

The effect of bio- and mineral fertilizers on corn grain yield

L. Yeremko  | A. Kyrlytsia

Article info

Correspondence Author

L. Yeremko

E-mail:

yeremkol@ukr.netPoltava State Agrarian
University,
Skovoroda Str., 1/3,
Poltava, 36000, Ukraine

Citation: Yeremko, L., & Kyrlytsia, A. (2025). The effect of bio- and mineral fertilizers on corn grain yield. *Scientific Progress & Innovations*, 28 (3), 19–24. doi: 10.31210/spi2025.28.03.03

An effective way to stabilize corn production, an important crop with universal use, is to optimize plant nutrition through a combination of biological and mineral fertilizers. A field experiment to study the effect of different levels of mineral fertilization and pre-sowing seed treatment with Bio-Mineralis biofertilizer (3.0 L t^{-1}) on the yield of the mid-season corn hybrid DN Demeter (FAO 300) was conducted in 2022–2024 at the experimental field of the Poltava State Agricultural Experimental Station named after M.I. Vavilov of the Institute of Pig Breeding and Agro-Industrial Production of the National Academy of Agrarian Sciences. The aim of the study was to determine the effect of different levels of mineral fertilizer and the use of biofertilizer on corn yield formation. The experiment showed that improving the nutritional status of plants by the use of mineral fertilizers, seed treatment with biofertilizer and their combination had a positive effect on the growth, development, and formation of corn productivity elements. This was confirmed by an increase in leaf surface area compared with the control. The most effective was the variant with the combined use of biofertilizers and mineral fertilizers – in this case, the leaf surface indicators were the highest. As a result of the formation of a more developed leaf surface and increased productivity of photosynthetic activity of plants, an increase in plant weight in a completely dry state was observed. This was most evident in the variant with the use of Bio-Mineralis in combination with $\text{N}_{70}\text{P}_{60}\text{K}_{80}$. Increasing the intensity of organic matter synthesis contributed to their better supply to ears and grains during filling, which resulted in grain yield increase. The highest yield – 8.21 t ha^{-1} – was obtained in the variant with pre-sowing seed treatment with Bio-mineralis biofertilizer and $\text{N}_{70}\text{P}_{60}\text{K}_{80}$ application. The increase in yield due to the use of mineral fertilizers was 11.8–15.2 %, and the seed treatment with biofertilizer contributed to an increase in grain productivity by 1.8 %.

Keywords: corn, biofertilizer, mineral fertilizers, plant growth parameters, photosynthesis, yield.

Вплив біо- та мінеральних добрив на урожайність зерна кукурудзи

Л. С. Єремко | А. О. Кирлиця

Полтавський державний
аграрний університет,
м. Полтава, Україна

Вагомим чинником стабілізації виробництва зернової продукції кукурудзи – як важливої культури універсального призначення – є оптимізація поживного режиму рослин шляхом поєднання біологічних і мінеральних добрив. Польовий експеримент щодо вивчення впливу різних рівнів мінерального удобрення та допосівної обробки насіння біодобривом Біо-мінераліс ($3,0 \text{ л/т}$) на урожайність середньостиглого гібриду кукурудзи ДН Деметра (FAO 300) проводився у 2022–2024 рр. на дослідному полі Полтавської ДСГДС ім. М. І. Вавилова Інституту свинарства і АПВ НААН. Метою дослідження було встановлення впливу різних рівнів мінерального удобрення та застосування біодобрива на формування урожайності кукурудзи. У ході експерименту встановлено, що поліпшення поживного режиму рослин завдяки застосуванню мінеральних добрив, обробці насіння біодобривом та їх поєднанню позитивно впливало на ріст, розвиток та формування елементів продуктивності кукурудзи. Це підтверджується збільшенням площі листової поверхні порівняно з контролем. Найефективнішим виявився варіант із комбінованим використанням біодобрива та мінеральних добрив – тут показники листової поверхні були найвищими. У результаті формування більш розвиненої листової поверхні та підвищення продуктивності фотосинтетичної діяльності рослин спостерігалось зростання маси рослин у абсолютно сухому стані. Найбільше це було помітно у варіанті із застосуванням Біомінералісу в поєднанні з $\text{N}_{70}\text{P}_{60}\text{K}_{80}$. Збільшення інтенсивності синтезу органічних речовин сприяло їх кращому надходженню до качанів і зернівок під час наливу, що в підсумку забезпечило підвищення загальної урожайності зерна. Найвищу урожайність – $8,21 \text{ т/га}$ – отримано у варіанті із допосівною обробкою насіння біопрепаратом Біомінераліс та внесенням мінеральних добрив у дозі $\text{N}_{70}\text{P}_{60}\text{K}_{80}$. Приріст урожайності від застосування мінеральних добрив становив 11,8–15,2 %, а внесення біодобрива сприяло підвищенню зернової продуктивності на 1,8 %.

