
Table of Contents

I.	ACKNOWLEDGEMENTS	2
II.	SUMMARY	3
III.	ZUSAMMENFASSUNG	6
IV.	LIST OF FIGURES	10
V.	LIST OF PUBLICATIONS	11
VI.	ABBREVIATIONS AND ACRONYMS	12
1.	GENERAL INTRODUCTION.....	14
1.1.	GLOBAL FOOD SECURITY STATUS.....	14
1.2.	CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR FOOD PRODUCTION AND ACCESS IN SUB-SAHARAN AFRICA	15
1.3.	FOOD SECURITY SITUATION OF TANZANIA.....	15
1.4.	CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR IMPROVING FOOD SECURITY IN SEMIARID OF TANZANIA	16
1.5.	UPGRADING STRATEGIES FOR ENHANCING AGRICULTURAL PRODUCTION	18
1.6.	POTENTIAL OF CROP MODELLING FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRODUCTION.....	16
1.7.	DESCRIPTION OF THE STUDY SITE	17
1.8.	OUTLINE OF THE THESIS	19
2.	CROP UPGRADING STRATEGIES AND MODELLING FOR RAINFED CEREALS IN A SEMI-ARID CLIMATE—A REVIEW.....	20
3.	ANALYSIS OF INTRA AND INTERSEASONAL RAINFALL VARIABILITY AND ITS EFFECTS ON PEARL MILLET YIELD IN A SEMIARID AGROCLIMATE: SIGNIFICANCE OF SCATTERED FIELDS AND TIED RIDGES.....	46
4.	THE MANAGEMENT STRATEGIES OF PEARL MILLET FARMERS TO COPE WITH SEASONAL RAINFALL VARIABILITY IN A SEMI-ARID AGROCLIMATE.....	64
5.	MODELING RAINFED PEARL MILLET YIELD SENSITIVITY TO ABIOTIC STRESSES IN SEMI-ARID CENTRAL TANZANIA, EASTERN AFRICA.....	81
6.	GENERAL DISCUSSION AND CONCLUSIONS	100
6.1.	OVERVIEW	100
6.2.	SYNTHESIS OF FINDINGS	100
6.3.	LIMITATIONS AND AREAS FOR IMPROVEMENT	104
6.4.	CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	105
7.	REFERENCES.....	106
8.	ANNEX.....	119

Festo Richard Silungwe

Integrating Crop Upgrading Strategies and Modeling for Improving Food Security in Semiarid Sub-Saharan Africa

2020 / 114 Seiten / 29,95 € / ISBN 978-3-89574-977-3

Verlag Dr. Köster, Berlin / www.verlag-koester.de

I. Acknowledgements

Completing a PhD is a life experience; from academic gains, research efforts, publication complications, social and cultural interactions, ups and downs, to networking. I am very grateful for the funding I received from the German Federal Ministry of Agriculture and Food (BMEL) in the form of the PhD program of the Federal Office of Agriculture and Food (BLE). This funding provided me the opportunity to have this life experience.

Through smoothness and hardship, there were people around who encouraged me to persevere and pursue the purpose. Unfortunately, some will not be able to witness the end of the process; to mention just one, my late mother, Sankananji Simbeye Silungwe, who was my hero throughout her life. Apart from her motherly support, she was my inspiration and motivation in education. It was my dream for her to witness this process to the end; unfortunately, God did not allow that to happen as on July 23, 2017, she perished. Although it felt like the world had stopped, there were brave and good people around me who made it possible to move on.

To my supervisors at ZALF – Dr. Frieder Graef, Prof. Dr. Sonoko Dorothea Bellingrath-Kimura (Humboldt Universität zü Berlin), and Dr. Marcos Alberto Lana – I thank you for your huge support throughout the time of my studies. You were with me during concepts build up, field work, writing, and you continue to support me. I am grateful to you. With all my ups and down, you stood with me to these accomplishments.

Additional gratitude is owed to Prof. Dr. Siza Donald Tumbo and Prof. Dr. Fredrick Cassian Kahimba from Sokoine University of Agriculture for their help during stays in Tanzania. To the administrators at ZALF – Annet Jahn, Karin Stahl, Viola Kranich, and Annemarie Winter – thanks for making my life easier. I also thanks Dr. Stefan Sieber, the head of SUSLAND at ZALF, the group that hosted me throughout my PhD studies. To Charles Peter Mgeni, my colleague with whom I started – sharing everything, both highs and lows, tears and laughter – together, what a brother you have become! Thank you very much. For my field work, I owe further thanks to Fadhili Mbaga, Emmanuel Chillagane, Swai Elirehema and farmers. I also thank the entire Trans-SEC team for their support.

