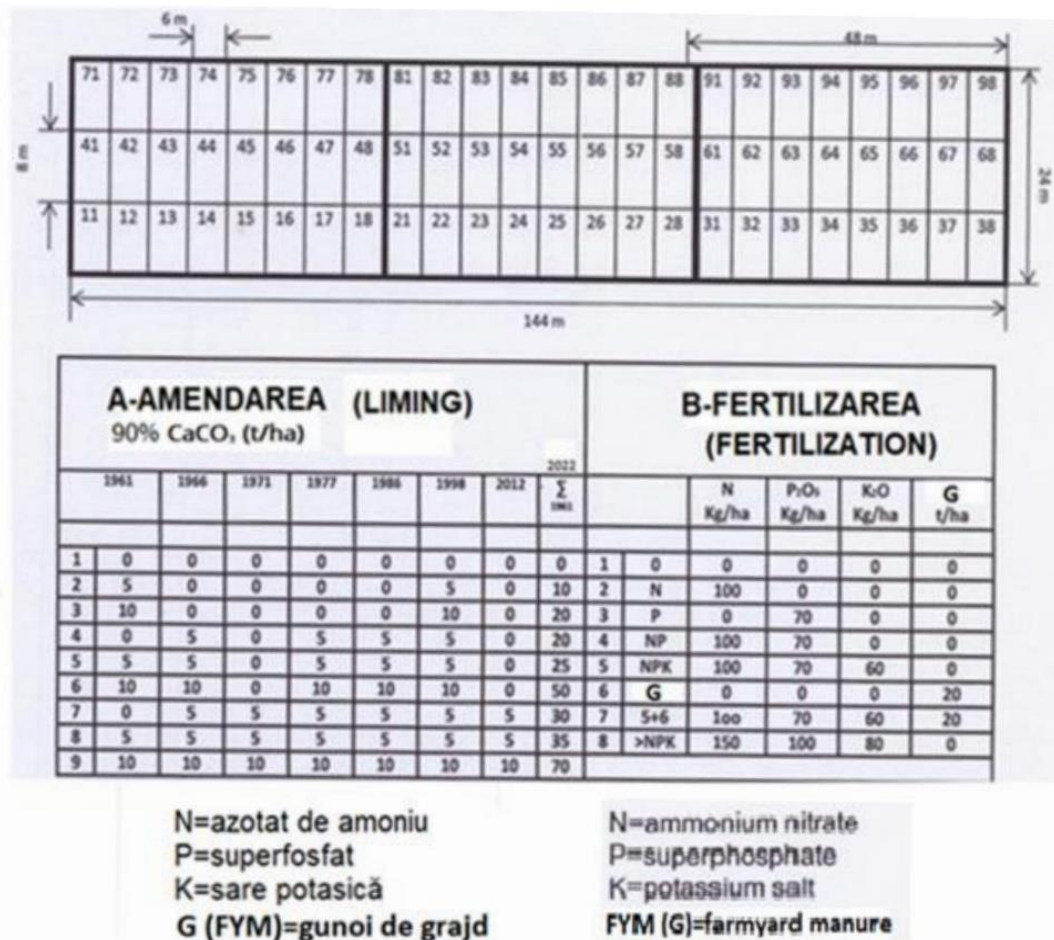
Analizele privind rezistența antimicrobiană a microorganismelor izolate din probele de sol au fost realizate în cadrul University of Coventry (Regatul Unit), utilizând proceduri standardizate pentru testarea sensibilității la antibiotice. Izolarea tulpinilor bacteriene s-a efectuat pe medii selective, urmată de identificarea morfologică și biochimică preliminară. Rezistența antimicrobiană a fost evaluată prin metoda difuzimetrică pe disc (Kirby–Bauer), conform recomandărilor EUCAST/CLSI, utilizând un set reprezentativ de antibiotice cu spectru larg ( $\beta$ -lactamine, aminoglicozide, tetraciline etc.). Zonele de inhibiție au fost măsurate și interpretate în funcție de standardele internaționale de referință.



**Figura 8.** Aparatul utilizat pentru măsurarea respirației solului (ADC BioScientific Ltd – LCI, Marea Britanie) în cadrul experimentului de lungă durată Livada



**Figura 9.** Plăci Biolog EcoPlates™ utilizate pentru determinarea profilului funcțional microbial al solului, incubate timp de 96 h și citite la 590 nm



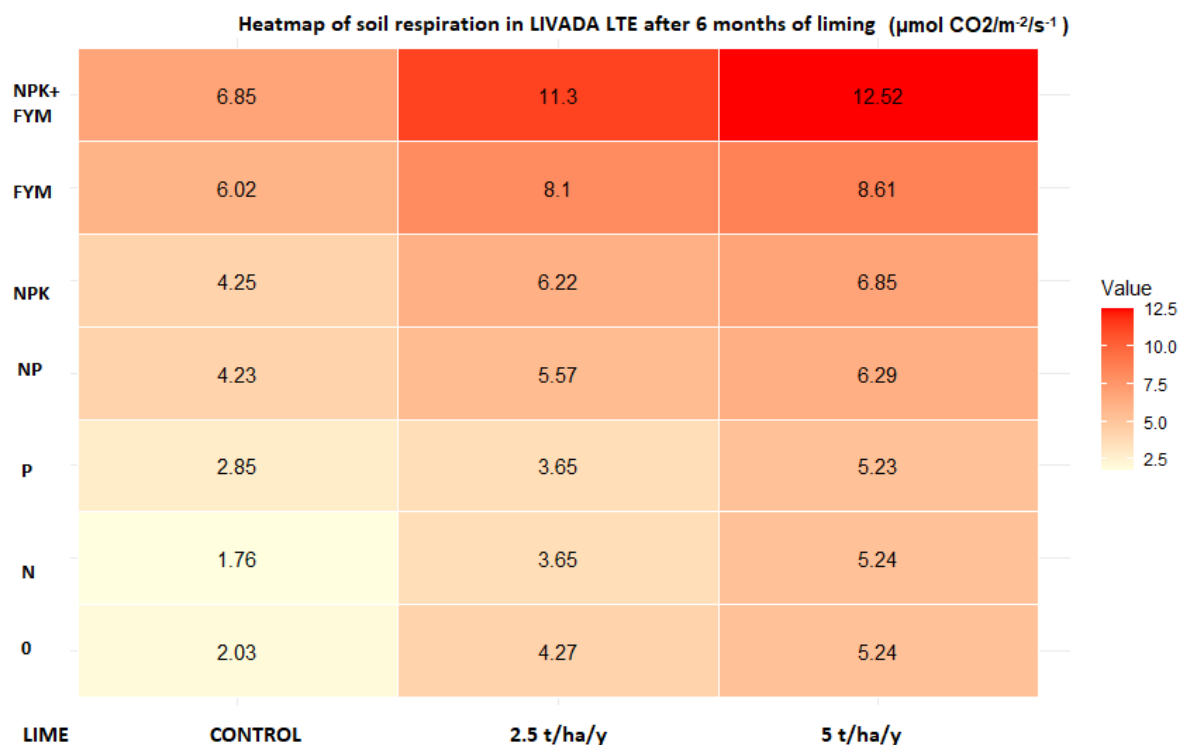
**Figura 9A** Schema experienței cu amendarea și fertilizarea

