

## ENVIRONMENTALLY ADJUSTED ANALYSIS OF AGRICULTURAL EFFICIENCY: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW OF FRONTIER APPROACHES

### ANALIZA SKORYGOWANEJ ŚRODOWISKOWO EFEKTYWNOŚCI ROLNICTWA – SYSTEMATYCZNY PRZEGLĄD LITERATURY WYKORZYSTUJĄCEJ PODEJŚCIE GRANICZNE

JAKUB STANISZEWSKI  
ANNA MATUSZCZAK

**Citation:** Staniszewski, J., & Matuszczak, A. (2023). Environmentally Adjusted Analysis of Agricultural Efficiency: A Systematic Literature Review of Frontier Approaches / Analiza skorygowanej środowiskowo efektywności rolnictwa – systematyczny przegląd literatury wykorzystującej podejście graniczne. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, 374(1), 20–41. <https://doi.org/10.30858/zer/162644>

This research was funded by the National Science Centre (Poland) (Dec. 2018/29/N/HS4/01799) / Badanie zostało sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Nauk (Dec. 2018/29/N/HS4/01799).

#### Abstract


*The paper reviews 200 papers regarding environmentally adjusted analysis of agricultural efficiency found in the Scopus database. Based on the PRISMA method the scope of the review was limited to papers where efficiency is assessed with data envelopment analysis (DEA) or stochastic frontier analysis (SFA). The aim of this paper is to identify how efficiency analysis can be enhanced to take into account environmental aspects of agricultural production and indicate the research trends and gaps. Regarding the trends, most of the studies refer to agriculture in Europe, with a noticeable increasing trend in Asia. The production directions under research mainly include crops or milk production, usually in the farm scale. It can also be observed that a typical economic efficiency model is developed to include new environmentally detrimental inputs or undesirable outputs, such as fertilizing, climate impact, crop protection, water footprint, and energy usage. The most common determinants were farmers features, scale of production, intensification, agricultural practices, quality of the production environment, macroeconomic environment, specialization, environmental practices, and farm features. The following research gaps were identified. The case studies of Africa and North America are limited, like those at the field and local levels as well as those related to horticultural and animal production other than milk production. The SFA approaches are underdeveloped in comparison*

---

Jakub Staniszewski, PhD, Poznań University of Economics and Business, Department of Macroeconomics and Agricultural Economics; al. Niepodległości 10, 61-875 Poznań, Poland ([jakub.staniszewski@ue.poznan.pl](mailto:jakub.staniszewski@ue.poznan.pl)).

 <https://orcid.org/0000-0001-8074-0911>

Anna Matuszczak, PhD, DSc, ProfTIt, Poznań University of Economics and Business, Department of Macroeconomics and Agricultural Economics; al. Niepodległości 10, 61-875 Poznań, Poland ([anna.matuszczak@ue.poznan.pl](mailto:anna.matuszczak@ue.poznan.pl)).

 <https://orcid.org/0000-0002-5045-5447>

with DEA, like approaches other than additional inputs/outputs. In particular, the by-production approach seems promising. Limited attention has been paid to soil condition, biodiversity, waste generation in agriculture, and positive externalities provided by the agriculture. An interesting and less investigated area in terms of performance determinants remain farmers' behavioral features.

**Keywords:** stochastic frontier analysis, data envelopment analysis, eco-efficiency, sustainable intensification.

**JEL codes:** O13, D24, Q1, Q5.

### Abstrakt

*W pracy dokonano przeglądu 200 artykułów dotyczących skorygowanej środowiskowo efektywności rolnictwa, które dostępne są w bazie Scopus. Na podstawie metody PRISMA ograniczono zakres przeglądu do prac, w których efektywność oceniana jest za pomocą analizy obwiedni danych (DEA) lub stochastycznej analizy granicznej (SFA). Celem pracy jest określenie, w jaki sposób analiza efektywności może być wzbogacona o uwzględnienie środowiskowych aspektów produkcji rolniczej, a także wskazanie trendów i luk badawczych. Jeśli chodzi o trendy, to większość opracowań dotyczy rolnictwa w Europie, z zauważalną tendencją wzrostową w liczbie prac dotyczących Azji. Badane kierunki produkcji to głównie uprawy polowe i mleczarstwo, a analizy prowadzone są najczęściej na poziomie gospodarstw. Obserwuje się też rozbudowywanie typowego modelu efektywności ekonomicznej o nowe, szkodliwe dla środowiska, nakłady lub niepożądane efekty, którymi były najczęściej nawożenie, wpływ na klimat, ochrona roślin, ślad wodny i zużycie energii. Najczęściej analizowanymi determinantami były cechy rolników, skala produkcji, stopień intensyfikacji, praktyki rolnicze, jakość środowiska produkcyjnego, otoczenie makroekonomiczne, specjalizacja, praktyki środowiskowe i cechy gospodarstwa. Zidentyfikowano także luki badawcze w analizowanym obszarze. Liczba studiów przypadku z Afryki i Ameryki Północnej jest ograniczona, podobnie jak badań na poziomie terenowym i lokalnym oraz tych, które dotyczą produkcji ogrodniczej i zwierzęcej, innej niż mleczna. Podejścia wykorzystujące metodę SFA są słabo rozwinięte w porównaniu z DEA, podobnie jak podejścia inne niż wykorzystujące dodatkowe nakłady/wydatki. W szczególności obiecujące wydaje się podejście oparte na produkcji ubocznej. Ograniczoną uwagę zwrócono na kwestie takie jak stan gleby, różnorodność biologiczna, wytwarzanie odpadów w rolnictwie oraz pozytywne efekty zewnętrzne dostarczane przez rolnictwo. Interesującym i mniej zbadanym obszarem w zakresie determinantów wydajności pozostają cechy behawioralne rolników.*

**Słowa kluczowe:** stochastyczna analiza graniczna, analiza obwiedni danych, ekoeffektywność, zrównoważona intensyfikacja.

**Kody JEL:** O13, D24, Q1, Q5.

### Introduction

The issue of sustainable development resonate particularly strongly in modern economics, all the more so when, both globally and locally, the negative externalities of crossing the environmental barrier are making themselves felt more and more strongly and severely. The already theoretically established paradigm of sustainable development (Czyżewski & Kułyk, 2013; Zegar, 2007; 2018), which assumes the dynamic achievement of harmony between economic, social, and environmental order—as practice shows—is not easy to achieve. This is because it is problematic to reconcile microeconomic efficiency, aimed primarily at satisfying the needs of the individual, with macroeconomic rationality, where community-wide and national interests are more important (Van Huylenbroeck et al., 2004; Kulawik, 2007). Similarly, when the focus is on the individual, social justice

### Wstęp

Problematyka zrównoważonego rozwoju szczególnie mocno rezonuje we współczesnej ekonomii, tym bardziej gdy zarówno w skali globalnej, jak i lokalnej coraz mocniej i dotkliwiej dają o sobie znać negatywne efekty zewnętrzne przekraczania bariery ekologicznej. Ugruntowany już teoretycznie paradygmat zrównoważonego rozwoju (Czyżewski i Kułyk, 2013; Zegar, 2007; 2018), który zakłada dynamiczne osiągnięcie harmonii pomiędzy porządkiem gospodarczym, społecznym i środowiskowym, jak pokazuje praktyka – nie jest łatwy do osiągnięcia. Problematyczne jest bowiem pogodzenie efektywności mikroekonomicznej, ukierunkowanej przede wszystkim na zaspokojenie potrzeb jednostki, z racjonalnością makroekonomiczną, gdzie ważniejsze są interesy ogólnospołeczne, narodowe (Van Huylenbroeck i in., 2004; Kulawik, 2007). Podobnie sprawiedliwość społeczna, gdy w centrum

does not go hand in hand with economic efficiency, where economic results are key (Pimentel, 2006; Krasowicz, 2009; Tarnowska, 2010; Krysztofiak & Pawlak, 2017). It is equally difficult to balance ensuring food security and income for food producers with preserving the environment, where limitations, arising from the environment, force the restoration of disturbed balances so that farming, or existence, can continue (Matuszczak, 2020). The agricultural sector also faces many of these problems—more and more, often contradictory, requirements are imposed on farmers. First and foremost, the food security depends on them, in terms of physical and economic availability of food, as well as its quality. They should carry out their production with respect to soils, water resources, atmosphere, and biodiversity (Matson et al., 1997; Tilman et al., 2001; Tschamtker et al., 2005; Kleijn et al., 2009). At the same time this activity should be profitable, so that farmers' family can live with dignity and the farm is able to develop. Under these conditions, it seems rational to increase the environmental efficiency of farms, where, on the one hand, one takes care of the payment for the involvement of one's own productive factors in the operational activities of the farm and the payment for the risks taken by the farmer, that is, *de facto* income, and on the other hand, monitors the inputs that constitute the factors creating environmental pressure in agricultural activities, so that the relationship can be maximized (remain the highest). The concept of sustainable intensification (SI) of agriculture, which involves „improving total factor productivity through improved resource efficiency and lowering environmental impact per unit of output” (Lampkin et al., 2015, p. 21), or in other words, producing “more value with less [environmental] impact” (Tittonell, 2014, p. 53) fits into this issue. The concept of sustainable intensification is part of a broader line of research on sustainable development. Furthermore, the decomposition of SI leads to an interesting conclusion that “in contrast to the concept of intensity, sustainability is not well-defined or measured but is universally supported” (Buckwell et al., 2014, p. 28). In this context, the need to integrate environmental aspects into a common efficiency analysis, and thus synthesize quantitative methods of measuring intensity with a qualitative way of understanding the world, which is the essence of the paradigm of sustainable agricultural development, seems legitimate (Czyżewski & Staniszewski, 2018). Particularly in the situation of the existence of shortcomings in the present methods of measuring sustainability and sustainable intensification (Buckwell et al., 2014), but also the multiplicity of

zainteresowania jest jednostka, nie idzie w parze z efektywnością ekonomiczną, gdzie kluczowe są wyniki ekonomiczne (Pimentel, 2006; Krasowicz, 2009; Tarnowska, 2010; Krysztofiak i Pawlak, 2017). Równie trudno jest pogodzić zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego i dochodów producentów żywności z zachowaniem środowiska naturalnego, gdzie ograniczenia, wynikające z tego środowiska, wymuszają przywrócenie zaburzonych równowag, aby rolnictwo, czyli egzystencja, mogła być kontynuowana (Matuszczak, 2020). Z wieloma z tych problemów boryka się również sektor rolniczy – na rolników nakładane są coraz większe, często sprzeczne, wymagania. Przede wszystkim od nich zależy bezpieczeństwo żywnościowe w zakresie fizycznej i ekonomicznej dostępności żywności, a także jej jakości. Powinni oni prowadzić swoją produkcję z poszanowaniem gleb, zasobów wodnych, atmosfery i różnorodności biologicznej (Matson i in., 1997; Tilman i in., 2001; Tschamtker i in., 2005; Kleijn i in., 2009). Jednocześnie działalność ta powinna być opłacalna, aby rodzina rolnika mogła godnie żyć, a gospodarstwo mogło się rozwijać. W tych warunkach racjonalne wydaje się zwiększanie efektywności środowiskowej gospodarstw, gdzie z jednej strony dba się o zapłatę za zaangażowanie własnych czynników wytwórczych w działalność operacyjną gospodarstwa i zapłatę za ryzyko podejmowane przez rolnika, czyli *de facto* o dochód, a z drugiej strony monitoruje się nakłady stanowiące czynniki tworzące presję środowiskową w działalności rolniczej, tak aby relacja ta mogła być maksymalizowana (pozostawać najwyższa). W to zagadnienie wpisuje się koncepcja zrównoważonej intensyfikacji (ang. *sustainable intensification*, SI) rolnictwa, która polega na poprawie całkowitej produktywności rolnictwa poprzez większą efektywność wykorzystania zasobów i zmniejszenie śladu środowiskowego na jednostkę produkcji (Lampkin i in., 2015), lub inaczej mówiąc, wytwarzanie większej wartości przy mniejszym wpływie na środowisko (Tittonell, 2014). Koncepcja zrównoważonej intensyfikacji wpisuje się w szerszą linię badań nad zrównoważonym rozwojem. Co więcej, jej dekompozycja prowadzi do interesującego wniosku, że koncepcja intensyfikacji produkcji jest w kontekście rolniczym dobrze zdefiniowana i łatwo mierzalna, ale szeroko dyskredytowana, podczas gdy koncepcja zrównoważenia nie jest wystarczająco zdefiniowana lub mierzalna, a mimo to powszechnie popierana (Buckwell i in., 2014). W tym kontekście uzasadniona wydaje się potrzeba włączenia aspektów środowiskowych do typowej analizy efektywności, a tym samym syntez ilościowych metod pomiaru intensywności, z jakościowym sposobem rozumienia świata, co jest istotą paradygmatu zrównoważonego



assessment methods and unreflective approaches to them, it is necessary to indicate the current state of knowledge in this area.