Ключові слова: кукурудза, біодобриво, мінеральні добрива, параметри росту рослин, фотосинтез, урожайність.

Бібліографічний опис для цитування: Єремко Л. С., Кирлиця А. О. Вплив біо- та мінеральних добрив на урожайність зерна кукурудзи. *Scientific Progress & Innovations*. 2025. № 28 (3). С. 19–24.

Вступ

Стале забезпечення населення високоякісними харчовими продуктами є однією із основних концепцій світового сільського господарства. Її дотримання базується на підвищенні рівня виробництва основних зернових культур, серед яких кукурудза (*Zea mays* L.) займає лідируючі позиції. Ареал її вирощування включає тропічні, субтропічні та помірні регіони світу в більш ніж 166 країнах світу [1], а величина отриманої зернової продукції перевищує один млрд. т на рік [2]. Широке світове використання даної культури пов'язане з високим генетичним потенціалом продуктивності її сортів і гібридів та значною адаптаційною здатністю до впливу ґрунтових і кліматичних умов різних зон вирощування [3].

Кукурудза характеризується досить широким спектром використання. Її зерно та листово-стеблова маса слугує сировиною за виробництва продуктів харчування, високоякісних кормових ресурсів для годівлі тварин і птиці, а також у виготовленні різних промислових продуктів і ліків [4]. Річне глобальне споживання продуктів харчування виготовлених із зерна кукурудзи становить близько 11 % від сумарного споживання зернових [5].

Одним із головних чинників забезпечення росту, розвитку та формування врожаю даної культури є оптимізація умов вирощування її рослин за рахунок покращення поживного режиму та застосування елементів технології, що посилюють ростові процеси рослин, їх стійкість до несприятливих чинників навколишнього середовища [6].

Азот має вирішальне значення у фізіологічних процесах, що відбуваються у рослинах, зокрема у процесах фотосинтезу та синтезу амінокислот, білків і ферментів. Його значну роль доведено у фосфорному живленні рослин, що у свою чергу сприяє формуванню потужної кореневої системи і поглинанням нею більшої кількості поживних речовин та відповідним посиленням росту вегетативної маси. Відмінності у забезпеченні рослин фосфором є досить вираженими і проявляються у різному розвитку органів рослин впродовж вегетаційного періоду культури [7, 8].

Калій має важливе значення у водному балансі рослин та їх посухостійкості за рахунок регулювання фізіологічних та біохімічних процесів, а також формування потужної кореневої системи [9].

Альтернативним агротехнологічним прийомом, що дозволяє підвищити ефективність засвоєння поживних речовин рослинами кукурудзи може бути застосування біологічних добрив. Мікроорганізми, що є їх основою, колонізують кореневу систему рослин та за рахунок використання природно доступної біологічної системи мобілізації поживних речовин, що включає фіксацію азоту [10], розчинення недоступних для рослин фосфатів [11], а також продукування фітогормонів та синтезу сидерофорів сприяють підвищенню продуктивності сільсько-господарських культур [12]. Крім того, внесення ефективних культур мікроорганізмів у ґрунт може стимулювати розкладання органічних відходів і

решток, тим самим вивільняючи неорганічні поживні речовини, які стають доступними для засвоєння кореневою системою рослин [13].

Чисельні дослідження вказують на те, що Ризобактерії PGPR (група PGPR, від англ. Plant GrowthPromoting Rhizobacteria) можуть стимулювати проростання насіння [14], зміцнюють стебло рослин [15], збільшують площу листя та кількість листків [16], а також стимулюють кореневий ріст [17].