Datele utilizate în această lucrare au fost prelevate din două experimente de lungă durată, înființate în anii 1962, respectiv 1967, derulate pe soluri acide din zona de nord-vest a României. Primul experiment, înființat în 1962, este de tip bifactorial cu parcele subdivizate cu 5P × 5N, unde factorii analizați sunt: fosforul (P), aplicat în cinci doze: P0, P40, P80, P120, P160 (kg/ha P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); azotul (N), în cinci niveluri (N1-N5), dozele variind în funcție de cultura aflată în rotație. Al doilea experiment, înființat în 1967, este tot de tip bifactorial parcele subdivizate (9A × 8B). Factorii experimentali sunt: Factorul A – amendarea, definită prin combinația dintre doză (0 t/ha; 2,5 t/ha; 5 t/ha) și periodicitate; Factorul B – fertilizarea de tip „Mangerversuch”, reprezentând diverse combinații între tipul și doza de fertilizantă organici și minerali, conform structurii prezentate în Figura 9A.

## Rezultate

Respirația solului a fost măsurată în perioada secetoasă, în vara anului 2022, mai precis în august, atunci când seceta a atins peak-ul maxim. Cultura la care a fost măsurat fluxul CO<sub>2</sub> a fost porumbul. Amendamentele au fost aplicate după recoltarea culturii anterioare, rapița, iar apoi încorporate.

Conform literaturii de specialitate amendarea majorează respirația cu cel puțin 200% în variantele amendate în care pH-ul depășește 6,5 unități (Neale și colab., 1997). Aceleași constatări le regăsim în datele de respirație a solului măsurate la Livada.

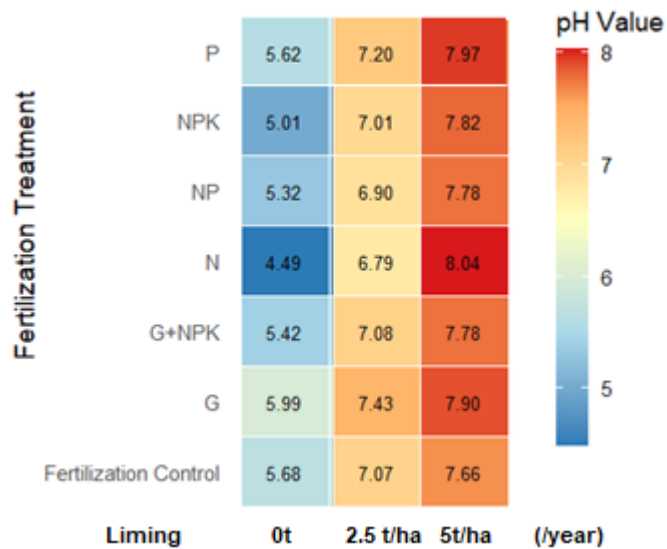


**Figura 10.** Hartă termică a respirației solului ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}^2$ ) în experimentul de lungă durată Livada, la 6 luni după amendarea cu CaO (2022).

Fertilizarea	Amendarea-CaCO <sub>3</sub>			Medie
	0 lime	2,5 t ha an	5 t ha an	
0	2.01	4.27	5.24	3.84
N100	1.76	3.65	5.24	3.55
P70	2.85	3.65	5.23	3.91
N100P70	4.23	5.57	6.29	5.36
N100P70K60	4.25	6.22	6.85	5.77
Gunoi-20t ha an	6.02	8.10	8.61	7.58
N100P70K60+ 20t gunoi	6.85	11.3	12.52	10.22
<b>Medie</b>	<b>4.00</b>	<b>6.11</b>	<b>7.14</b>	