Family is at the core of my gratitude: I give thanks to my family, starting with Delfina, my wife. It continues with my children (my boys Godlove and Gian and my only daughter, the face of my mother, Gavrilla); I understand what you had to endure: a father who was not fully at home throughout my studies. Thank you for your understanding; I will work hard to make up for what you have missed.

Finally, I wish I was able to mention and thank everyone here. For those omitted from my explicit list, let it be known that I still thank you, no matter where you are, for helping me to accomplish my work directly or indirectly.

II. Summary

With diverse challenges facing crop production for low income and food insecure farmers in semi-arid environments, generally there are complications when addressing food security. However, despite diverse backgrounds; the most common, critical, factors hindering agricultural production in semiarid Sub-Saharan Africa (SSA) are poor soil fertility and the variation of intraseasonal descriptors of rainfall (including onset dates, cessation dates, number of rainy days, varying intensities, and total seasonal rainfall amounts). Despite being critical throughout SSA, poor understanding and limited documentation regarding poor soils and weather conditions are still pervasive. Comprehensive risk management strategies, referred as crop upgrading strategies (UPSS), that address these challenges must be derived from each respective local context in order to achieve a sustainable future. In this dissertation, UPSS are defined as set of good practices that secure food across local and regional food value chains. Thus, learning from successful UPSS, prioritizing according to their suitability, and testing them with farmers will extend the knowledge of how to reduce risks in crop production in challenging conditions. Knowledge and data acquired from local contexts can be integrated to regional scales through the use of crop models. Crop models, when calibrated and validated for specific crops, provide robust opportunities for UPS optimization under current and future climate change scenarios. In this context, this dissertation comprises four peer-reviewed publications focusing on testing prioritized UPSS with farmers and integrating the respective UPSS in crop modelling to improve food security in semiarid SSA.

Firstly, UPSS and biophysical models for simulating UPSS were identified by reviewing 187 papers from peer-reviewed journals, conferences, and reports discussing UPSS suitable for cereals. Then, the identification of biophysical models that were used to assist in selecting UPSS appropriate for semi-arid areas was carried out. Experts ranked each UPS based on arbitrarily defined criteria, considering the adequacy of each UPS to address the rainfall variability and soil fertility conditions facing farmers. Out of an initial list of 13 UPSS, four highly ranked UPSS were identified as the most promising for improving rainfed cereal production in semi-arid areas for low-income farmers. These UPSS are field scattering, tied ridges, microdose fertilization, and varying sowing/planting dates. Among the different biophysical models identified, three – DSSAT, APSIM and AquaCrop – have studied the four selected UPSS. The frequency of the use of models is an important proxy for their robustness as an instrument for research and decision-making.

Secondly, field experiments were co-conducted with local farmers in Idifu village, in the rural semiarid region of Dodoma, located in central Tanzania. These experiments tested the UPSS and quantified the extent of intra- and inter-seasonal rainfall variability. The positions for installing rain gauges for rainfall quantification were defined using the

K-means clustering algorithm method, then displayed in quantum geographic information system (QGIS) and modified onsite during installation based on site conditions and features. It was found that recorded seasonal rainfall varied significantly among neighbouring fields within a small area, with a distance of less than 200 m between fields, impacting pearl millet yields ("Okoa" variety (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.)). It was also found that variability in daily rainfall amounts across space affects pearl millet yields more than the total seasonal rainfall variability. Nevertheless, scattering fields across space can help farmers avoid the risk of losing an entire season's harvest by enabling farmers to at least harvest crops from locations that received sufficient rain. The use of tied ridges as an infield rainwater harvesting system helps to improve yields more than flat cultivation. This UPS is recommended as a strategy to help farmers reduce yield losses in semiarid areas.

Thirdly, the management strategies used by pearl millet farmers to improve yield and water use efficiency (WUE) in the midst of variable rainfall patterns were evaluated. It is found that variability in the descriptors of seasonal rainfall lead to planning complications for planting operations. Consequently, this causes yield uncertainties for farmers. As rainy season onset varies widely, planting dates also differ, thus affecting yields significantly both within and between seasons. Early onset of the rainy season prompts farmers to start planting early, with a wider planting window, while late onset prompts farmers to plant immediately, concentrating their planting efforts into a narrow window. Early planting resulted in higher yields and WUE values versus normal and late plantings, except when there was excessive rainfall. Microdose fertilization increased both yield and WUE of pearl millet significantly, with a higher effect under tied ridges than under flat cultivation. Although the use of tied ridges with microdosing under early planting was a more effective strategy under spatiotemporal rainfall variability and poor soils, average yields were more stable under normal planting dates. Uncertainty surrounding the optimal planting dates prompts the need to analyze the timing of planting in the future with respect to ongoing climate change and analyze the sensitivity of the cultivated variety of peal millet.