Таким чином, раціоналізація стратегії внесення добрив на основі потреб рослин і вмісту поживних речовин у ґрунті має актуальне значення для покращення врожайності культур, а також для довгострокової стійкості виробництва.

Мета дослідження

Метою дослідження було з'ясувати вплив різних рівнів мінерального удобрення та застосування біодобрива на формування продуктивності кукурудзи.

Завдання дослідження: вивчити вплив біо- та мінеральних добрив на динаміку наростання листової поверхні і фотосинтетичну діяльність посівів кукурудзи; дослідити вплив різних рівнів мінерального живлення на динаміку наростання абсолютно сухої маси рослин та урожайність зерна кукурудзи.

Матеріали і методи

Польовий експеримент було закладено на дослідному полі Полтавської державної с.-г. дослідної станції імені М. І. Вавилова Інституту свинарства і АПВ НААН упродовж 2022–2024 рр. Чинниками, що досліджували були: дози мінеральних добрив – контроль (без добрив), $N_{50}P_{40}K_{60}$, $N_{70}P_{60}K_{80}$ (чинник А); допосівна обробка насіння біодобривом Біо-мінераліс (3,0 л/т) (чинник В).

Основою біодобрива є азотфіксуючі (*Azotobacter chroococcum*), фосформобілізуючі (*Bacillus megaterium*), каліймобілізуючі та біофунгіцидні мікроорганізми (*Bacillus subtilis*), біоколоїд-липкоген і комплекс біогенних металів – Cu, Fe, Co, Mo, Mg, Mn, Zn у формі нанокарбоксилатів.

У досліді вирощували середньостиглий гібрид кукурудзи ДН Деметра (ФАО 300). Кількість його рослин на гектарі становила 70 тис. шт. Попередником кукурудзи в досліді була пшениця озима. Облікова площа ділянки становила 40 м². Повторність досліді чотириразова. Кукурудзу в досліді вирощували за рекомендованою для зони технологією, за винятком технологічних прийомів, що вивчали.

Для виконання завдань досліджень, що включали визначення площі листової поверхні посівів, свіжої і сухої маси рослин, впродовж вегетаційного періоду, через кожні 10 днів, починаючи із фази 10–12 листків відбирали проби по п'ять рослин із двох несуміжних повторень [18, 19]. Проби для визначення величини структурних елементів врожаю були відібрані перед

збиранням з центральних рядів ділянки. Визначення урожайності зерна проводили на кожній ділянці у фазі його повної стиглості (ВВСН 89). Урожайність зерна була розрахована за стандартної вологості зерна 14 % [19].

Результати обліку врожаю піддавали дисперсійному аналізу за допомогою комп'ютерної техніки використовуючи методичні рекомендації із проведення польових дослідів [20].

Результати та їх обговорення

Основою формування розвиненої надземної частини рослин та елементів їх продуктивності є процес фотосинтезу, у ході якого енергія сонячної радіації і вуглекислий газ трансформуються в органічну речовину, необхідну для росту і розвитку. Ключовим фотосинтезуючим органом рослинного організму є листкові пластинки. Відсоток поглинання ними енергії фотосинтетично активної радіації сягає 90 %. У ході проведення дослідження темпи розвитку листової поверхні упродовж вегетаційного періоду кукурудзи були нерівномірними. Найменш інтенсивним він був на початку розвитку рослин.

Таблиця 1

Вплив біо- і мінеральних добрив на динаміку наростання листової поверхні посівів кукурудзи, середнє за 2022–2024 рр.

Допосівна обробка насіння	Система удобрення, кг/га д.р.	Площа листової поверхні посіву за фазами росту і розвитку рослин, тис. м ² /га		
		12–13 листків	цвітіння качанів	молочна стиглість зерна
Вода (10 л/т)	контроль (без добрив)	16,3	34,8	31,4
	N ₅₀ P ₄₀ K ₆₀	19,8	36,2	33,5
	N ₇₀ P ₆₀ K ₈₀	21,6	38,9	35,8
	контроль (без добрив)	17,9	35,6	32,7
Біо-мінераліс (3,0 л/т)	N ₅₀ P ₄₀ K ₆₀	20,4	37,9	34,9
	N ₇₀ P ₆₀ K ₈₀	22,6	40,3	36,3