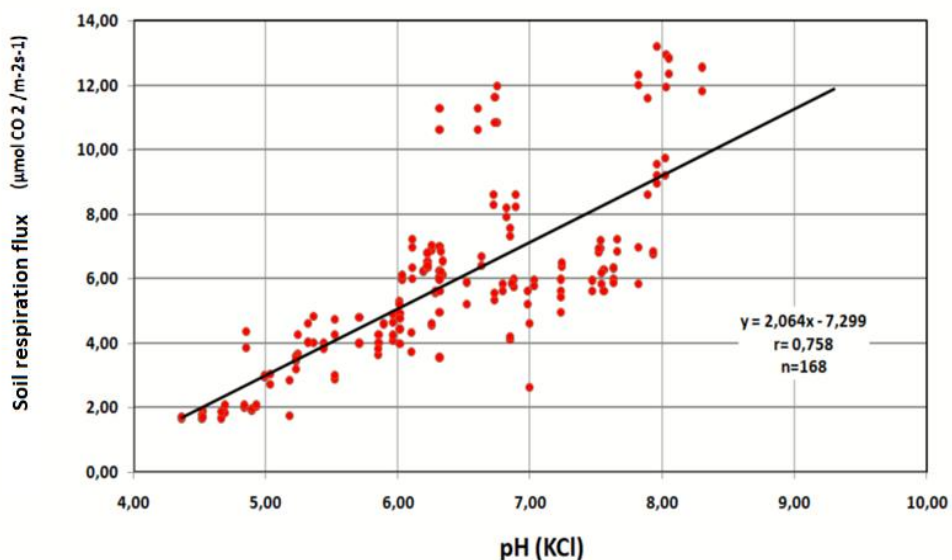
Pe fond nefertilizat amendarea majorează respirația solului de la 2  $\mu\text{moli CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  în varianta martor (figura 10) la 4,27 în tratamentul cu 2,5 t/ha/an, până la 5,24  $\mu\text{moli CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  la tratamentul cu 5 t/ha/an. Fertilizarea cu azot diminuează respirația pe fond neamendat (2,01 vs 1,76), confirmând că azotul aplicat unilateral acidifică solul și înrăutățește condițiile pentru microflora edafică implicată în procesele de mineralizare. Situația se schimbă în varianta amendată cu 2,5 t și fertilizată cu 100 kg N, dublând respirația față de fertilizarea cu 100 kg N. Fertilizarea cu 70 kg fosfor, deși în literatura de specialitate având un efect mai nesemnificativ asupra respirației, la Livada majorează procesele de mineralizare, sugerând că aceste soluri sunt limitate de elementul P. Interacțiunea N-P crește respirația cu peste 200%, sugerând că adăugarea de fosfor condiționează efectul azotului și implicit al carbonului, stimulând procesele de descompunere. Potasiul nu are un efect pronunțat asupra fluxului  $\text{CO}_2$  decât în variantele

amendate. Se remarcă în special varianta NPK + FYM, la care activitatea este aproape de trei ori mai mare decât în controlul neamendat, ceea ce sugerează un efect sinergic între aportul de materie organică, macroelemente (N, P, K) și corectarea acidității prin  $\text{CaCO}_3$ .



**Figura 11.** Hartă termică a valorii pH în experimentele staționare de la Livada

Amplitudinea valorii pH (figura 11) în experiențele staționare de la Livada, după mai bine de 6 decenii de experimentare, este de la 4,5 până la 8, ceea ce evidențiază un spectru foarte larg al reacției solului, determinat de diferitele tratamente aplicate. Valorile scăzute ale pH-ului, de până la 4,5, se regăsesc în variantele cu fertilizare minerală exclusivă, în special cu azot, unde procesele de nitrificare și spălarea bazelor schimbabile au condus la o acidificare progresivă a solului.



**Figura 12.** Corelația dintre pH-ul solului (KCl) și respirația solului în anul 2022.

Această corelație puternic semnificativă ( $r > 0,7$ ) indică faptul că activitatea biologică a solului crește odată cu creșterea pH-ului, sugerând o influență majoră a reacției solului asupra proceselor microbiene (figura 12). Valorile scăzute ale pH-ului ( $< 5,5$ ) corespund unor fluxuri de

CO<sub>2</sub> reduse, în timp ce solurile neutre sau ușor alcaline prezintă o respirație mult mai intensă, valorile explodând după o ploaie ușoară (dupa o perioadă de secetă pronunțată).

**Tabelul 1.** Respirația solului în variantele neamendate și nefertilizate în anul 2023, la cultura de porumb.

Liming	no lime
Fertilization	no fertilization
	0
Data of measurement	
15 mai	0.73
10 iun	0.93
3 iul	2.05
10-Aug	2.92
30-Aug	2.06
20-Sep	2.26
Mean	1.83

Valorile fluxului de respirație a solului în varianta fără fertilizare și fără amendament au valori cuprinse între 0,73 și 2,92  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ , cu o medie sezonieră de 1,83  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  (tabelul 1). Aceste valori sunt semnificativ mai scăzute comparativ cu variantele fertilizate sau amendate, reflectând nivelul natural de activitate biologică a solului în absența oricărui aport extern de nutrienți sau corecții chimice.

#### ***Efectul amendării cu var (CaCO<sub>3</sub>)***

În varianta neamendată, valorile medii ale respirației solului variază între 1,64  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  (martor nefertilizat) și 4,61  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  (NPK + Mg) (tabelul 2), cu o medie generală de 3,32  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ . După amendarea cu carbonat de calciu (CaCO<sub>3</sub>) valorile cresc constant, de la 2,84  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  (martor) până la 5,79  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  (NPK + G), rezultând o medie generală de 4,72  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ . Aceasta reprezintă o creștere medie de circa 42% a fluxului de CO<sub>2</sub>, confirmând efectul stimulativ al amendamentului calcaros asupra activității biologice și mineralizării carbonului organic.

#### ***Efectul fertilizării***

Indiferent de amendare se observă o creștere progresivă a respirației în funcție de complexitatea tratamentului: valorile cele mai reduse apar în variantele martor (0) și N, urmate de variantele cu aport combinat de nutrienți NP, NPK, iar valorile maxime apar în tratamentele care includ materie organică (G – gunoi de grajd). Aceasta confirmă rolul stimulativ al carbonului organic ușor degradabil din îngrășămintele organice, care amplifică metabolismul microbial și fluxurile de CO<sub>2</sub>. În același timp combinațiile NPK cu amendament organic au potențat activitatea biologică datorită sinergiei dintre aportul de nutrienți minerali și îmbunătățirea condițiilor fizico-chimice (figura 13).

Rezultatele confirmă observațiile din literatura de specialitate (ex. Rousk și colab., 2010; Fuentes și colab., 2006), potrivit cărora fluxul de CO<sub>2</sub> și activitatea enzimatică cresc semnificativ între pH 5,5 și 7,0, interval considerat optim pentru metabolismul microbial. În cazul solurilor de la Livada această relație evidențiază efectul pozitiv cumulativ al amendării cu CaCO<sub>3</sub> asupra respirației solului, reflectând o stabilizare a mediului microbial după decenii de experimentare.