Thus, the goal of the research is to identify how efficiency analysis can be enhanced to take into account environmental aspects of agricultural production. Furthermore, the study indicates the research trends and gaps:

- in spatial scope (with delimitation to each continent, but also through the prism of the analysis level: farm, field, local, regional, and country),
- in terms of different types of agricultural production and aquaculture (coinciding with those identified by FADN, i.e. field crops, horticulture, wine, other permanent crops, milk, other grazing livestock, granivores, more than one type, and aquaculture),
- in terms of different environmental pressures and services associated with agricultural production (e.g. fertilizing, climate impact, crop protection, water footprint, energy usage, ecosystem diversity, ocean impact etc.),
- in terms of the determinants of the environmentally adjusted agricultural performance (scale of production, intensification, agricultural practices, quality of the production environment, macroeconomic environment, specialization, environmental practices, and farm features),
- in methodology (data envelopment analysis and stochastic frontier analysis, with extra adjustments in terms of additional environmental variables, undesirable outputs, eco-efficiency calculation, frontier efficiency analysis with life cycle assessment, weak disposability assumption, by-production approach, material balance principle, and data transformation).

When it comes to a similar studies, which covered a review of the methods to include environmental issues in efficiency assessment some previous papers can be mentioned. However, those publications either need to be updated (Ramil & Munisamy, 2013; Lansink & Wall, 2014) or they have not been conducted in a systematic framework (Dakpo et al., 2016; Hampf, 2018; Halkos & Petreu, 2019). Some of recent systematic reviews concentrated only on the non-parametric approaches (Dakpo et al., 2020; Pishgar-Komleh et al., 2020; Streimikis & Saraji, 2021).

rozwoju rolnictwa (Czyżewski i Staniszewski, 2018). Szczególnie w sytuacji istnienia braków w obecnych metodach pomiaru zrównoważonego rozwoju i zrównoważonej intensyfikacji (Buckwell i in., 2014), ale także wielości metod oceny i bezrefleksyjnego podejścia do nich konieczne jest wskazanie aktualnego stanu wiedzy w tym zakresie.

Tym samym celem badań jest wskazanie, w jaki sposób analiza efektywności może zostać wzbogacona o uwzględnienie środowiskowych aspektów produkcji rolniczej. Ponadto wskazano trendy i luki badawcze:

- w zakresie przestrzennym badań (z delimitacją na poszczególne kontynenty, ale także przez pryzmat poziomu analizy: gospodarstwo, poziom lokalny, regionalny i krajowy),
- w zakresie badań różnych typów produkcji rolnej i akwakultury (zbieżnych z tymi, które zostały zidentyfikowane przez FADN, tj. uprawy polowe, ogrodnictwo, winiarstwo, inne uprawy trwałe, mleko, inne zwierzęta żywione w systemie wypasowym, zwierzęta ziarnożerne, gospodarstwa mieszane i zajmujące się akwakulturą),
- w obszarze badań różnych presji na środowisko i dóbr publicznych związanych z produkcją rolą (np. nawożenie, wpływ na klimat, ochrona upraw, ślad wodny, zużycie energii, różnorodność ekosystemów, wpływ na oceany itp.),
- w zakresie identyfikacji determinantów skorygowanej środowiskowo efektywności rolnictwa (skala produkcji, intensyfikacja, praktyki rolnicze, jakość środowiska produkcyjnego, otoczenie makroekonomiczne, specjalizacja, praktyki środowiskowe i cechy gospodarstwa),
- w metodologii (analiza obwiedni danych i stochastyczna analiza graniczna, z dodatkowymi dostosowaniami polegającymi na dodaniu nowych zmiennych środowiskowych, niepożądanych efektów, obliczaniu ekoeffektywności, analiz granicznych uwzględniających cykl życia produktu, założenie o słabej dyspozycyjności, podejście oparte na produkcji ubocznej, zasada bilansu materiałowego i transformacja danych).

Jeśli chodzi o podobne badania, które obejmowały przegląd prac uwzględniających wzbogacenie o kwestie środowiskowe oceny efektywności, można wymienić kilka wcześniejszych publikacji. Jednak dodać należy, że albo wymagają one aktualizacji (Ramil i Munisamy, 2013; Lansink i Wall, 2014), albo nie zostały przeprowadzone w sposób systematyczny (Dakpo i in., 2016; Hampf, 2018; Halkos i Petreu, 2019). Niektóre z ostatnich przeglądów systematycznych skupiły się natomiast tylko na podejściach nieparametrycznych (Dakpo i in., 2020; Pishgar-Komleh i in., 2020; Streimikis i Saraji, 2021).

## Material and Methods

The review uses a PRISMA method (Page et al., 2021). Due to the fact that it was originally invented for a meta-analysis in medical sciences some steps like risk of bias assessment were omitted. However, even without these steps, PRISMA allows for systematizing the review in a broadly recognizable framework.

When it comes to the review eligibility criteria, the study includes papers, conference materials, and book chapters. The authors decided not to impose any time and spatial limitations as well as agricultural production type limitations. However, only empirical studies were included, because the authors were particularly interested in the methods which are applicable in the context of agricultural production. The authors refer to the papers based not only on the data collected at the farm level, but also region or country levels. Another eligibility criterion was using the frontier efficiency assessment, in particular data envelopment analysis (DEA) or stochastic frontier analysis (SFA), as they are the most common (Emrouznejad & Yang, 2018) and accepted methods of efficiency analysis. Finally, the review was limited to papers, where environmental aspects of agricultural production were reflected in efficiency evaluation, since the aim of the research was to identify how efficiency analysis could be enhanced to take into account sustainable development goals.

The information source for this review was a query acquired on 12 May 2022 from the Scopus database, the widest text database regarding social sciences. The study was also limited to papers published in English as they have the highest possible impact on international research agenda.

The query was formulated as follows:

“(TITLE-ABS-KEY (“farm\*” OR “agri\*” OR animal OR livestock OR crop)) AND (TITLE-ABS-KEY (“environmental performance”) OR TITLE-ABS-KEY (“eco-\*efficiency”) OR TITLE-ABS-KEY (“environmental \*efficiency”) OR TITLE-ABS-KEY (“ecological \*efficiency”) OR TITLE-ABS-KEY (“ecological performance”) OR TITLE-ABS-KEY (“bad output\*” OR “undesirable output\*”) OR TITLE-ABS-KEY (“environmental productivity”) OR TITLE-ABS-KEY (“ecological productivity”) OR TITLE-ABS-KEY (“adjusted performance”) OR TITLE-ABS-KEY (“adjusted productivity”) OR TITLE-ABS-KEY (“green performance”) OR TITLE-ABS-KEY (“adjusted \*efficiency”) OR TITLE-ABS-KEY (“green \*efficiency”) OR TITLE-ABS-KEY (“pollut\* adjusted”) OR TITLE-ABS-KEY (“eco-productivity”) OR TITLE-ABS-KEY (“green productivity”)) AND ((TITLE-ABS-KEY (dea OR “envelopment” OR non-parametric)) OR (TITLE-ABS-KEY (sfa OR “stochastic frontier” OR parametric)) OR (TITLE-ABS-KEY (tfp OR “total factor productivity”)))”.

## Materiały i metody

W przeglądzie zastosowano metodę PRISMA (Page i in., 2021). Ze względu na fakt, że została ona pierwotnie stworzona z myślą o metaanalizach w naukach medycznych, niektóre kroki, takie jak ocena ryzyka błędu systematycznego, zostały pominięte. Jednak nawet bez tych kroków PRISMA pozwala usystematyzować przegląd w powszechnie akceptowalnych ramach.

Jeśli chodzi o kryteria kwalifikacji do przeglądu, to uwzględnione zostały prace, materiały konferencyjne i rozdziały w wydawnictwach zwartych. Podczas doboru literatury nie nakładano żadnych ograniczeń czasowych i przestrzennych, jak również ograniczeń dotyczących rodzaju produkcji rolnej. Zostały uwzględnione jednak wyłącznie badania empiryczne, ponieważ praca skupia się na identyfikacji metod, które mają zastosowanie w kontekście produkcji rolniczej. Chodzi tu o prace prowadzone nie tylko na danych zebranych na poziomie gospodarstwa, ale także regionu czy kraju. Kolejnym kryterium kwalifikacji było zastosowanie granicznej metody oceny efektywności, w szczególności analizy obwiedni danych (ang. *data envelopment analysis*, DEA) lub stochastycznej analizy granicznej (ang. *stochastic frontier analysis*, SFA), które są najszerzej rozpowszechnione (Emrouznejad i Yang, 2018) i akceptowane. Ostatecznie przegląd ograniczono do prac, w których aspekty środowiskowe produkcji rolniczej znalazły odzwierciedlenie w ocenie efektywności, gdyż celem badań jest określenie, w jaki sposób analiza efektywności może zostać wzbogacona o uwzględnienie celów zrównoważonego rozwoju.

Źródłem informacji dla tego przeglądu była kwerenda pozyskana 12 maja 2022 r. z bazy Scopus, najszerzej bazy tekstowej dotyczącej nauk społecznych. Zdecydowano się również na ograniczenie badania do prac opublikowanych w języku angielskim, ponieważ mają one największy możliwy wpływ na badania międzynarodowe.

Kwerenda została pozyskana na podstawie następującego zapytania:

In the selection process all the titles, abstracts, and full texts were screened by one co-author and analyzed in original English language. Further, in the data collection process, the data from the literature was collected by one co-author and papers were categorized based on their expert knowledge. Results were collected in Excel file (.xls), according to the predefined scheme, based on finding specific features of certain paper, regarding scope of the study, method, type of data and variables used.

The analyzed data items were as follows:

- spatial scope: country, continent, developing country (binary 0–1 variable);
- production type: TF8 classification, specific type reported in study;
- method:
  - DEA or SFA,
  - TFP index (0–1), TFP index type,
  - efficiency determinants analysis (0–1), analysis method,
  - approach to environmental issues, estimation method;
- determinants and their significance;
- data type: measurement scale, panel data (0–1), input and output variables.