Для об'єктивної оцінки функціонування асиміляційної поверхні рослин, важливо знати не тільки її розміри, а й тривалість перебування в активному стані (табл. 2). Показник, що враховує загальну тривалість фотосинтетичної роботи асиміляційної поверхні – фотосинтетичний потенціал. У досліді його величина значною мірою була обумовлена забезпеченістю рослин елементами мінерального живлення. Робота добре розвиненої

Під час формування листків і до фази цвітіння качанів інтенсивність наростання асиміляційної поверхні рослин була максимальною. Надалі, внаслідок перерозподілу органічних сполук і елементів живлення до генеративних органів, і зерна, швидкість розвитку листової поверхні зменшувалася.

Застосування агротехнологічних приймів вирощування сприяло покращанню умов формування листової поверхні у рослин кукурудзи (табл. 1). Даний позитивний вплив був найбільш вираженим у варіанті поєднання застосування допосівної обробки насіння біодобривом Біо-мінераліс (3,0 л/т) і внесення N₇₀P₆₀K₈₀, де величина листової поверхні у посівах кукурудзи була найбільшою (40,3 тис. м²/га). Слід відзначити, що внесення різних доз мінеральних добрив сприяло збільшенню величини листової поверхні посівів кукурудзи у період її максимального розвитку (у фазі цвітіння) на 4,0–11,8 % щодо контролю. На варіанті, де було проведено передпосівну обробку насіння біодобривом відзначено зростання показника, що досліджували порівняно з контролем на 0,8 тис. м²/га або 2,3 %.

листової поверхні була найбільш тривалою у варіанті поєднання внесення N₇₀P₆₀K₈₀ та застосування біологічного добрива у передпосівній обробці насіння. Внесення мінеральних добрив сприяло збільшенню фотосинтетичного потенціалу посівів кукурудзи на 6,2–20,2 %. У варіанті застосування біодобрива значення даного показника зросло порівняно з контролем на 2,6 %.

Таблиця 2

Вплив біо- і мінеральних добрив на фотосинтетичну діяльність кукурудзи, середнє за 2022–2024 рр.

Допосівна обробка насіння	Система удобрення, кг/га д.р.	Чиста продуктивність фотосинтезу, г/м ² за 1 добу	Фотосинтетичний потенціал посівів, млн м ² /га ² дб
		12 листків – молочна стиглість зерна	
Вода (10 л/т)	контроль (без добрив)	5,63	0,695
	N ₅₀ P ₄₀ K ₆₀	6,23	0,738
	N ₇₀ P ₆₀ K ₈₀	6,89	0,836
	контроль (без добрив)	5,98	0,713
Біо-мінераліс (3,0 л/т)	N ₅₀ P ₄₀ K ₆₀	6,75	0,795
	N ₇₀ P ₆₀ K ₈₀	7,18	0,894

Покращання умов формування та функціонування листової поверхні безпосередньо відобразилося на продукуванні рослинами органічної речовини (табл. 3). Величина чистої продуктивності фотосинтезу підвищувалася у варіантах внесення

мінеральних добрив на 10,7–22,4 % порівняно з контролем. Застосування біодобрива виявилось менш ефективним, оскільки збільшення величини даного показника становило 6,22 %. Натомість поєднання даних агроприймів надало можливість збільшити

інтенсивність продукування органічної речовини рослинами на 19,9–27,5 % порівняно з контролем.

Відповідно до підвищення інтенсивності синтетичних процесів у рослинах, збільшувалася величина їх органічної сухої біомаси. Її накопичення було досить нерівномірним впродовж вегетаційного періоду. Найменш інтенсивним воно було на початкових етапах розвитку рослин. Від періоду формування листків та інтенсивного наростання надземної маси, накопичення рослинами сухої

речовини було досить інтенсивним. У досліді відмічений значний вплив факторів, що вивчали на величину абсолютно сухої маси рослин. Найвищою вона була у варіанті сумісного застосування мінеральних добрив у дозі N₇₀P₆₀K₈₀ та біодобрива, із перевищенням контрольного варіанту на 22,3 %. Збільшення величини даного показника від застосування мінеральних добрив і біодобрива було на рівні 5,90–15,2 і 2,15 % відповідно.