**Tabelul 2.** Fluctuațiile respirației solului pe parcursul mai multor luni din perioada de vegetație a porumbului, în funcție de amendare și fertilizare (anul 2023)

Liming	2,5 t/ha/an								
Fertilization	0	N	P	NP	NPK	G	NPK+G	NPK+Mg	Mean
Data of measurement									
15 mai	0.95	1.36	0.9	1.38	1.52	1.91	2.33	2.35	1.59
10 iun	1.09	2.41	2.09	2.31	2.98	2.33	2.93	3.31	2.43
3 iul	2.81	3.55	3.52	2.22	5.7	4.09	4.52	4.93	3.92
10-Aug	1.33	2.07	2.66	3.96	3.65	5.57	6.02	5.55	3.85
30-Aug	2.61	1.06	3.26	5.14	4.62	3.04	6.05	6.55	4.04
20-Sep	1.06	3.54	2.69	5.81	4.76	4.33	5.36	4.98	4.07
Mean	1.64	2.33	2.52	3.47	3.87	3.55	4.54	4.61	3.32
Liming	5 t/ha/an								
Fertilization	0	N	P	NP	NPK	G	NPK+G	NPK+Mg	Mean
Data of measurement									
15 mai	1.72	5.91	2.82	2.97	2.72	3.91	2.91	3.23	3.27
10 iun	2.86	4.63	4.22	5.08	4.12	4.32	6.55	4.57	4.54
3 iul	2.91	5.01	3.66	5.54	5.01	5.51	6.93	4.42	4.87
10-Aug	3.22	3.54	2.13	5.12	4.98	5.33	7.23	5.19	4.59
30-Aug	3.37	3.33	4.41	2.94	5.63	5.82	5.67	6.15	4.67
20-Sep	2.94	3.98	3.93	4.23	4.43	5	5.44	4.73	4.34
Mean	2.84	4.40	3.53	4.31	4.48	4.98	5.79	4.72	

DL 5% A = 0,28

DL 5% B = 0,37

DL 5% A la B = 0,57

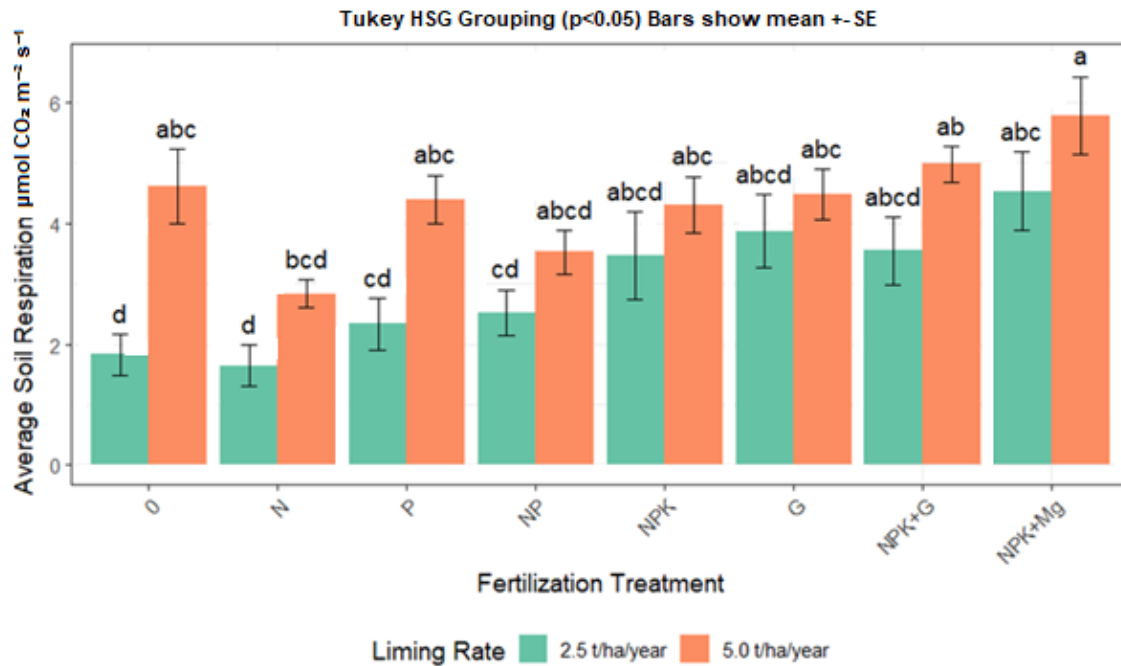
**Simbol Varianta % față de martor Diferența Semnificația**

**Factor A**

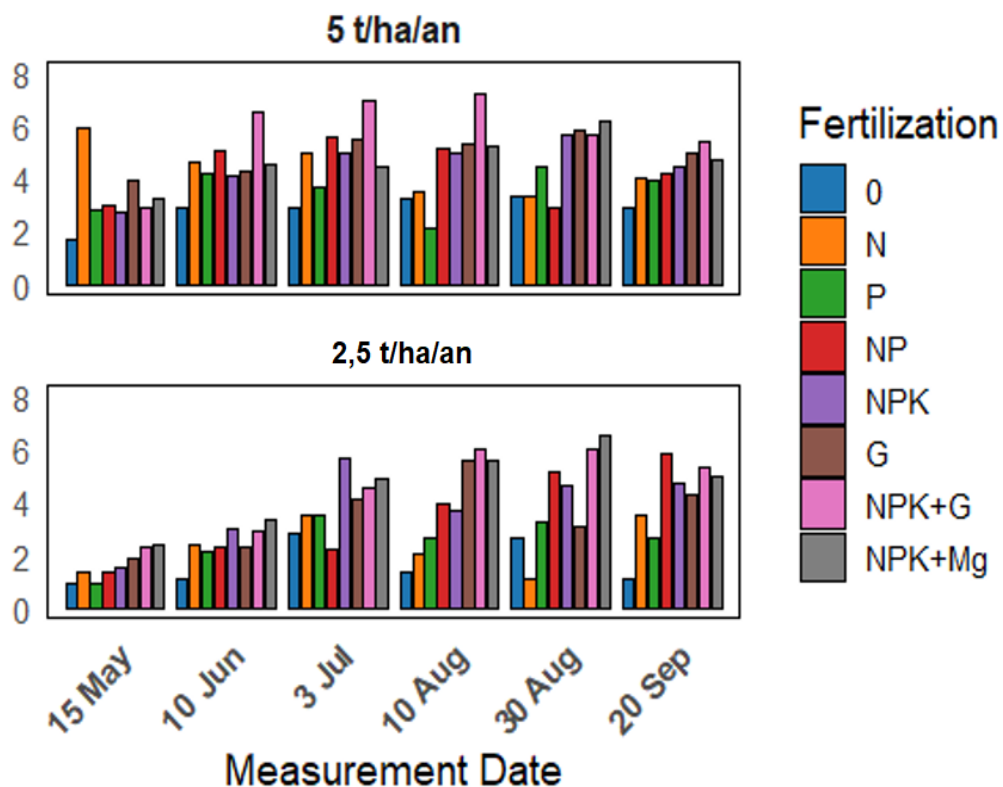
A1	3,32	100,0	0,00	Mt.
A2	4,38	132,1	1,06	*