Regarding synthesis method (eligibility for synthesis), method and data description was analyzed to check whether efficiency of agricultural production was assessed using SFA or DEA approach and whether some additional inputs, outputs or methods of measurement were included to measure the sustainability of the production. Further preparation for a synthesis included the following assumptions. In the papers where both SFA and DEA approaches were used, separate category was introduced (“DEA/SFA” sign) and specific features of both approaches are noted. In the case of papers where, beside the environmentally adjusted analysis, a classical models were presented, only the results of adjusted model are reported. In the case of works, where the determinants of efficiency were assessed in different models configurations, and the direction of impact was differentiated among those models, the results were treated as inconclusive (“?”). When a nominal variable was assessed as the determinant and some categories were significantly different from others “+/-” sign was used. When a certain determinant was introduced into model but statistically insignificant, it was also noted (“x”). In the description of estimation method, when author did not report any source of applied method or claimed that their approach is innovative in comparison to earlier study, the method was described as “own”. The results of the synthesis

W procesie selekcji wszystkie tytuły, abstrakty i pełne teksty zostały sprawdzone przez jednego z autorów i przeanalizowane w języku angielskim. W procesie zbierania danych z literatury uczestniczył jeden ze współautorów, a prace zostały skategoryzowane na podstawie jego wiedzy eksperckiej. Wyniki zostały zebrane w pliku Excel (.xls), zgodnie z ustalonym wcześniej schematem, na podstawie znalezienia specyficznych cech danej pracy, dotyczących zakresu badania, metody, rodzaju danych i użytych zmiennych.

Analizowane cechy artykułów były następujące:

- zakres przestrzenny: kraj, kontynent, kraj rozwijający się (zmienna binarna);
- typ produkcji: klasyfikacja TF8, konkretny typ przytoczony w badaniu;
- metoda:
  - DEA lub SFA;
  - indeks produktywności całkowitej TFP (0–1), typ indeksu TFP;
  - analiza determinantów efektywności (0–1), metoda analizy;
  - podejście do kwestii środowiskowych, metoda szacowania;
- determinanty i ich znaczenie;
- rodzaj danych: skala pomiaru, dane panelowe (0–1), zmienne wejściowe i wyjściowe.

W zakresie sposobu syntezy (kwalifikacja do syntezy) przeanalizowano metodę i opis danych, aby sprawdzić, czy efektywność produkcji rolniczej oceniono z wykorzystaniem podejścia SFA lub DEA oraz czy uwzględniono jakieś dodatkowe nakłady, produkty lub metody pomiaru, aby zmierzyć zrównoważenie produkcji. Dalsze przygotowanie do syntezy obejmowało kolejno założenia. W pracach, w których zastosowano zarówno podejście SFA, jak i DEA, wprowadzono osobną kategorię (oznaczenie „DEA/SFA”) i odnotowano specyficzne cechy obu podejść. W przypadku prac, w których oprócz analizy uwzględniającej aspekty środowiskowe przedstawiono modele klasyczne, podano tylko wyniki rozbudowanego modelu. W przypadku prac, w których determinanty efektywności były oceniane w różnych konfiguracjach modeli, a kierunek wpływu był zróżnicowany, wyniki potraktowano jako niejednoznaczne („?”). Gdy jako determinantę oceniano zmienną nominalną i niektóre kategorie różniły się istotnie od innych, stosowano znak „+/-”. Gdy dana determinanta została wprowadzona do modelu, ale była nieistotna statystycznie, również to odnotowywano („x”). W opisie metody estymacji, gdy autor nie podał źródła zastosowanej metody lub twierdził, że jego podejście jest nowatorskie w stosunku do



are presented in a graphical form. The structure of publications in certain years is visualized in bar charts. Relationships between different publications features are summarized in the multidimensional contingency tables.

## Results

The first step of the research was a study selection. It is summarized in the Figure 1. For a query described in the methods part the Scopus database showed 310 records. Three records were removed before screening as duplicates (conference materials followed by journal articles) and one as retracted article. In the screening further 48 papers were excluded as non-referring to agricultural production. Seven papers could not have been accessed due to licensing reasons. In the content analysis process another papers were excluded due to: a) being published in language other than English ( $n = 22$ ); b) research approach which failed to include frontier efficiency analysis ( $n = 14$ ); c) research approach which has not modified classic methods of efficiency analysis to align them with the sustainability assessment ( $n = 11$ ); d) lack of the empirical study in the paper ( $n = 4$ ). Finally 200 papers were included in the review. A complete table including all the papers included and excluded from the research, alongside with a justification, can be made available by the authors upon request.

The results analysis starts with a time and spatial scope of the research. It is summarised in the Figure 2. Some interesting trends can be identified here. Firstly, one can observe a domination of studies conducted in Europe (43% of the papers). It can be associated with the fact that in Europe, in the European Union in particular, the need for greener agricultural practices was recognized and its implementation started at the earliest. Secondly, a growth in the studies regarding Asia, China in particular, should be noticed. Thirdly, concerning the role of North America in global economy and the share of Africa in global population, studies regarding agriculture in those continents are underrepresented.

wcześniejszych badań, metodę określano jako własną. Wyniki syntezy przedstawiono w formie graficznej. Struktura publikacji w poszczególnych latach została zwizualizowana na wykresach słupkowych. Zależności między poszczególnymi cechami publikacji zestawiono w wielowymiarowych tabelach kontyngencji.

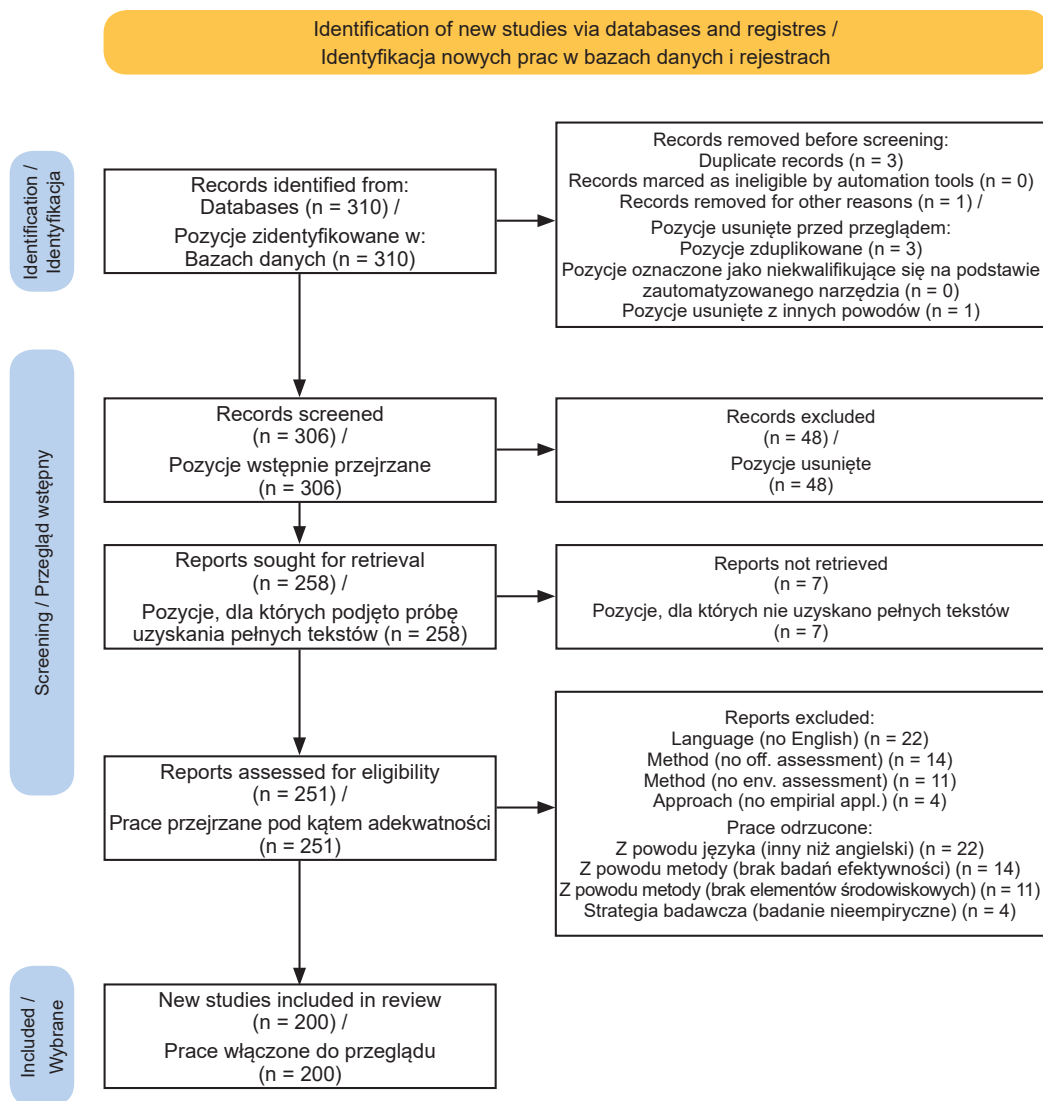
## Wyniki

Pierwszym etapem badań była selekcja publikacji. Zostało to przedstawione na rysunku 1. Dla zapytania opisanego w części metodycznej baza Scopus zwróciła 310 rekordów. Trzy rekordy zostały usunięte przed screeningiem jako duplikaty (materiały konferencyjne, a następnie artykuły z czasopism), a jeden jako artykuł wycofany. W dalszej części przeglądu 48 prac zostało wykluczonych jako nieodnoszące się do produkcji rolnej. Dostęp do siedmiu prac był niemożliwy z powodów licencyjnych. W procesie analizy treści wykluczono kolejne prace ze względu na: a) publikację w języku innym niż angielski ( $n = 22$ ); b) podejście badawcze, które nie uwzględniło analizy efektywności granicznej ( $n = 14$ ); c) podejście badawcze, które nie modyfikowało klasycznych metod analizy efektywności w celu dostosowania ich do oceny zrównoważonego rozwoju ( $n = 11$ ); d) brak badań empirycznych w pracy ( $n = 4$ ). Ostatecznie do przeglądu włączono 200 prac. Pełna tabela zawierająca wszystkie prace włączone i wyłączone z badań, wraz z uzasadnieniem, może być udostępniona przez autorów na życzenie.

Analizę wyników rozpoczyna określenie zakresu czasowego i przestrzennego badań. Został on podsumowany na rysunku 2. Można tu wskazać kilka ciekawych tendencji. Po pierwsze, zaobserwowano dominację badań prowadzonych w Europie (43% prac). Może to być związane z faktem, że w Europie, a w szczególności w Unii Europejskiej, najwcześniej dostrzeżono konieczność stosowania bardziej ekologicznych praktyk rolniczych i rozpoczęto ich wdrażanie. Po drugie, należy zauważyć wzrost liczby opracowań dotyczących Azji, w szczególności Chin. Po trzecie, ze względu na rolę Ameryki Północnej w gospodarce światowej oraz udział Afryki w populacji światowej, opracowania dotyczące rolnictwa na tych kontynentach uznać można za słabo reprezentowane.