Таблиця 3

Вплив біо- і мінеральних добрив на динаміку наростання абсолютно сухої маси рослин кукурудзи, г, середнє за 2022–2024 рр.

Допосівна обробка насіння	Система удобрення, кг/га д.р.	Фази росту і розвитку рослин		
		12–13 листків	цвітіння качанів	молочна стиглість зерна
Вода (10 л/т)	контроль (без добрив)	48,9	163,7	218,5
	N ₅₀ P ₄₀ K ₆₀	50,4	172,8	231,4
	N ₇₀ P ₆₀ K ₈₀	53,4	186,2	251,9
Біо-мінераліс (3,0 л/т)	контроль (без добрив)	49,3	170,2	223,2
	N ₅₀ P ₄₀ K ₆₀	51,2	175,6	247,8
	N ₇₀ P ₆₀ K ₈₀	54,3	197,3	267,3

У дослідженні відзначено істотний позитивний вплив факторів, що вивчали на величину урожайності зерна кукурудзи. Найвищі значення даного показника (8,21 т/га) були у варіанті комплексного застосування мінеральних і біологічного добрив (табл. 4). Застосування мінеральних добрив сприяло

збільшенню урожайності посівів кукурудзи на 11,8–15,2 % порівняно з контролем. Прибавка урожайності зерна кукурудзи у варіантах із проведенням допосівної обробки насіння біодобривом становила 1,8 %.

Таблиця 4

Вплив біо- і мінеральних добрив на величину урожайності зерна кукурудзи, середнє за 2022–2024 рр.

Допосівна обробка насіння	Система удобрення, кг/га д.р.	Урожайність зерна, т/га			Середнє за 3 роки
		2022	2023	2024	
Вода (10 л/т)	контроль (без добрив)	6,94	8,32	5,98	7,08
	N ₅₀ P ₄₀ K ₆₀	7,56	8,86	7,34	7,92
	N ₇₀ P ₆₀ K ₈₀	7,84	8,95	7,68	8,16
Біо-мінераліс (3,0 л/т)	контроль (без добрив)	7,14	8,39	6,04	7,21
	N ₅₀ P ₄₀ K ₆₀	7,68	8,92	7,42	8,01
	N ₇₀ P ₆₀ K ₈₀	7,92	8,98	7,73	8,21
HPR _{0,95}		чинник А - 0,09 т/га; чинник В - 0,23 т/га; взаємодія чинників АВ - 0,32 т/га.			

Результати проведеного нами дослідження показали збільшення наростання листової поверхні кукурудзи у варіантах внесення мінеральних добрив. Це може бути обумовлено синергічною позитивною дією азоту як головного елементу вегетативного росту, фосфору, як складової частини сполук, що слугують джерелом енергії для метаболічних процесів у рослинах, а також елементу розвитку кореневої системи, калію, наявність якого забезпечує регуляцію осмотичного потенціалу, а також може покращити здатність кореневої системи рослини поглинати поживні речовини, необхідні для росту надземної частини [21]. Це положення також було підтверджено попередніми дослідженнями, проведеними Tanga та ін., [22] та Laskari та ін. [23], у яких вчені відмічали позитивний вплив мінерального удобрення на ростові процеси рослин. Разом з тим, Laskari та ін. [23], відмічали збільшення параметрів площі листової поверхні у варіантах внесення мінеральних добрив, що відповідає отриманим нами

результатам. Згідно з іншими дослідженнями [24, 25], це може бути пов'язаним із безпосереднім позитивним впливом азоту на формування листових пластинок, та подовження періоду перебування їх у активному стані і відповідному збільшенню перехоплення сонячної радіації та продукуванню більшої кількості органічних сполук [26]. Дане твердження узгоджується із нашим дослідженням, де збільшення величини листової поверхні, підвищення продуктивності та тривалості її фотосинтетичної роботи сприяло посиленню накопичення рослинами органічних сполук та інтенсивності нагромадження ними надземної сухої біомаси у варіантах із покращеним забезпеченням рослин поживними речовинами.