**Factor B**

B1	2,24	100,0	0,00	Mt.
B2	3,37	150,3	1,13	**
B3	3,02	135,1	0,79	*
B4	3,89	173,8	1,65	***
B5	4,18	186,5	1,94	***
B6	4,26	190,4	2,02	***
B7	5,16	230,5	2,92	***
B8	4,66	208,3	2,42	***



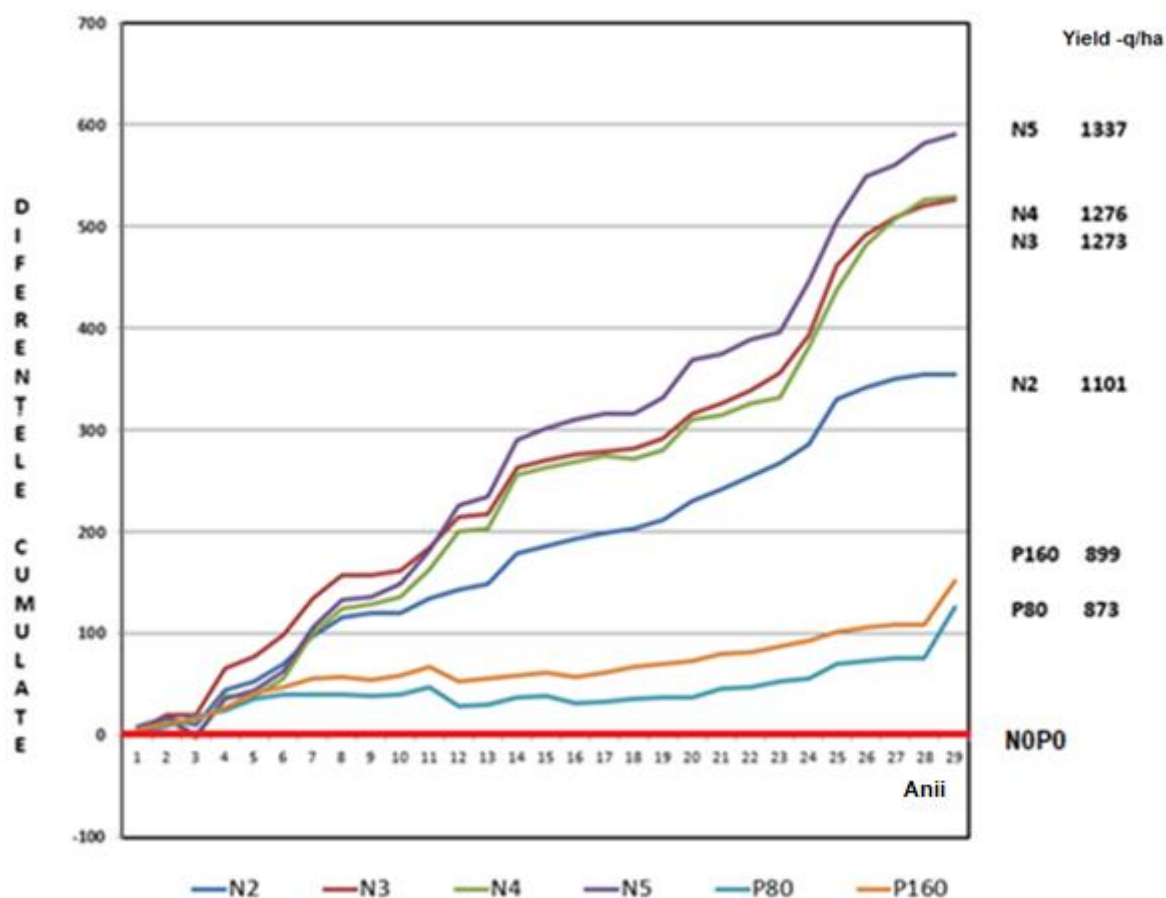
**Figura 13.** Media respirației solului pe parcursul anului 2023



**Figura 14.** Fluctuațiile respirației solului pe parcursul mai multor luni, în funcție de amendare și fertilizare (anul 2023)

Respirația solului măsurată între 15 mai și 20 septembrie 2023 a prezentat valori relativ scăzute comparativ cu anul 2022, deși măsurătorile au fost efectuate într-un an fără secetă severă. Acest lucru poate fi explicat prin faptul că nu au fost realizate determinări imediat după o perioadă

prelungită de secetă urmată de precipitații, astfel încât așa-numitul „efect Birch” nu a fost surprins. În plus, trecuse mai mult de un an și jumătate de la ultima amendare cu oxid de calciu (CaO), ceea ce probabil a redus efectul său stimulativ pe termen scurt asupra activității microbiene și a fluxului de CO<sub>2</sub>.