Figure 1. PRISMA chart – a study selection process

Rysunek 1. Schemat PRISMA – proces selekcji badań

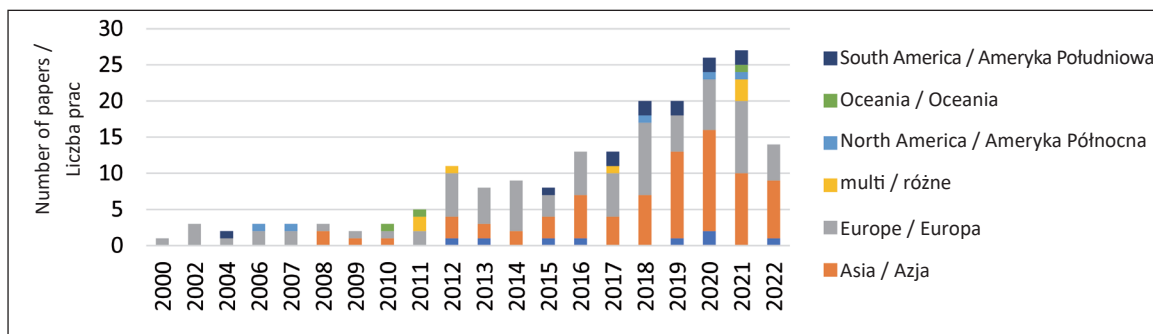


Source: authors' own study based on the Scopus database.

Źródło: opracowanie własne na podstawie bazy Scopus.

Figure 2. Time and spatial scope of the studies

Rysunek 2. Zakres czasowy i przestrzenny badań



Source: authors' own study based on the Scopus database.

Źródło: opracowanie własne na podstawie bazy Scopus.



**Table 1.** Research scale and production type

**Tabela 1.** Skala badań i rodzaj produkcji

Specification / Wyszczególnienie		Production type / Rodzaj produkcji								
		Field crops / Uprawy polowe	Horticulture / Uprawy ogrodnicze	Wine / Produkcja winiarska	Other permanent crops / Inne uprawy trwałe	Milk / Krowy mleczne	Other grazing livestock / Zwierzęta trawożerne	Granivores / Drób i trzoda chlewna	More than one type / Więcej niż jeden typ	Aquaculture / Akwakultura
Scale of the research / Skala badań	Farm / Gospodarstwo	44	5	3	12	29	1	9	8	10
	Field / Terenowa	3	0	0	0	1	0	0	0	1
	Local / Lokalna	3	0	0	0	0	0	0	1	0
	Regional / Regionalna	7	0	0	1	0	3	1	25	0
	Country / Międzynarodowa	4	0	0	0	0	0	0	22	0

Source: authors' own study based on the Scopus database.

Źródło: opracowanie własne na podstawie bazy Scopus.

Papers also differ in terms of the scale of research and the types of agricultural production studied. These differences are presented in Table 1. The most common pattern is the research on field crops (23% of the papers) or milk production (15%) in the farm scale. Additionally, more than one type of production or aggregated production is analyzed mostly at the regional (13%) or country level (11%). As a research gap, the underrepresentation of the research on granivores and horticulture may be indicated. Also studies at field and local levels are missing.

The main goal of this paper is to identify the methods used to evaluate environmentally adjusted agricultural efficiency. Among studies the most popular method was data envelopment analysis (82% of the papers), but increasing interest in the stochastic frontier approach can be observed between 2015 and 2020, when the SFA papers represented on average 21% of all the studies. However, using plain DEA or SFA method is not enough to take into account environmental issues of agricultural production. Some additional adjustments are necessary. Strategies for those adjustments are shown in Figure 3.

One of the most common strategies was including additional environmental inputs in a typical economic efficiency model. This approach was particularly popular among the SFA studies. Firstly proposed by Reinhard et al. (1999, 2002), the framework was

Prace różnią się także pod względem skali badań i analizowanych typów produkcji rolnej. Różnice te zestawiono w tabeli 1. Najczęściej badane były gospodarstwa zajmujące się uprawami polowymi (23% prac) lub produkujące mleko (15%). Dodatkowo gospodarstwa mieszane lub produkcja zagregowana analizowana jest najczęściej w skali regionu (13%) lub kraju (11%). Jako lukę badawczą można wskazać niewielką liczbę badań dotyczących hodowli zwierząt ziarnożernych i upraw ogrodniczych. Brakuje również badań na poziomie terenowym i lokalnym.

Głównym celem pracy jest identyfikacja metod stosowanych do oceny efektywności rolnictwa z uwzględnieniem aspektów środowiskowych. Wśród badań najpopularniejszą metodą była analiza obwiedni danych (82% prac), ale wzrost zainteresowania stochastyczną analizą graniczną można zauważyć w latach 2015–2020, kiedy to prace SFA stanowiły średnio 21% wszystkich badań. Zastosowanie zwykłej metody DEA lub SFA nie jest jednak wystarczające do uwzględnienia środowiskowych problemów produkcji rolnej. Konieczne są pewne dodatkowe dostosowania. Strategie tych dostosowań zestawiono na rysunku 3.

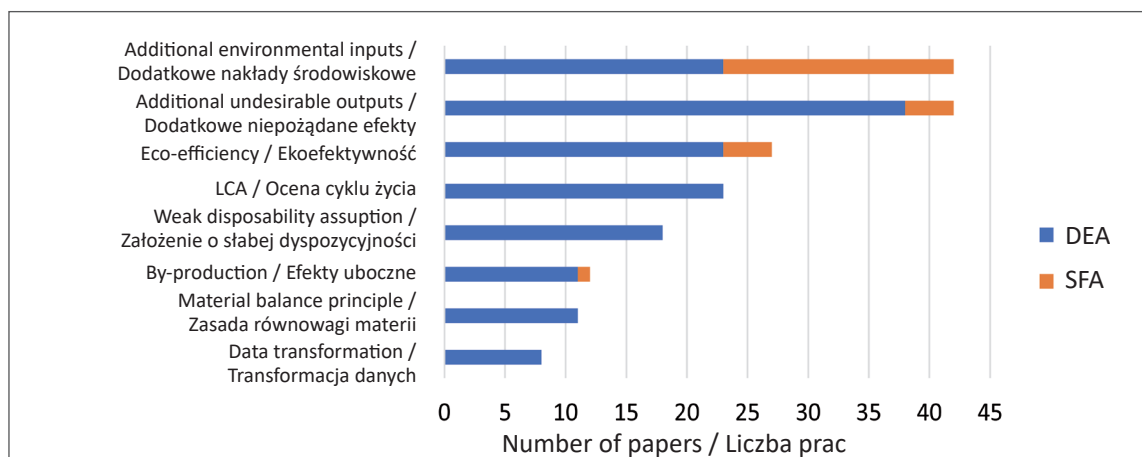
Jedną z najczęściej stosowanych strategii było dodanie do typowego modelu efektywności ekonomicznej dodatkowych nakładów środowiskowych (ang. *additional environmental inputs*). Podejście to było szczególnie popularne w badaniach SFA. W większości

applied in most of the cases. In their method, the set of inputs is divided into conventional and environmentally detrimental inputs. Further an output-oriented efficiency (translog production function) is estimated and based on the obtained parameters and error component, environmental efficiency and input-oriented efficiency is calculated. In the DEA studies, the most basic constant CCR (Charnes et al., 1978) or variable returns to scale BCC (Banker et al., 1984) models are applied the most often. Even while this type of approach has some serious flaws. As concluded by Dakpo et al. (2016), this approach: a) deflects from physical laws and material balance principle ; b) abstract from underlying input-output structure of production process; c) when outputs are represented as freely disposable inputs a law of mass conservation is violated.

przypadków zastosowano ramy zaproponowane po raz pierwszy przez Reinharda i in. (1999, 2002). W ich metodzie zestaw nakładów podzielony jest na nakłady konwencjonalne i szkodliwe dla środowiska. Następnie szacowana jest efektywność zorientowana na wynik (translogarytmiczna funkcja produkcji), a na podstawie uzyskanych parametrów i składnika losowego obliczana jest efektywność środowiskowa i efektywność zorientowana na nakłady. W badaniach DEA najczęściej stosowane są podstawowe modele dla stałych CCR (Charnes i in., 1978) lub zmiennych efektów skali BCC (Banker i in., 1984), nawet jeśli tego typu podejście ma pewne poważne wady. Jak podsumowują Dakpo i in. (2016), podejście to: a) narusza prawa fizyki, w szczególności zasadę równowagi materii; b) abstrahuje od podstawowej struktury nakład–efekt w procesie produkcyjnym; c) gdy efekty są reprezentowane jako dowolnie dysponowane nakłady, naruszane jest prawo zachowania masy.

**Figure 3.** Approaches to environmental issues in agricultural efficiency models

**Rysunek 3.** Podejście do kwestii środowiskowych w modelach efektywności rolnictwa



Source: authors' own study based on the Scopus database.

Źródło: opracowanie własne na podstawie bazy Scopus.

Second equally popular approach was including additional undesirable output in the model. Importantly, this strategy is distinct in our paper from the weak disposability assumption where also additional outputs appear, but they are assumed to be weakly disposable, which means that to reduce their amount certain cost (increased usage of inputs) should be incurred. In this approach such assumption is absent. Undesirable outputs are treated as regular outputs, the only difference is that they are intended to be minimized. In this approach, most of the studies applied slack based method (SBM) developed by Tone (2001). In contrast to the traditional CCR and BCC models, this model is additive, which means

Drugim, równie popularnym podejściem, było włączenie do modelu dodatkowych, niepożądanych efektów (ang. *additional undesirable outputs*). Co ważne, strategia ta jest w naszej pracy rozróżniona względem prac, w których stosowane jest założenie o słabej dyspozycyjności (ang. *weak disposability assumption*) i w których również pojawiają się dodatkowe efekty, ale zakłada się, że są one słabo dyspozycyjne. Co oznacza, że aby zmniejszyć ich ilość, należy ponieść pewien koszt (zwiększyć zużycie nakładów). W tym podejściu takie założenie jest nieobecne. Efekty niepożądane traktowane są jak zwykłe, z tą różnicą, że są one przeznaczone do minimalizacji. W większości badań stosowano

that inputs and outputs amounts are optimized, yet not in a proportional manner. The Tone's model has some advantages over other additive models, since it allows for calculating efficiency score in 0–1 scale based on input and output slacks and it is unit invariant (Streimikis & Saraji, 2021). However, as noticed by Dakpo et al. (2020) this type of models suffers from the same limitations as those treating undesirable output as input.

The third most common approach was eco-efficiency calculation which relates economic outcomes to ecological outcomes (Lansink & Wall, 2014). However, it should be noted that the understanding of the term is ambiguous among researchers. Discussion about this issue was presented by Dakpo et al. (2020). The concept of the eco-efficiency was popularized by Korhonen and Luptacik (2004) and Kuosmanen and Kortleinen (2005). In the context of agriculture, this approach was the most often using traditional BCC and CCR models, so the innovativeness of this method comes only from the modification in the set of inputs. Therefore, as it is proposed by Halkos and Petreu (2019) the eco-efficiency approach can be treated as a special case of additional environmental input model. Unfortunately, the eco-efficiency concept is also criticized for being based on an incomplete production process – omitting economic inputs (Dakpo et al., 2016). On the other hand, a violation of the physical material balance principle is not an issue in this approach (Lansink & Wall, 2014).