Результати нашого дослідження показали, що урожайність зерна кукурудзи досягла максимального значення, у варіантах із підвищенням забезпеченості рослин елементами мінерального живлення (N₇₀P₆₀K₈₀). Це може бути пов'язано

із достатньою забезпеченістю елементами мінерального живлення, необхідними для поглинання рослинами кукурудзи у вегетативний період розвитку, і відповідним інтенсивним їх засвоєнням під час генеративного розвитку та наповнення насіння. Таким чином накопичення метаболічних продуктів під час формування насіння буде збільшуватися, так що насіння матиме максимальний розмір і масу [27]. Таку ж тенденцію спостерігали і інші вчені у попередніх дослідженнях [28, 29].

Результати нашого дослідження показали, що поєднання мінерального удобрення і застосування біодобрива виявилось ефективним засобом підвищення рівня урожайності кукурудзи, що може бути обумовлено стимулюючим ефектом секретованих корисними мікроорганізмами у зону ризосфери кукурудзи фітогормонів та регуляторів росту рослин та безпосереднім покращанням забезпеченості

рослин поживними речовинами [13] за рахунок (фіксація N і солюбілізація P/K) та стимуляції системної стійкості рослин до хвороб [30]. На позитивний вплив поєднання застосування мінеральних і біологічних добрив вказували також у своїх дослідженнях Атогочу із співавторами [31], Mahmud із співавторами [32].

Висновки

Внесення мінеральних добрив, проведення допосівної обробки насіння біодобривом та їх поєднання справили позитивний вплив на ростові процеси кукурудзи. Зокрема, внесення мінеральних добрив сприяло збільшенню площі листової поверхні на 4,02–11,8 % порівняно з контролем. Допосівна обробка насіння забезпечила зростання цих показників на 2,3 % відповідно. Найбільш ефективним у цьому аспекті виявилось комплексне застосування досліджуваних агротехнологічних прийомів: площа листової поверхні посівів у фазі цвітіння качанів перевищувала контрольний варіант на 15,8 %, причому її значення зростали зі збільшенням забезпеченості рослин елементами мінерального живлення.

Відповідно до розширення листової поверхні, подовження тривалості та підвищення продуктивності її фотосинтетичної діяльності зростає кількість синтезованої рослинами органічної речовини. Це сприяє активнішому накопиченню органічної біомаси, що, у свою чергу, безпосередньо визначає рівень зернової продуктивності посівів. У цьому контексті найбільш ефективним виявилось поєднання допосівної обробки насіння біологічним препаратом Біомінераліс із внесенням мінеральних добрив у нормі N₇₀P₆₀K₈₀. За результатами досліджень, саме в цьому варіанті спостерігалася найвища середня урожайність зерна кукурудзи – 8,21 т/га.

Внесення мінеральних добрив забезпечило зростання урожайності посівів кукурудзи на 11,8–15,2 % порівняно з контролем. У варіантах із проведенням допосівної обробки насіння біодобривом прирост урожайності становила 1,8 %.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо їхнього викладу та результатів досліджень.