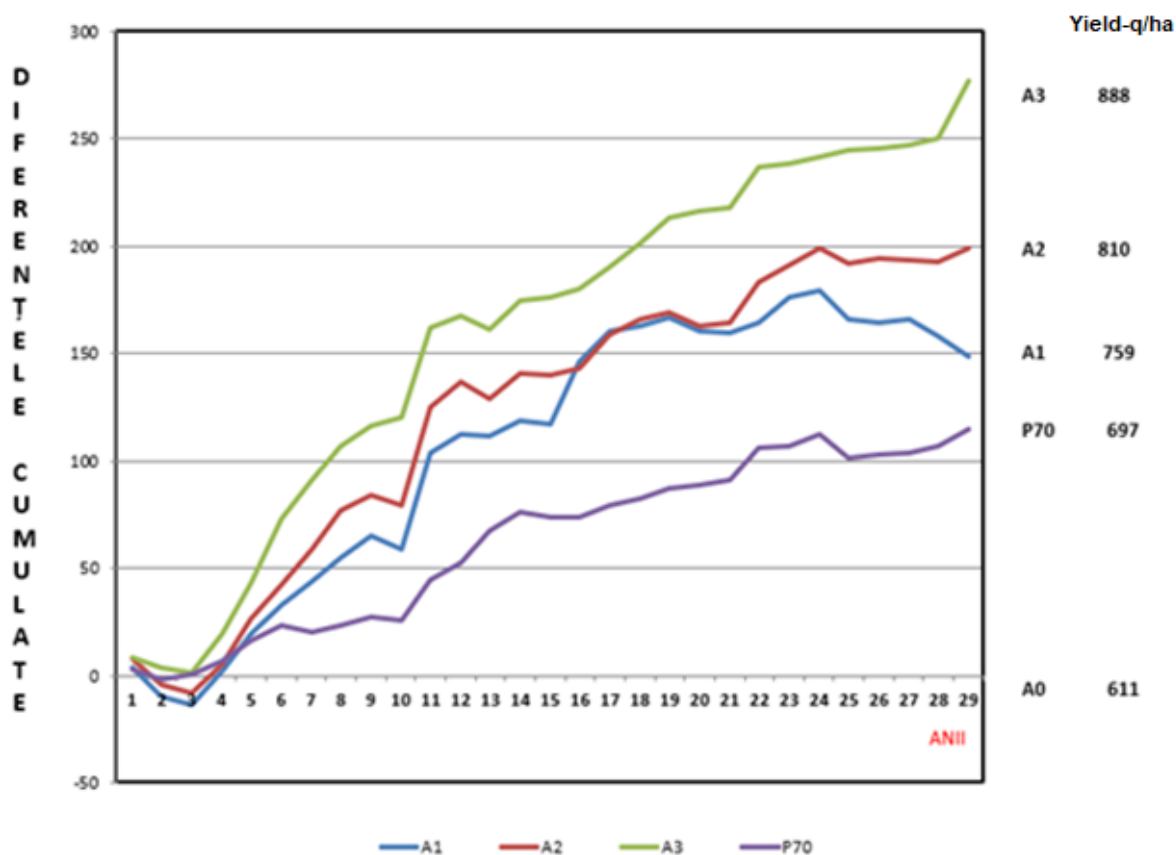
**Figura 15.** Efectul cumulativ al dozilor crescătoare de azot și fosfor asupra producției (q/ha) (1995-2023) Ratele de fertilizare N<sub>1</sub>-N<sub>5</sub> depind de tipul culturii. Pentru porumb, în anii 2022 și 2023, tratamentele au fost următoarele: N<sub>1</sub> = 0 kg N/ha, N<sub>2</sub> = 50 kg N/ha, N<sub>3</sub> = 100 kg N/ha, N<sub>4</sub> = 150 kg N/ha, N<sub>5</sub> = 200 kg N/ha.

Relația dintre producție și profilul funcțional microbial nu este liniară, ci urmează o curbă de tip saturare biologică. Deși producțiile cresc puternic odată cu nivelul de fertilizare (până la +79% la N<sub>5</sub>) activitatea metabolică microbială (valorile funcționale) atinge un maxim la doze moderate (N<sub>3</sub>-N<sub>4</sub>, +12-21%) și apoi scade ușor la doze foarte mari (N<sub>5</sub>, +0,5%). Aceasta arată că dozele moderate de azot (N<sub>3</sub>-N<sub>4</sub>) stimulează simultan procesele microbiene și producția, optimizând ciclurile C – N. La doze excesive (N<sub>5</sub>) are loc inhibarea activității microbiene, probabil prin acidifierea solului și dezechilibrul raportului C:N; fertilizarea cu fosfor (P<sub>80</sub>-P<sub>160</sub>) menține valori ale activității microorganismelor moderate (+4-13%), sugerând un rol de echilibru microbiologic, fără efecte toxice sau supresive.

După aproape trei decenii de fertilizare, microbiota solului pare adaptată metabolic la aportul constant de azot și fosfor. Totuși, fertilizarea excesivă reduce diversitatea funcțională și capacitatea microbilor de a utiliza eficient substraturile carbonice, un semn al stresului trofic și ecologic al solurilor intens fertilizate.

Profilul funcțional microbial în varianta amendată (A1-A3) și combinată cu fosfor (P70) arată o creștere treptată a activității biologice, culminând cu o creștere de +17,5% la P70 față de martor (A0). Aceasta demonstrează că: corectarea acidității solului și adăugarea de calciu creează

condiții favorabile pentru enzimele și bacteriile neutrofile; combinația dintre amendamente și fosfor (P70) maximizează biodisponibilitatea nutrienților și mineralizarea carbonului; valorile ușor reduse la A2 (-6,4%) pot fi legate de o perioadă de stabilizare post-amendare, când activitatea microbiană se restructurează. Interpretare mecanistică: efectul pozitiv al amendării calcaroase este indirect, dar durabil, prin îmbunătățirea pH-ului, a structurii solului și a echilibrului redox. În 2023, la peste un an de la aplicarea CaO, se observă menținerea unui nivel ridicat al funcționalității microbiene, ceea ce confirmă reziliența ecologică a solurilor amendate.



**Figura 16.** Efectul cumulativ al amendării de lungă durată (1984–2023) și al fertilizării cu fosfor asupra producției (q/ha).