Another analytical framework combines frontier efficiency analysis with life cycle assessment (LCA). This strategy is also often called LCA + DEA approach. The forerunners of this approach are Irrabaren et al. (2011). A distinctive feature of this method lies in the way how input and output data is collected and estimated. In the life cycle approach, the sources of environmental impact are identified and quantified from the extraction of natural resources until their elimination or disposal as a waste. Furthermore, its objective is not the minimization of undesirable outputs, but rather the potential reduction of these outputs in the case where all production units are technically efficient. Therefore, the model fails to capture all the input's substitution possibilities that could help optimize the environmental performance (Dakpo et al., 2016). As it is widely discussed in the paper by Pishgar-Komleh et al. (2020), from the point of view of efficiency analysis, a common radial (CCR, BCC) and SBM methods are applied to a data coming from LCA. Also, in agricultural studies reviewed in this paper the SBM, CCR, and BCC approaches were the most common.

miarę bazującą na luzach (ang. *slack-based measure*, SBM), opracowaną przez Tone'a (2001). Model ten, w przeciwieństwie do tradycyjnych modeli CCR i BCC, jest addytywny, co oznacza, że ilości nakładów i efektów są optymalizowane, ale nie w proporcjonalny sposób. Model Tone'a ma tę przewagę nad innymi modelami addytywnymi, że bazując na luzach nakładów i efektów, pozwala na obliczenie wyniku efektywności w skali 0–1 oraz jest niezależny od użytych jednostek pomiaru (Streimikis i Saraji, 2021). Jednakże, jak zauważają Dakpo i in. (2020), ten typ modeli posiada te same ograniczenia, co modele traktujące niepożądane efekty jako nakłady.

Trzecim najczęściej stosowanym podejściem były obliczenia ekoefektywności (ang. *eco-efficiency*), które odnoszą wyniki ekonomiczne do nakładów środowiskowych (Lansink i Wall, 2014). Należy jednak zaznaczyć, że rozumienie tego terminu jest niejednoznaczne wśród badaczy. Dyskusję na ten temat przedstawili Dakpo i in. (2020). Koncepcja ekoefektywności została spopularyzowana przez takich badaczy jak Korhonen i Luptacik (2004) oraz Kuosmanen i Kortleinen (2005). W kontekście rolnictwa podejście to było stosowane najczęściej z wykorzystaniem tradycyjnych modeli BCC i CCR, zatem innowacyjność tej metody wynika jedynie z modyfikacji w zestawie nakładów. Dlatego też, jak proponują Halkos i Petreu (2019), podejście ekoefektywności można traktować jako szczególny przypadek modelu dodatkowych nakładów środowiskowych. Niestety koncepcja ekoefektywności jest również krytykowana, za to, że opiera się na niepełnym procesie produkcyjnym – pomijając nakłady ekonomiczne (Dakpo i in., 2016). Jednakże naruszenie fizycznej zasady zachowania masy nie stanowi w tym podejściu problemu (Lansink i Wall, 2014).

Kolejne podejście łączy graniczną analizę efektywności z oceną cyklu życia (ang. *life cycle assessment*, LCA). Strategia ta jest również często nazywana podejściem LCA + DEA. Prekursorami tego podejścia są Irrabaren i in. (2011). Cechą charakterystyczną tej metody jest sposób zbierania i szacowania nakładów i efektów. W podejściu LCA źródła oddziaływania na środowisko są identyfikowane i kwantyfikowane od momentu wydobycia zasobów naturalnych do ich eliminacji lub unieszkodliwienia jako odpad. Ponadto jego celem nie jest minimalizacja niepożądanych produktów, ale raczej potencjalna redukcja tych produktów w przypadku, gdy wszystkie jednostki produkcyjne są technicznie wydajne. W związku z tym model ten nie ujmuje wszystkich możliwości substytucji nakładów, które mogłyby pomóc w optymalizacji wyników środowiskowych (Dakpo i in., 2016).



Another popular approach is based on a weak disposability assumption mentioned earlier. A parallel assumption being applied is null-jointness, which states that the only way to produce zero undesirable output is to resign from production of desirable ones. This method already requires significant adjustment to the way efficiency is estimated. The most commonly applied method are directional distance functions (DDF). The most seminal paper in this field is that by Chung et al. (1997). The DDF DEA model belongs to radial models family, but unlike BCC and CCR models, it does not assume proportional reductions in inputs or expansion in outputs, but allows the researcher to decide about the direction of changes. Owing to this, it is possible to model reduction in undesirable outputs, which are also assumed to be weakly disposable and null-joined with regular outputs. A criticism of this method is focused on a multiple issues: a) a fact that proportional reduction of desirable and undesirable outputs unintentionally assumes that all decision-making units (DMUs) share the same uniform abatement effort; b) not fully convex technology; c) treating pollutants as neutral, rather than as inputs or outputs, which is not a proper way of modelling pollution-generating technologies; d) wrong sign of shadow prices returned by the model; e) inconsistent results that do not conform with the materials balance condition; f) lack of connection between polluting inputs and undesirable output generated by them (all inputs generate all outputs); g) non-monotonicity in undesirable outputs; h) misclassification of efficiency status (strongly dominated firms may appear efficient); i) strongly dominated projection targets (some efficiency scores may be computed with respect to strongly dominated points used as targets); j) violation of the laws of thermodynamics; k) possibility of generating zero pollution with abatement technologies (Dakpo et al., 2016).

From this wide critique two next methods arose. More recent and more popular among them, in the case of agriculture, was a by-production approach. It was developed and popularized by Murty et al. (2012). The idea behind this approach is that desirable and undesirable outputs are modelled on a separate production frontiers. Also, inputs are divided into non-polluting and polluting. For the latter, free disposability is violated, since their higher usage implies more undesirable output. Consequently, a DMU position is compared with two frontiers and two efficiency scores are obtained, which are further aggregated. To apply this method, a DDF was used most often. As argued by Dakpo et al. (2016), this method obeys the laws of thermodynamics and does

Jak szeroko omówiono w pracy Pishgara-Komleha i in. (2020), z punktu widzenia analizy efektywności, do danych pochodzących z LCA stosuje się z reguły metodę radialną (CCR, BCC) i SBM. Również w badaniach rolniczych analizowanych w niniejszej pracy najczęściej stosowano podejście SBM, CCR i BCC.

Inne popularne podejście opiera się na wspomnianym wcześniej założeniu słabej dyspozycyjności. Równoległe stosowane jest założenie o zerowej złączoności, które mówi, że jedynym sposobem na wyprodukowanie zerowej ilości niepożądanych efektów jest rezygnacja z produkcji tych, które są pożądane. Metoda ta wymaga jednak znacznego dostosowania sposobu szacowania efektywności. Najczęściej stosowanym podejściem są kierunkowe funkcje odległości (ang. *directional distance function*, DDF). Najbardziej poczytna praca w tej dziedzinie pochodzi od Chunga i in. (1997). Model DDF DEA należy do rodziny modeli radialnych, ale w odróżnieniu od modeli BCC i CCR nie zakłada proporcjonalnego zmniejszania nakładów i zwiększania efektów, lecz pozwala badaczowi decydować o kierunku zmian. Dzięki temu możliwe jest modelowanie redukcji niepożądanych efektów, które dodatkowo zakłada się jako słabo dyspozycyjne i zerowo złączone z klasycznymi efektami. Krytyka tej metody koncentruje się na kilku kwestiach: a) fakcie, że proporcjonalna redukcja pożądanych i niepożądanych efektów, w sposób niezamierzony zakłada, że wszystkie DMU (ang. *decision-making unit*) podejmują taki sam wysiłek na rzecz ograniczenia oddziaływania środowiskowego; b) nie w pełni wypukłej technologii; c) traktowaniu zanieczyszczeń jako neutralnych, a nie jako nakładów lub efektów, co nie jest poprawnym sposobem modelowania technologii generujących zanieczyszczenia; d) niewłaściwym znaku oszacowanych cen dóbr publicznych; e) niespójnych wynikach, które nie są zgodne z prawem zachowania masy; f) braku związku pomiędzy nakładami zanieczyszczającymi a generowanymi przez nie niepożądanymi efektami (wszystkie nakłady generują wszystkie efekty); g) niemonotoniczności w niepożądanych efektach; h) błędnej klasyfikacji stanu efektywności (firmy silnie zdominowane mogą wydawać się efektywne); i) silnie zdominowanych celach projekcyjnych (niektóre wyniki efektywności mogą być obliczane w relacji do silnie zdominowanych obserwacji użytych jako punkty odniesienia); j) naruszeniu praw termodynamiki; k) możliwości generowania zerowych zanieczyszczeń przy zastosowaniu technologii redukujących (Dakpo i in., 2016).

Z powyższej krytyki wyłoniły się dwie kolejne metody. Nowszą i bardziej popularną wśród nich, w przypadku rolnictwa, było podejście uwzględniające efekty uboczne (ang. *by-production*). Zostało ono rozwinięte i spopularyzowane w pracy



not need a common unit to aggregate inputs and outputs. However, some problems may arise in the application of this method. Firstly, by-production technology is, in theory, an intersection of two sub-technologies. However, in practice this intersection may not exist and both sub-technologies may be independent. This leads to different optimal levels of inputs regarding desirable and undesirable output generation. Secondly, a division into polluting and non-polluting inputs must be done a priori and can be perceived arbitral.

To introduce the laws of thermodynamics into efficiency assessment a material balance principle was proposed by Coelli et al. (2007). It refers to the rule that the amount of materials accumulated in inputs must be equal to the materials embedded in the outputs plus residuals, which are considered here as undesirable outputs. The model minimizes the levels of undesirable outputs and the problem is solved similarly to a cost minimization program using the mass balance equation. Information on the material content of inputs and outputs is treated here similarly to prices in the cost minimization model. Unfortunately, also this approach suffers from a serious drawbacks. Firstly, information on material content of inputs and outputs may be hard to obtain. Secondly, those values are not homogenous among DMU due to external factors. Thirdly, in the presence of abatement strategies, the amount of pollution reduction due to abatement investment has to be clearly incorporated in the balance equation. Fourthly, the method requires all the variables to be measured in a common unit, which may be difficult or impossible for some inputs, e.g., expressing labor input in nitrogen equivalent (Dakpo et al., 2016).

Murty i in. (2012). Idea tego podejścia polega na tym, że pożądane i niepożądane efekty są modelowane na oddzielnych granicach produkcji. Również nakłady dzielone są na zanieczyszczające i zanieczyszczające. W przypadku tych drugich założenie o swobodnej dyspozycyjności zostaje ograniczone, ponieważ ich wyższe zużycie implikuje więcej niepożądanych wyników. W rezultacie pozycja DMU jest porównywana z dwoma granicami i otrzymuje się dwa wyniki efektywności, które są dalej agregowane. Do zastosowania tej metody najczęściej stosowano DDF. Jak stwierdzają Dakpo i in. (2016), metoda ta jest zgodna z prawami termodynamiki i nie potrzebuje wspólnej jednostki do agregacji nakładów i efektów. Jednakże przy jej zastosowaniu mogą pojawić się pewne problemy. Po pierwsze, technologia produkcji ubocznej jest w teorii przecięciem dwóch subtechnologii. Jednak w praktyce to przecięcie może nie istnieć i obie subtechnologie mogą być niezależne. Prowadzi to do różnych optymalnych poziomów nakładów przy generowaniu pożądanych i niepożądanych efektów. Po drugie, podział na nakłady zanieczyszczające i zanieczyszczające musi być dokonany *a priori* i może być postrzegany jako arbitralny.