References

1. Mishchenko, O., Hanhur, V., & Danilenko, Y. (2024). Productivity formation of maize hybrids depending on plant density in the conditions of Left-Bank Forest-Steppe. *Scientific Progress & Innovations*, 27 (2), 16–21. <https://doi.org/10.31210/spi2024.27.02.03>
2. Hanhur, V., & Rudenko, V. (2024). The effects of main tillage methods on the productivity of maize hybrids in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Scientific Progress & Innovations*, 27 (1), 36–40. <https://doi.org/10.31210/spi2024.27.01.06>
3. Hanhur, V., & Rudenko, V. (2023). Biometric parameters of plants and maize (*Zea mays* L.) productivity depending on sowing period. *Scientific Progress & Innovations*, 26 (3), 36–41. <https://doi.org/10.31210/spi2023.26.03.07>
4. Hanhur, V., & Pelykh, M. (2025). The influence of sowing dates and plant density on the yield of corn hybrids in the conditions of the Left Bank Forest-Steppe. *Scientific Progress & Innovations*, 28 (1), 75–80. <https://doi.org/10.31210/spi2025.28.01.13>
5. Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., & Prasanna, B. M. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security*, 14 (5), 1295–1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>
6. Arshad, N. F., Khandaker, A. M., Mohammad, M., Bilal, A., & Basrah, M. M. (2023). Effects of foliar NPK application on growth, yield and nutrient content of sweet corn grown. *Journal of Agricultural Sciences*, 36 (1), 254–270. <https://doi.org/10.37077/25200860.2023.36.1.20>
7. Liang, C., Liu, X., Lv, J., Zhao, F., & Yu, Q. (2024). The impact of different phosphorus fertilizers varieties on yield under wheat–maize rotation conditions. *Agronomy*, 14, 1317. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061317>
8. Kumar, A., & Kumar, M. (2017). Effect of different levels of phosphorus on the yield and yield components of maize under agro-climatic zone- II of Bihar. *International Journal of Agricultural Sciences*, 13 (2), 266–270. <https://doi.org/10.15740/HAS/IJAS/13.2/266-270>
9. Ul-Allah, S., Ijaz, M., Nawaz, A., Sattar, A., Sher, A., Naeem, M., Shahzad, U., Farooq, U., Nawaz, F., & Mahmood, K. (2020). Potassium application improves grain yield and alleviates drought susceptibility in diverse maize hybrids. *Plants*, 9 (1), 75. <https://doi.org/10.3390/plants9010075>
10. Santos, R. M., Diaz, P. A. E., Lobo, L. L. B., & Rigobelo, E. C. (2020). Use of plant growth-promoting rhizobacteria in maize and sugarcane: Characteristics and applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 136. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00136>
11. Mazid, M., & Khan, T. A. (2015). Future of bio-fertilizers in Indian agriculture: An overview. *International Journal of Agricultural Food Research*, 3, 10–23. <https://doi.org/10.24102/ijaf.v3i3.132>
12. Krey, T., Vassilev, N., Baum C., & Eichler-Löbermann, B. (2013). Effects of long-term phosphorus application and plant-growth promoting rhizobacteria on maize phosphorus nutrition under field conditions. *European Journal of Soil Biology*, 55, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.12.007>
13. Yaru, L. Y., Watts, D. B., Kloepper, J. W., & Allen, H. (2018). Torbert influence of plant growth-promoting *Rhizobacteria* on corn growth under different fertility sources. *Communications in soil science and plant analysis*, 49 (10), 1239–1255. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1457155>
14. Noumavo, P. A., Kochoni, E., Didagbé, Y. O., Adjanohoun, A., Allagbé, M., Sikirou, R., Gachomo, E. W., Kotchoni, S. O., & Baba-Moussa, L. (2013). Effect of different plant growth promoting rhizobacteria on maize seed germination and seedling development. *American Journal of Plant Sciences*, 4, 1013–1021. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2013.45125>
15. Jarak, M., Mrkovaki, N., Bjelić, D., Josic, D., Hajnal-Jafari, T., & Stamenov, D. (2012). Effects of plant growth promoting rhizobacteria on maize in greenhouse and field trial. *African Journal of Microbiology Research*, 6(27). <https://doi.org/10.5897/ajmr12.759>