Regimul de amendare pe termen lung a inclus patru tratamente cu doze cumulative crescătoare. Tratamentul A1 nu a primit amendament cu var (0 t/ha/an).

Tratamentul A2 a primit, în medie, 0,33 t/ha/an.

Tratamentul A3 a primit, în medie, 0,79 t/ha/an<sup>-1</sup>.

Tratamentul A4 a primit, în medie, 1,00 t/ha/an<sup>-1</sup>.

Tratamentul P70 a primit doza de 70 kg P/ha/an<sup>-1</sup>.

Rezultatele prezentate în figura 17 indică faptul că bacteriile izolate de *Pseudomonas aeruginosa* obținute din solurile tratate cu doze mari de gunoi de grajd (B3 – 60 t/ha la fiecare cinci ani) au prezentat o rezistență antimicrobiană mai ridicată comparativ cu cele provenite din tratamentul moderat (B5 – 20 t/ha la fiecare cinci ani). Această tendință este reflectată prin valorile mai mari ale MIC și MBC pentru toate antibioticele testate – meropenem (MER), imipenem (IMI), ciprofloxacina (CIP) și ceftazidim (CEF) – în experiența B3. Nivelurile ridicate de nutrienți și de compuși antimicrobieni reziduali din solurile supuse unei fertilizări intense cu gunoi de grajd pot favoriza persistența și transferul orizontal al genelor de rezistență, în special a celor care conferă toleranță la  $\beta$ -lactamine (MER, IMI, CEF) și fluorochinolone (CIP).

**Tabelul 3.** Diferențele procentuale ale profilului funcțional al microorganismelor din sol (utilizarea surselor de carbon determinate cu Biolog EcoPlates™), raportate la valoarea de referință

Functional profile of microorganisms				
Var	Value	% relative to the first value	Dif.-%	ph value
N1	275 108.56	100.00%	—	5,89
N2	323 382.86	117.57%	+17.57%	5,52
N3	309 064.31	112.35%	+12.35%	5,00
N4	331 769.67	120.60%	+20.60%	4,54
N5	276 503.33	100.51%	+0.51%	4,37
P80	311 616.83	113.27%	+13.27%	6,07
P160	287 294.00	104.43%	+4.43%	5,84

**Tabelul 4.** Diferențele procentuale ale producției (q/ha) pentru aceleași variante, raportate la valoarea de referință

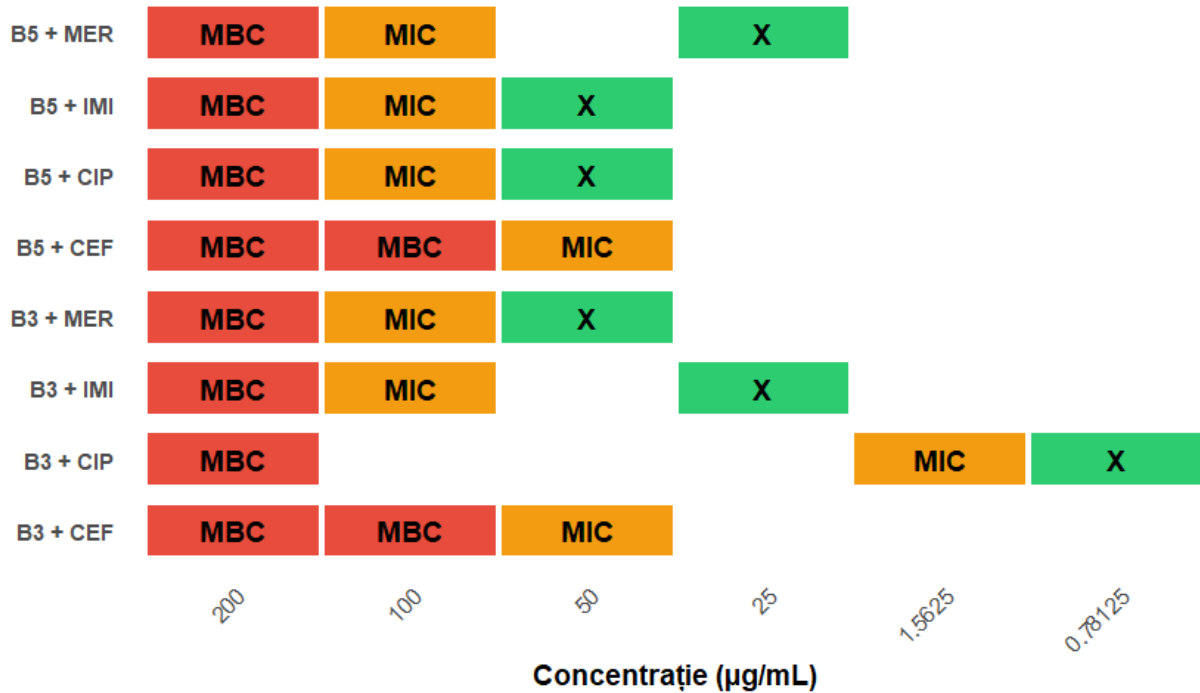
Cummulative yield differences(1995-2023)		
Var	Yield	Dif.-%
N1	747.04	100%
N2	1101.70	147.4%
N3	1272.99	170.4%
N4	1276.50	170.8%
N5	1337.03	178.9%
P80	873.86	117.0%
P160	899.24	120.4%

**Tabelul 5.** Diferențele procentuale ale profilului funcțional al microorganismelor din sol (utilizarea surselor de carbon determinate cu Biolog EcoPlates™) raportate la valoarea de referință

Functional profile of microorganisms				
Var	Value	% relative to the first value	Dif.-%	ph value
A0	298 437.97	100.00%	—	5,68
A1	298 226.20	99.93%	-0.07%	5,94
A2	279 466.20	93.64%	-6.36%	7,07
A3	318 732.80	106.81%	+6.81%	7,80
P70	344 306.25	117.50%	+17.50%	5,62

**Tabelul 6.** Diferențele procentuale ale producției (q/ha) pentru aceleași variante, raportate la valoarea de referință

Cummulative yield differences(1995-2023)		
Var	Yield	Dif.-%
A0	611.07	100%
A1	759.86	124.4%
A2	810.00	132.6%
A3	888.41	145.4%
P70	696.69	114.0%



**Figura 17.** MIC and MBC values for *Pseudomonas aeruginosa* (Flavia Varga, 2023)

MIC – Minimum Inhibitory Concentration – Concentrația minimă inhibitorie – este cea mai mică concentrație de antibiotic care oprește creșterea vizibilă a unei bacterii.