Aby wprowadzić prawa termodynamiki do oceny efektywności, Coelli i in. (2007) zaproponowali zasadę równowagi materii. Odnosi się ona do zasady, że ilość materii zgromadzona w nakładach musi być równa materii zawartej w efektach plus resztki, które są tu traktowane jako efekty niepożądane. W modelu minimalizuje się poziomy niepożądanych efektów, a problem rozwiązuje się analogicznie do programu minimalizacji kosztów z wykorzystaniem równania bilansu masy. Informacja o zawartości materii w nakładach i efektach jest tu traktowana analogicznie do cen w modelu minimalizacji kosztów. Niestety również to podejście ma poważne wady. Po pierwsze, informacja o zawartości materii w nakładach i efektach może być trudna do uzyskania. Po drugie, wartości te nie są jednorodne dla poszczególnych DMU ze względu na czynniki zewnętrzne. Po trzecie, w przypadku strategii ograniczania emisji kwota redukcji zanieczyszczeń spowodowana inwestycjami w ograniczanie emisji musi być wyraźnie włączona do równania bilansu. Po czwarte, metoda wymaga, aby wszystkie zmienne były mierzone we wspólnej jednostce, podczas gdy dla niektórych nakładów może to być trudne lub niemożliwe, np. wyrażenie nakładów pracy w ekwiwalencie azotu (Dakpo i in., 2016).

Finally, the least popular and sophisticated method includes data transformation. Those models transform undesirable outputs to include them in the model as desirable outputs, which can be strongly disposable. This transformation can be inverse ( $1/x$ ), additive inverse ( $-x$ ) or subtracting the value from an arbitrary vector ( $a-x$ ). In the analyzed sample those transformations were further included into standard BCC, CCR, and SBM models. However, this method is not advisable, as it may lead to implausible substitution possibilities among inputs, since it allows, e.g., for substituting milk for carbon dioxide emissions in efficiency analyses of dairy production. Furthermore, data transformation approaches may provide seriously flawed results in analyses assuming constant returns to scale (Hampf, 2018). Other disadvantages of that methods rely in the transformation of data, which is an artificial process that fails to reflect the production process well. Moreover, the original scale and intervals of transformed or translated data get lost and, in the case of reciprocals, zero observations become the missing values (Manello, 2012).

No less important than the methods of introducing variables describing the environmental impact of agriculture into the model is the choice of variables themselves. To assess this issue a subsample of 100 most recent papers was analyzed thoroughly. The results of this review are summarized in Table 2. Findings correspond to some extent with the review of the methods in Figure 3. Variables were introduced as inputs more often. The only variables which were commonly regarded as undesirable outputs were nitrogen, phosphorus, and potassium surplus (N/P/K) and greenhouse gases emission (GHG). Interestingly, many variables were treated in different models as inputs or outputs. It also reflects the methodological diversity of the paper. Furthermore, it justifies the arguments cited earlier about inconsistencies in modelling pollution-generating technologies.

Wreszcie najmniej popularna i zaawansowana metoda wśród analizowanych obejmuje transformację danych. W podejściu tym przekształca się niepożądane efekty, aby włączyć je do modelu jako pożądane, które mogą być silnie dyspozycyjne. Transformacja ta może mieć charakter odwrotności ( $1/x$ ), liczby przeciwnej ( $-x$ ) lub odjęcia wartości od dowolnego wektora ( $a-x$ ). W analizowanej próbie przetworzone zmienne były dalej włączane do standardowych modeli BCC, CCR i SBM. Metoda ta jest jednak odradzana, ponieważ może prowadzić do niewiarygodnych możliwości substytucji pomiędzy nakładami, gdyż pozwala np. na zastąpienie mleka emisją dwutlenku węgla w analizach efektywności produkcji mleczarskiej. Ponadto podejścia do transformacji danych mogą dostarczyć w znacznym stopniu błędnych wyników w analizach zakładających stałe zwroty do skali (Hampf, 2018). Inna wada tych metod polega na tym, że transformacja danych jest sztucznym procesem, który nie pozwala dobrze odwzorować procesu produkcyjnego. Ponadto oryginalna skala i interwały przekształconych lub przetłumaczonych danych zostają utracone, a w przypadku odwrotności zerowe obserwacje stają się brakującymi wartościami (Manello, 2012).

Nie mniej ważny od metod wprowadzania do modelu zmiennych opisujących wpływ rolnictwa na środowisko jest wybór samych zmiennych. Aby ocenić to zagadnienie, postanowiono poddać głębokiej analizie próbę 100 najnowszych prac. Wyniki tego przeglądu zostały podsumowane w tabeli 2. W pewnym stopniu pokrywają się one z przeglądem metod pokazanych na rysunku 3. Zmienne były częściej wprowadzane jako nakłady. Jedynymi zmiennymi, które powszechnie traktowano jako efekty niepożądane, były nadwyżka azotu, fosforu i potasu (N/P/K) oraz emisja gazów cieplarnianych (GHG). Co ciekawe, wiele zmiennych było traktowanych w różnych modelach jako nakłady lub efekty. Odzwierciedla to również różnorodność metodologiczną prac. Ponadto uzasadnia przytoczone wcześniej argumenty o niekonsekwencji w modelowaniu technologii generujących zanieczyszczenia.

**Table 2.** Environmental inputs and outputs included into models

**Tabela 2.** Nakłady i efekty środowiskowe uwzględnione w modelach

Category / Kategoria	No. of papers / Liczba prac	Variable / Zmienne	Inputs / Nakłady	Outputs / Efekty
Fertilizing / Nawożenie	66	N/P/K surplus / nadwyżka bilansu N/P/K	36	18
		fertilizers usage / zużycie nawozów	12	0
Climate impact / Oddziaływanie na klimat	36	GHG emission / emisja gazów cieplarnianych	14	20
		ozone depletion / niszczenie warstwy ozonowej	2	0
Crop protections / Ochrona roślin	20	pesticide overdose / nadużywanie pestycydów	6	4
		pesticide density / intensywność użycia pestycydów	2	0
		pesticide contamination / zanieczyszczenie pestycydami	5	2
		pesticides use / wykorzystanie pestycydów	1	0
Water footprint / Ślad wodny	19	water / woda	5	0
		water contamination / zanieczyszczenie wody	4	4
		water acidification / zakwaszenie wody	3	0
		water exploitation / eksploatacja wód gruntowych	0	2
		wastewater / ścieki	0	1
Energy usage / Zużycie energii	17	energy / energia	11	0
		energy ratio / saldo energetyczne	5	0
		petrol / paliwa	1	0
Soil / Gleby	10	erosion / erozja	3	0
		soil contamination / zanieczyszczenie	4	2
		salinity impact / zasolenie	0	1
Agricultural practices / Praktyki rolnicze	9	plastic film / użycie folii PCV	8	0
		phytosanitary products / użycie środków fitosanitarnych	1	0
Ecosystem diversity / Różnorodność ekosystemu	6	land use diversity / zróżnicowanie użycia ziemi	4	0
		biodiversity / bioróżnorodność	2	0
Waste / Odpady	6	waste generated / wygenerowane odpady	3	3
Economic inputs / Nakłady ekonomiczne	6	cost of animals / koszt zwierząt	1	0
		depreciation / amortyzacja	4	0
		aggregated cost / zagregowane koszty	1	0
Other / Inne	4	farmers perception / postrzeganie przez rolników	1	0
		abiotic depletion / zużycie abiotyczne	1	0
		human toxicity / toksyczność dla ludzi	2	0
Ocean impact / Wpływ na oceany	2	water turbidity / mętność wody	1	0
		turtle bycatch / przyłów żółwi	0	1

Source: authors' own study based on the Scopus database.

Źródło: opracowanie własne na podstawie bazy Scopus.

Some of the papers were not limited to the environmentally adjusted analysis of agricultural efficiency. The results were often enriched by examining total factor productivity (TFP) and the determinants of efficiency score. In the case of TFP, a prerequisite for this type of analysis is to have access to panel data. Interestingly, 48% of the papers in the sample used such data, but only 16% included TFP analysis. Among them (16 papers), the most commonly used was the basic Malmquist index, introduced by Caves et al. (1982). As it can be noticed, this index is still in use, despite a critique of O'Donnell (2014) who noticed that it is not multiplicatively complete and cannot be used for multilateral comparison. Unfortunately, a similar criticism can be made of the Malmquist–Luenberger index proposed by Chung et al. (1997) to include into analysis undesirable outputs, using directional distance functions. This was also the second most common approach in our sample (five papers). Also the additive Luenberger index (Chambers et al., 1996), used in two other papers, allows only for comparison between consecutive years of analysis. Another two types of indices which appear in the papers under consideration, i.e., Färe–Primont (O'Donnell, 2014) and global Luenberger (Oh, 2010), are free from this problem. Each of them was used in these two papers.

An important issue of efficiency analysis is to find its determinants. This issue was analyzed in 40% of the papers. The most widespread approach was a two-step analysis where in the first step efficiency is calculated and in the second one it is introduced into the model as a response variables. Due to the nature of efficiency score, which takes a values from 0 to 1, special methods were applied. Among them the most common was the Tobit model (17 papers) and the Simar and Wilson (2007) bootstrap regression procedure (14 papers). Other models included statistical tests (5 papers) and ANOVA-type methods (4 papers). In the less common approaches, models like fractional, truncated, and spatial regression, propensity score matching, structural equation modelling or two-stage least square method. Importantly, in the case of stochastic frontier analysis two-step approach is methodically incorrect (Schmidt, 2011). To overcome this issue in the SFA model, the variance of inefficiency component is parametrized with explanatory variables. This approach was implemented in four of the analyzed papers.

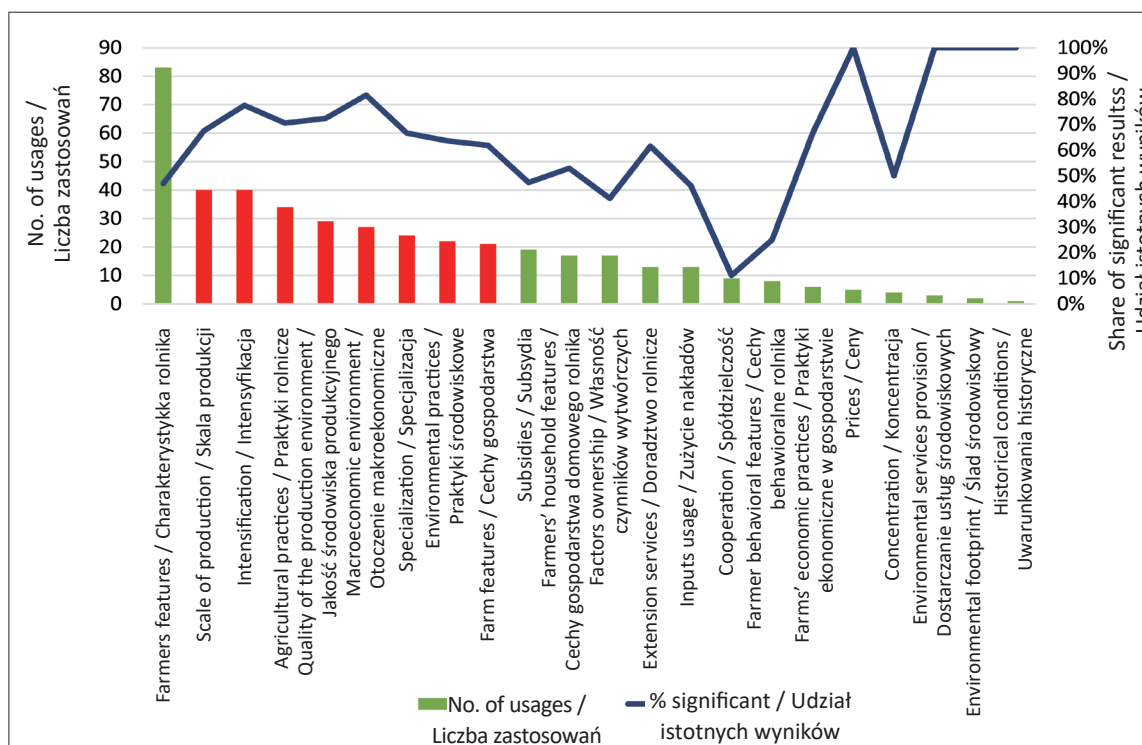
Część prac nie ograniczała się do analizy efektywności rolnictwa uwzględniającej aspekty środowiskowe. Wyniki były często wzbogacane o badanie całkowitej produktywności czynników produkcji (ang. *total factor productivity*, TFP) oraz determinantów efektywności. W przypadku TFP warunkiem koniecznym dla tego typu analiz jest dostęp do danych panelowych. Co ciekawe, 48% prac w próbie korzystało z takich danych, ale tylko 16% zawierało analizę TFP. Wśród nich (16 prac) najczęściej wykorzystywany był podstawowy indeks Malmquista, wprowadzony przez Cavesa i in. (1982). Indeks ten jest nadal używany, pomimo krytyki O'Donnella (2014), który zauważył, że nie jest on multiplikatywnie kompletny i nie może być stosowany do porównań pomiędzy więcej niż dwoma okresami. Niestety podobna krytyka może dotyczyć indeksu Malmquista–Luenbergera, zaproponowanego przez Chunga i in. (1997), w celu włączenia do analizy niepożądanych efektów, wykorzystującego kierunkowe funkcje odległości. Było to również drugie najczęściej stosowane podejście w badanej próbie (pięć prac). Również addytywny indeks Luenbergera (Chambers i in., 1996), zastosowany w dwóch innych pracach, pozwala jedynie na porównanie kolejnych lat analizy. Kolejne dwa rodzaje indeksów, które pojawiają się w analizowanych pracach – Färe–Primonta (O'Donnell, 2014) i globalny Luenbergera (Oh, 2010), są wolne od tego problemu. Każdy z nich został wykorzystany w dwóch pracach.