16. Nezarat, S., & Gholami, A. (2009). Screening plant growth promoting rhizobacteria for improving seed germination, seedling growth and yield of maize. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 12 (1), 26–32.
17. Jacoud, C., Job, D., Wadoux, P., & Bally, R. (1999). Initiation of root growth stimulation by Azospirillum lipoferum CRT1 during maize seed germination. *Canadian Journal of Microbiology*, 45 (4), 339–342. <https://doi.org/10.1139/w99-023>
18. Moiseichenko, V. F., & Yeshchenko, V. O. (1994). *Osnovy naukovykh doslidzen v ahronomii*. Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian]
19. Kaushik, P., Pati, P. H., Khan, M. L., & Khare, P. K. (2021). A quick and simple method for estimating leaf area by leaf weight. *International Journal of Botany Studies*, 6, 1286–1288.
20. Ushkarenko, V. O., Vozhehova, R. A., Holoborodko, S. P., & Kokovikhin, S. V. (2013). *Statystychnyi analiz rezul'tativ polovyykh doslidiv u zemlerobstvi: monohrafiia*. Kherson: Ailant [in Ukrainian]
21. Fauziah, L., Anggraeni, L., Latifah, E., Istiqomah, N., & Khamidah, A. (2023). Increased yield and quality of corn by inorganic fertilizers and utilization of corn as food to support food security. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1253 (1), 012129. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1253/1/012129>
22. Tanga, C. M., Beesigamukama, D., Kassie, M., Egonu, P. J., Ghemoh, C. J., Nkoba, K., Subramanian, S., Anyega, A. O., & Ekesi, S. (2022). Performance of black soldier fly frass fertilizer on maize growth yield nutritional quality and economic returns. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(2), 185–196. <https://doi.org/10.3920/JIFF2021.0012>
23. Laskari, M., Menexes, G. C., Kalfas, I., Gatzolis, I., & Dordas, C. (2022). Effects of fertilization on morphological and physiological characteristics and environmental cost of maize (*Zea mays* L.). *Sustainability*, 14, 8866. <https://doi.org/10.3390/su14148866>
24. Berdjour, A., Dugje, I. Y., Rahman, N. A., Odoom, D. A., Kamara, A. Y., & Ajala, S. (2020). Direct estimation of maize leaf area index as influenced by organic and inorganic fertilizer rates in Guinea Savanna. *Journal of Agricultural Science*, 12 (6), 1–10. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n6p66>
25. Szulc, P., Ambrozy-Deręowska, K., Mejza, I., Grześ, S., Zielewicz, W., Stachowiak, B., & Kardasz, P. (2021). Evaluation of nitrogen yield-forming efficiency in the cultivation of maize (*Zea mays* L.) under different nutrient management systems. *Sustainability*, 13, 10917. <https://doi.org/10.3390/su131910917>
26. Szabó, A., Mousavi, S. M. N., Bojtor, C., Ragán, P., Nagy, J., Vad, A., & Illés, Á. (2022). Analysis of nutrient-specific response of maize hybrids in relation to leaf area index (LAI) and remote sensing. *Plants*, 11, 1197. <https://doi.org/10.3390/plants11091197>
27. Sudding, A. F., Maintang, Asri, M., Rauf, A. W., Syam, A., & Adriani, A. W. (2021). The effect of NPK 15-15-6-4 compound fertilizer on corn growth and yield. *IOP Conference Series: Earth Environmental Science*, 911, 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/911/1/012047>
28. Macisood, M., Ali, R., Nawaz, N., & Yousaf, N. (2000). The Effect of NPK application in different proportions on the growth and yield of spring maize. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 3 (2), 356–357.
29. Ojienyi, K., Ngonidzashe, C., Devkota, K., & Madukwe, D. (2024). Optimizing split-fertilizer applications for enhanced maize yield and nutrient use efficiency in Nigeria's Middle-belt. *Heliyon*, 10 (19), e37747. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37747>
30. Chen, L., Hao, Z., Li, K., Sha, Y., Wang, E., Sui, X., Mi, G., Tian, C., & Chen, W. (2020). Effects of growth-promoting rhizobacteria on maize growth and rhizosphere microbial community under conservation tillage in Northeast China. *Microbial Biotechnology*, 14 (2), 535–550. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13693>
31. Amogou, O., Noumano, A. P., Agbodjato, N. A., Sina, H., Dagbenonbakin, G., Adoko, M. Y., Salako, V. K., Kakai, R. G., Adjanohoun, A., & Baba-moussa, L. (2021). Rhizobacterial inoculation in combination with mineral fertilizer improves maize growth and yield in poor ferruginous soil in central Benin. *BioTechnologia*, 102(2), 141–155. <https://doi.org/10.5114/bta.2021.106520>
32. Mahmud, A. A., Yahaya, S. M., Dhaked, G. S., Jain, D., & Bhojiya, A. A. (2022). Impacts of NPK consortia biofertilizer and mineral fertilizer on growth and yield of two maize (*Zea mays* L.) hybrids in Rajasthan-India. *Diya Agricultural Sciences Journal*, 14 (2), 100–117. <https://doi.org/10.52951/dasj.22140210>

ORCID

L. Yermko  <https://orcid.org/0000-0001-5641-7436>
A. Kyrlytsia  <https://orcid.org/0009-0006-1619-9423>



2025 by the author(s). This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.