MBC – Minimum Bactericidal Concentration – Concentrația minimă bactericidă – este cea mai mică concentrație de antibiotic care ucide efectiv bacteriile, nu doar le oprește creșterea.



**Figura 18.** Comparație : simbolul experiențelor de lungă durată Livada (stanga) si Rothamsted (dreapta)

## Concluzii

Valorile respirației solului măsurate în 2022 au evidențiat diferențe semnificative între tratamente, confirmând sensibilitatea acestui indicator la modificările induse de fertilizarea și amendarea îndelungată. Variantele martor neamendate au prezentat cele mai scăzute fluxuri de CO<sub>2</sub>, caracteristice unui sol cu activitate microbiană redusă și cu disponibilitate limitată a substraturilor organice. În contrast, tratamentele fertilizate și amendate, în special cele care au inclus materie organică (5t/ha/an, NPK+G), au înregistrat valori superioare ale respirației, semnificând o intensificare a proceselor de mineralizare și o stimulare a metabolismului microbian. În anul 2022, măsurătorile respirației solului au fost efectuate la scurt timp după aplicarea amendamentului cu CaO, într-un context de secetă severă urmată de ploi abundente, condiții care au generat valori ridicate ale fluxului de CO<sub>2</sub> datorită efectului Birch – eliberarea bruscă a carbonului respirabil din materia organică reactivată după uscăciune. În schimb, în 2023, respirația a fost măsurată la peste un an de la amendare, iar regimul pluviometric constant a menținut valori mai moderate, dar stabile, reflectând o activitate microbiană echilibrată și un sol adaptat la condiții umede, cu procese biologice susținute dar fără explozii post-secetă.

Majorarea valorilor pH de la 5,7 la circa 7,8 a fost asociată cu o stimulare semnificativă a potențialului de descompunere a surselor de carbon (până la +45%), ceea ce confirmă sensibilitatea comunităților microbiene la reacția chimică a solului.

În ansamblu tratamentele cu azot (N<sub>1</sub>-N<sub>5</sub>) au determinat o acidificare progresivă a solului (de la pH 5,9 la 4,4), care, deși a susținut creșterea producției prin aportul nutritiv, a indus o diminuare profundă a diversității și eficienței metabolice a microorganismelor. Deși producțiile cresc puternic odată cu nivelul de fertilizare (până la +79% la N<sub>5</sub>), activitatea metabolică microbiană (valorile funcționale) atinge un maxim la doze moderate (N<sub>3</sub>-N<sub>4</sub>, +12-21%) și apoi scade ușor la doze foarte mari (N<sub>5</sub>, +0,5%)

## Bibliografie

Andrés P., Doblas-Miranda E., Rovira P., Bonmatí A., Ribas À., Mattana S., Romanyà J. 2022. *Agricultural potential in carbon sequestration: Humus content of land used for agriculture and CO<sub>2</sub> storage* (Study Requested by the AGRI Committee; IPOL\_STU(2022)699655\_EN). Policy Department for Structural and Cohesion Policies, European Parliament.

Ballabio C., Lugato E., Fernández-Ugalde O., Orgiazzi A., Jones A., Borrelli P., Montanarella L., Panagos P. 2019. *Mapping LUCAS topsoil chemical properties across the European Union using Gaussian process regression*. Geoderma, 355, 113912. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113912>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). *The State of Food and Agriculture 2022*. Rome.

Fuglie K., Morgan S., Jelliffe J. 2024. September 30. *Global Changes in Agricultural Production, Productivity, and Resource Use Over Six Decades*. Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture. Retrieved from <https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2024/september/global-changes-in-agricultural-production-productivity-and-resource-use-over-six-decades>

Hasanuzzaman M., Bhuyan M. H. M. B., Nahar K., Hossain M. S., Al Mahmud J., Hossen M. S., Chowdhury Masud A. A., Moumita, Fujita M. 2018. *Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses*. Agronomy, 8(3), 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>

Khan F., et al. 2023. *Phosphorus plays key roles in regulating plants under hostile environmental conditions [Review]*. Plants, 12(5), xxxx. <https://doi.org/10.3390/plants1205xxxx>

Lal R. 2004. *Soil carbon sequestration to mitigate climate change*. Geoderma, 123, 1-22.

Li N., et al. 2023. *Long-term N addition leads to microbial C, but not N, accumulation and does not significantly affect P-acquisition enzyme activity.* Soil Biology & Biochemistry. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(23\)00308-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(23)00308-0)

Neale S. P., Shah Z., Adams W. A. 1997. *Changes in microbial biomass and nitrogen turnover in acidic organic soils following liming.* Soil Biology & Biochemistry, 29(9), 1463-1474.

Rousk J., Bååth E., Brookes P. C., Lauber C. L., Lozupone C., Caporaso J. G., Knight R., Fierer N. 2010. *Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil.* The ISME Journal, 4, 1340-1351. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.58>

Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P., et al. 2008. *Greenhouse gas mitigation in agriculture.* Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 363(1492), 789-813. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>

Yu H., Chen C., Grealish G., Kirk G. J. D., Dalal R. C. 2023. *Ameliorating soil acidity with calcium carbonate and calcium hydroxide: effects on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics.* Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 23, 1-16.

Zhang L., Zhao Z., Jiang B., Baoyin B., Cui Z., Wang H., Li Q., Cui J. 2024. *Effects of long-term application of nitrogen fertilizer on soil acidification and biological properties in China: A meta-analysis.* Microorganisms. 12(8), 1683. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081683>