Ważnym zagadnieniem analizy efektywności jest znalezienie jej determinant. Kwestia ta była analizowana w 40% prac. Najbardziej rozpowszechnionym podejściem była analiza dwuetapowa, gdzie efektywność jest obliczana w pierwszym kroku, a w drugim wprowadzana do modelu jako zmienna. Ze względu na charakter wskaźnika efektywności, który przyjmuje wartości od 0 do 1, stosowano specjalne metody. Wśród nich najczęściej model tobitowy (17 prac) oraz procedurę regresji bootstrapowej Simara i Wilsona (2007) (14 prac). Inne z wykorzystanych metod to testy statystyczne (pięć prac) i analiza wariancji (ANOVA) (cztery prace). W mniej popularnych podejściach pojawiły się takie modele, jak regresja frakcyjna, okrojona (ang. *truncated*) i przestrzenna, ang. *propensity score matching*, modelowanie równań strukturalnych czy dwustopniowa metoda najmniejszych kwadratów. Co ważne, w przypadku stochastycznej analizy granicznej podejście dwustopniowe jest metodycznie niepoprawne (Schmidt, 2011). Aby przezwyciężyć ten problem, w modelu SFA wariancja składnika nieefektywności jest parametryzowana zmiennymi objaśniającymi. Takie podejście zostało zaimplementowane w czterech z analizowanych prac.



Figure 4. Determinants of the environmentally adjusted agricultural efficiency

Rysunek 4. Determinanty efektywności rolnictwa dostosowanej do warunków środowiskowych



Source: authors' own study based on the Scopus database.

Źródło: opracowanie własne na podstawie bazy Scopus.

Figure 4 presents the determinants used to explain differences in environmentally adjusted agricultural efficiency. The authors usually referred to farmer features, such as education, age, experience, and gender. However, those variables were not so often significant (only 47% of the cases). The most interesting are the variables which appear relatively often in the studies and which are significant in most of the cases. These are represented by the red bars in Figure 4. The examples of the variables in those groups are as follows:

- scale of production – land area, number of animals;
- intensification – stocking density, inputs per ha;
- agricultural practices – irrigation, crop rotation, multicropping;
- quality of the production environment – weather, climate, soil, terrain;
- macroeconomic environment – rural income, GDP from agriculture, urbanization level;
- specialization – off-farm income, share of different types of production;

Jeśli chodzi o determinanty wykorzystywane do wyjaśnienia różnic w skorygowanej środowiskowo efektywności rolnictwa, to zostały one pokazane na rysunku 4. Najczęściej autorzy odnosili się do takich cech rolników jak: wykształcenie, wiek, doświadczenie i płeć. Jednak zmienne te nie były tak często istotne (tylko 47% przypadków). Najbardziej wartościowe są te zmienne, które pojawiają się stosunkowo często w badaniach i są istotne w większości przypadków. Są one reprezentowane przez czerwone słupki na rysunku 4. Przykładami zmiennych z tych grup są:

- skala produkcji – powierzchnia gruntów, liczba zwierząt;
- intensyfikacja – obsada zwierząt, nakłady na ha;
- praktyki rolnicze – nawadnianie, płodozmian, wielokierunkowość w uprawach polowych;
- jakość środowiska produkcyjnego – pogoda, klimat, gleba, ukształtowanie terenu;
- otoczenie makroekonomiczne – dochody na wsi, PKB z rolnictwa, poziom urbanizacji;
- specjalizacja – dochody pozarolnicze, udział różnych rodzajów produkcji;

- environmental practices – agro-environmental schemes, certificate.
- farm features – production type, insurance, distance to infrastructure.

### Conclusions

The article is a systematic literature review of frontier approaches related to environmentally adjusted analysis of agricultural efficiency. After an initial selection, a detailed multi-dimensional analysis of 200 papers (out of 310) was made. The main aim of this review was to identify how efficiency analysis can be enhanced to take into account environmental aspects of agricultural production. The authors distinguished eight main approaches to environmental variables in efficiency analysis. Usually they are introduced as: 1) additional environmental inputs or 2) additional undesirable outputs. Other approaches are: 3) eco-efficiency; 4) life cycle assessment; 5) weak disposability assumption; 6) by-production; 7) material-balance principle, and 8) data transformation. Among them, the most methodologically correct approach appears to be by-production. Furthermore, it is possible to point out some trends in the scopes of the analyzed papers:

- most of the studies refer to agriculture in Europe, with a noticeable increasing trend in Asia;
- the most common pattern is research of field crops or milk production in the farm scale, also research at the regional and national levels is strongly represented;
- two of the most common strategies, which include environmental adjustments (in DEA or SFA method) were adding to a typical economic efficiency model new environmentally detrimental inputs and including additional undesirable output in the model;
- among the variables representing environmental impact researchers usually included those referring to fertilizing, climate impact, crop protection, water footprint, and energy usage;
- the most common determinant of environmentally adjusted agricultural efficiency were farmers features. However, usually they were not statistically significant. Variables which were often referred to and mostly significant were: scale of production, intensification, agricultural practices, quality of the production environment, macroeconomic environment, specialization, environmental practices, farm features.

- praktyki środowiskowe – programy rolnośrodowiskowe, certyfikat.
- cechy gospodarstwa – typ produkcji, ubezpieczenia, odległość do infrastruktury

### Wnioski

W artykule dokonano systematycznego przeglądu literatury dotyczącej skorygowanej środowiskowo analizy efektywności rolnictwa, przeprowadzonej metodami granicznymi. Po wstępnej selekcji dokonano szczegółowej wielowymiarowej analizy 200 prac (z 310). Głównym celem przeglądu było określenie, w jaki sposób analiza efektywności może zostać wzbogacona o uwzględnienie środowiskowych aspektów produkcji rolniczej. Wyróżniono osiem głównych podejść do zmiennych środowiskowych w analizie efektywności. Najczęściej są one wprowadzane jako 1) dodatkowe nakłady środowiskowe lub 2) dodatkowe niepożądane efekty. Inne podejścia to: 3) ekoeffektywność; 4) ocena cyklu życia; 5) założenie o słabej dyspozycyjności; 6) produkcja uboczna; 7) zasada równowagi materii oraz 8) transformacja danych. Wśród nich najbardziej poprawne metodologicznie wydaje się być podejście bazujące na produkcji ubocznej. Ponadto można wskazać na pewne tendencje w zakresach analizowanych prac:

- większość opracowań odnosi się do rolnictwa w Europie, z zauważalnym rosnącym zainteresowaniem krajami azjatyckimi;
- najczęściej bada się uprawy polowe lub produkcję mleka w skali gospodarstwa, silnie reprezentowane są również badania na poziomie regionalnym i krajowym;
- dwiema najczęściej stosowanymi strategiami, które obejmują korekty środowiskowe (w metodzie DEA lub SFA), było dodanie do typowego modelu efektywności ekonomicznej nowych, szkodliwych dla środowiska, nakładów oraz włączenie do modelu dodatkowych i niepożądanych efektów;
- wśród zmiennych reprezentujących wpływ na środowisko najczęściej badacze uwzględniali te odnoszące się do nawożenia, oddziaływania na klimat, ochrony upraw, śladu wodnego i zużycia energii;
- najczęstszą determinantą skorygowanej środowiskowo efektywności rolnictwa były cechy rolników. Często nie były one jednak statystycznie istotne. Zmienne, które były często wymieniane i w większości istotne, to: skala produkcji, intensyfikacja, praktyki rolnicze, jakość środowiska produkcyjnego, otoczenie makroekonomiczne, specjalizacja, praktyki środowiskowe i cechy gospodarstwa.

Furthermore, a few research gaps can be identified as potential directions for further studies. Firstly, knowledge about environmentally adjusted agricultural efficiency in Africa and North America is limited. Secondly, studies conducted at the field or local levels are in minority as well as those related to horticultural and animal production other than milk production. Thirdly, the SFA approaches are underdeveloped in comparison with DEA, as well as approaches other than additional inputs/outputs. In particular, the by-production approach seems promising for future analysis provided that the way of linking the economic and environmental functions is developed. Fourthly, limited attention has been paid to soil condition, biodiversity, and waste generation in agriculture, as well as positive externalities provided by the agriculture. Fifthly, an interesting and poorly investigated areas in terms of performance determinants remain farmers' behavioral features.

Finally, regarding the sample of articles identified in this paper a natural follow-up research would be a meta-analysis of determinants or bibliometric analysis of co-citations and keywords. On this basis, further clustering would be possible.

Ponadto jako potencjalne kierunki dalszych badań wskazać można kilka luk badawczych. Po pierwsze, wiedza na temat efektywności rolnictwa uwzględniającej aspekty środowiskowe w Afryce i Ameryce Północnej jest ograniczona. Po drugie, badania prowadzone w skali terenowej i lokalnej są w mniejszości. Podobnie jak badania dotyczące upraw ogrodniczych i produkcji zwierzęcej, innej niż mleko. Po trzecie, podejście SFA jest słabo rozwinięte w porównaniu z DEA, jak również podejściami innymi niż dodatkowe nakłady/efekty. W szczególności podejście bazujące na produkcji ubocznej wydaje się obiecującą drogą dla przyszłych analiz, pod warunkiem, że opracowany zostanie sposób powiązania funkcji gospodarczych i środowiskowych. Po czwarte, niewielkim zainteresowaniem badaczy cieszyły się kwestie środowiskowe takie jak stan gleby, różnorodność biologiczna i wytwarzanie odpadów w rolnictwie, a także pozytywne efekty zewnętrzne zapewniane przez rolnictwo. Po piąte, interesującym i słabo zbadanym obszarem w zakresie determinantów efektywności pozostają cechy behawioralne rolników.

Wreszcie, w odniesieniu do próby artykułów zidentyfikowanych w niniejszej pracy, naturalnym badaniem uzupełniającym byłaby metaanaliza determinant lub analiza bibliometryczna współcytowań i słów kluczowych. Na jej podstawie możliwe byłoby dalsze grupowanie opracowań.

## References

- Banker, R.D., Charnes, A., & Cooper, W.W. (1984). Some Models For Estimating Technical And Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, 30(9), 1078–1092. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>
- Buckwell, A., Uhre, A.N., Williams, A., Poláková, J., Blum, W.E.H., Schiefer, J., Lair, G.J, Heissenhuber, A., Schießl, P., Krämer, C., & Haber W. (2014). *The Sustainable Intensification of European Agriculture*. RISE Foundation. [https://risefoundation.eu/wp-content/uploads/2020/07/2014\\_-\\_SI\\_RISE\\_FULL\\_EN.pdf](https://risefoundation.eu/wp-content/uploads/2020/07/2014_-_SI_RISE_FULL_EN.pdf)
- Caves, D.W., Christensen, L.R., & Diewert, W.E. (1982). Multilateral Comparisons of Output, Input, and Productivity Using Superlative Index Numbers. *The Economic Journal*, 92(365), 73–86. <https://doi.org/10.2307/2232257>
- Chambers, R.G., Chung, Y., & Färe, R. (1996). Benefit and Distance Functions. *Journal of Economic Theory*, 70(2), 407–419. <https://doi.org/10.1006/jeth.1996.0096>
- Charnes, A., Cooper, W.W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Chung, Y.H., Färe, R., & Grosskopf, S. (1997). Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach. *Journal of Environmental Management*, 51(3), 229–240. <https://doi.org/10.1006/jema.1997.0146>
- Coelli, T., Lauwers, L., & Van Huylenbroeck, G. (2007). Environmental Efficiency Measurement and the Materials Balance Condition. *Journal of Productivity Analysis*, 28(1), 3–12. <https://doi.org/10.1007/s1123-007-0052-8>
- Czyżewski, A., & Kulyk, P. (2013). Kwestia rolna w teorii wyboru publicznego. *Roczniki Naukowe Ekonomii Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich*, 100(3), 7–18. [https://sj.wne.sggw.pl/article-RNR\\_2013\\_n3\\_s7/](https://sj.wne.sggw.pl/article-RNR_2013_n3_s7/)
- Czyżewski, A., & Staniszewski J. (2018). Dylematy operacjonalizacji paradygmatu zrównoważonego rozwoju rolnictwa z wykorzystaniem pojęcia ekoelektywności. *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie: Problemy Rolnictwa Światowego*, 18(2), 44–56. <https://doi.org/10.22630/PRS.2018.18.2.33>
- Dakpo, K. H., Jeanneaux, P., & Latruffe, L. (2016). Modelling Pollution-Generating Technologies in Performance Benchmarking: Recent Developments, Limits and Future Prospects in the Nonparametric Framework. *European Journal of Operational Research*, 250(2), 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.024>
- Dakpo, K.H., Jeanneaux, P., & Latruffe, L. (2020). Modelling Pollution-Generating Technologies: A Numerical Comparison of Non-Parametric Approaches. In: J. Aparicio, C. Lovell, J. Pastor, & J. Zhu, (Eds.), *Advances in Efficiency and Productivity II* (pp. 67–85). International Series in Operations Research & Management Science, 287. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-41618-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41618-8_5)
- Emrouznejad, A., & Yang, G.-L. (2018). A Survey and Analysis of the First 40 Years of Scholarly Literature in DEA: 1978–2016. *Socio-Economic Planning Sciences*, 61, 4–8. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.01.008>
- Halkos, G., & Petrou, K.N. (2019). Treating Undesirable Outputs in DEA: A Critical Review. *Economic Analysis and Policy*, 62, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2019.01.005>
- Hampf, B. (2018). Measuring Inefficiency in the Presence of Bad Outputs: Does the Disposability Assumption Matter? *Empirical Economics*, 54(1), 101–127. <https://doi.org/10.1007/s00181-016-1204-3>
- Iribarren, D., Hospido, A., Moreira, M.T., & Feijoo, G. (2011). Benchmarking Environmental and Operational Parameters Through Eco-Efficiency Criteria for Dairy Farms. *Science of the Total Environment*, 409(10), 1786–1798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.02.013>
- Kleijn, D., Kohler, F., Báldi, A., Batáry, P., Concepción, E.D., Clough, Y., Díaz, M., Gabriel, D., Holzschuh, A., Knop, E., Kovács, A., Marshall, E.J.P., Tschamntke, T., & Verhulst, J. (2009). On the Relationship Between Farmland Biodiversity and Land-Use Intensity in Europe. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1658), 903–909. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1509>
- Korhonen, P.J., & Luptacik, M. (2004). Eco-Efficiency Analysis of Power Plants: An Extension of Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, 154(2), 437–446. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00180-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00180-2)
- Krasowicz, S. (2009). Możliwości rozwoju różnych systemów rolniczych w Polsce. *Roczniki Nauk Rolniczych: Seria G*, 96(4), 110–121. [https://sj.wne.sggw.pl/article-RNR\\_2009\\_n4\\_s110/](https://sj.wne.sggw.pl/article-RNR_2009_n4_s110/)
- Krysztofiak, J., & Pawlak, K. (2017). Ekonomiczna dostępność żywności w gospodarstwach domowych krajów Unii Europejskiej. *Zeszyty Naukowe Polskiego Towarzystwa Ekonomicznego w Zielonej Górze*, 4(7), 192–208. <https://doi.org/10.26366/PTE.ZG.2017.110>
- Kulawik, J. (2007). Wybrane aspekty efektywności rolnictwa. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*, 1, 3–16.
- Kuosmanen, T., & Kortelainen, M. (2005). Measuring Eco-Efficiency of Production with Data Envelopment Analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 9(4), 59–72. <https://doi.org/10.1162/108819805775247846>
- Lampkin, N.H., Pearce, B.D., Leake, A.R., Creissen, H., Gerrard, C.L., Girling, R., Lloyd, S., Padel, S., Smith, J., Smith, L.G., Vieweger, A., & Wolfe, M.S. (2015). *The Role of Agroecology in Sustainable Intensification*. Report for the Land Use Policy Group. Organic Research Centre, Elm Farm and Game & Wildlife Conservation Trust. <http://publications.naturalengland.org.uk/file/6602354724962304>



- Lansink, A.O., & Wall, A. (2014). Frontier Models for Evaluating Environmental Efficiency: An Overview. *Economics and Business Letters*, 3(1), 43–50. <https://doi.org/10.17811/ebl.3.1.2014.43-50>
- Manello, A. (2012). *Efficiency and Productivity in Presence of Undesirable Outputs*. [Doctoral thesis, University of Bergamo]. <https://aisberg.unibg.it/bitstream/10446/26695/1/A.Manello%20-%20PhD%20thesis.pdf>
- Matson, P.A, Parton, W.J, Power, A.G., & Swift, M.J. (1997). Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science*, 277(5325), 504–509. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.504>
- Matuszczak, A. (2020). *Ewolucja kwestii agrarnej a środowiskowe dobra publiczne*. IERiGŻ PIB.
- Murty, S., Russell, R.R., & Levkoff, S.B. (2012). On Modeling Pollution-Generating Technologies. *Journal of Environmental Economics and Management*, 64(1), 117–135. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2012.02.005>
- O'Donnell, C.J. (2014). Econometric Estimation of Distance Functions and Associated Measures of Productivity and Efficiency Change. *Journal of Productivity Analysis*, 41(2), 187–200. <https://doi.org/10.1007/s11123-012-0311-1>
- Oh, D.-H. (2010). A Global Malmquist–Luenberger Productivity Index. *Journal of Productivity Analysis*, 34(3), 183–197. <https://doi.org/10.1007/s11123-010-0178-y>
- Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pimentel, D. (2006). Soil Erosion: A Food and Environmental Threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8(1), 119–137. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8>
- Pishgar-Komleh, S.H., Zylowski, T., Rozakis, S., & Kozyra, J. (2020). Efficiency under Different Methods for Incorporating Undesirable Outputs in an LCA+DEA Framework: A Case Study of Winter Wheat Production in Poland. *Journal of Environmental Management*, 260, 110138. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110138>
- Ramil, N.A., & Munisamy, S. (2013). *Modelling Undesirable Factors in Efficiency Measurement Using Data Envelopment Analysis: A Review*.
- Reinhard, S., Lovell, C.A.K., & Thijssen, G. (1999). Econometric Estimation of Technical and Environmental Efficiency: An Application to Dutch Dairy Farms. *American Journal of Agricultural Economics*, 81(1), 44–60. <https://doi.org/10.2307/1244449>
- Reinhard, S., Lovell, C.A.K., & Thijssen, G. (2002). Analysis of Environmental Efficiency Variation. *American Journal of Agricultural Economics*, 84(4), 1054–1065. <https://doi.org/10.1111/1467-8276.00053>
- Schmidt, P. (2011). One-Step and Two-Step Estimation in SFA Models. *Journal of Productivity Analysis*, 36(2), 201–203. <https://doi.org/10.1007/s11123-011-0228-0>
- Simar, L., & Wilson, P.W. (2007). Estimation and Inference in Two-Stage, Semi-Parametric Models of Production Processes. *Journal of Econometrics*, 136(1), 31–64. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2005.07.009>
- Streimikis, J., & Saraji, M.K. (2021). Green Productivity and Undesirable Outputs in Agriculture: A Systematic Review of DEA Approach And Policy Recommendations. *Economic Research / Ekonomska Istraživanja*, 35(1), 819–853. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.1942947>
- Tarnowska, A. (2010). Ekonomiczna dostępność żywności w krajach Unii Europejskiej. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, 12(1), 224–229. <https://rnseria.com/resources/html/article/details?id=171332>
- Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W.H., Simberloff, D., & Swackhamer, D. (2001). Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. *Science*, 292(5515), 281–284. <https://doi.org/10.1126/science.1057544>
- Tittonell, P. (2014). Ecological Intensification of Agriculture – Sustainable by Nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.08.006>
- Tone, K. (2001). A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, 130(3), 498–509. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00407-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00407-5)
- Tscharntke, T., Klein, A.M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., & Thies, C. (2005). Landscape Perspectives on Agricultural Intensification and Biodiversity – Ecosystem Service Management. *Ecology Letters*, 8(8), 783–908. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00782.x>
- Van Huylenbroeck, G., Verbeke, W., & Lauwers, L. (2004). *Role of Institutions in Rural Policies and Agricultural Markets*. Elsevier.
- Zegar, J.S. (2007). Społeczne aspekty zrównoważonego rozwoju rolnictwa. *Fragmenta Agronomica*, 24(4), 282–298. [https://pta.up.poznan.pl/pdf/Fragm.%20Agron.%20vol.%2024%20\(2007\)/37-%20%20FA%2024\(4\)%202007%20-Zegar.pdf](https://pta.up.poznan.pl/pdf/Fragm.%20Agron.%20vol.%2024%20(2007)/37-%20%20FA%2024(4)%202007%20-Zegar.pdf)
- Zegar, J.S. (2018). *Kwestia agrarna w Polsce*. IERiGŻ PIB.

*Submission date / Data nadesłania: 16.11.2022*

*Final review date / Data ostatniej recenzji: 19.12.2022*

*Acceptance date / Data akceptacji: 27.03.2023*

© 2023 Staniszewski, J., & Matuszczak, A. This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Autorskie prawa osobiste: Staniszewski, J. i Matuszczak, A. (2023). Niniejszy artykuł został opublikowany w otwartym dostępie na licencji Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