Therefore, the sensitivity of pearl millet yield to abiotic was evaluated for non-fertilized and microdosing conditions. The DSSAT-CERES Millet model was calibrated and validated under rainfed conditions. The model was then used to evaluate the sensitivity of pearl millet cultivation to increased temperature (of 0 to +3.0 °C increments) using nine different planting dates ranging from early (December 1st) to late planting windows (February 25th). Additionally, the model was used to evaluate the responses of pearl millet to the effects of a combined scenario with temperature increments and changes in precipitation using the best planting date. The results show that temperature increases affected yields negatively for all planting dates under non-fertilized and microdose plots. Early and late planting windows were more negatively affected than the normal planting window, implying that temperature increases reduce the length of the effective planting window for achieving high yields under both non-fertilized and microdose situations. Farmers are advised to adjust the timing of their

planting, potentially up to 30 days after the onset of rainy season, although plantings during the first 10 days after the onset of the rainy season performed best under all scenarios. The choice of planting must be coupled with adopting fertilizer microdosing as a means of reducing production risk due to changes in climate and poor soils. However, the cultivar Okoa, which is now widely cultivated, can only have yield increases with a maximum 1.5°C temperature increase; therefore, breeding and adoption of cultivars that are more heat tolerant should be a focus of future research for preparedness of risks associated with climate change.

This dissertation highlights that combined efforts from field experiments and modelling can help to understand and find solutions for constraints in crop production that currently exist or are anticipated in the future. This will eventually provide opportunities for improving and sustaining food security. Upgrading strategies and modelling complement each other in understanding and addressing crop production challenges at different spatial and temporal scales. It is evident that there are suitable UPSs in existence – or that can be modified in order to be used by low income and food insecure small holder farmers – that reduce risks to pearl millet production under highly variable rainfall patterns and poor soils. The search for these UPSs and any required improvements must be a continuous process conducted by both farmers and scientists, with strong support from governments, non-government organizations, development partners, and policy makers. Further, the extent of spatiotemporal rainfall variability in semiarid regions is severe; however, UPSs, such as scattered fields and tied ridges, have proved their merit in enhancing pearl millet yields. The combination of tied ridges and microdose fertilization creates high expectations for securing good pearl millet yields under a wide range of planting dates; however, the normal planting window (the period up to 30 days after rainy season onset) faces reduced risks of yield loss in semiarid agroclimate. Even in the midst of climate change threats, the DSSAT CERES Millet model finds that the tested variety of pearl millet (“Oko” variety (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.)) has the lowest risk of yield loss under microdose practice when planting is conducted during the normal planting window of around 10 days after rainy season onset. However, extreme temperature increases exceeding +1.5 °C will make the Okoa variety unsuitable for sustaining yield; therefore, to prepare for climate change, breeding varieties tolerant to higher temperatures is recommended.

III. Zusammenfassung

Die Herausforderungen in der Pflanzenproduktion, denen einkommensschwache und mit Ertragsschwankungen wirtschaftende Landwirte in semiariden Gebieten gegenüberstehen, sind vielfältig und führen zu zahlreichen Herausforderungen im Bemühen um die Ernährungssicherung. Die kritischsten Faktoren, die die landwirtschaftliche Produktion im semiariden Subsahara-Afrika (SSA) behindern, sind die mangelnde Bodenfruchtbarkeit und die Variation der intrasaisonalen Niederschläge (einschließlich Beginn und Ende der Regenfälle, Anzahl der Regentage und der damit verbundenen Intensitäten sowie die saisonalen Niederschlagsmengen). Trotz ihres großen Einflusses auf die Erträge sind mangelndes Verständnis dieser Prozesse und ihre begrenzte Dokumentation von Gebieten in SSA, die durch schlechte Böden und Wetterbedingungen ernsthaft gefährdet sind, immer noch allgegenwärtig. Umfassende Risikomanagementstrategien, sogenannte Crop Upgrading-Strategien (UPS), die diese Herausforderungen angehen, müssen aus dem lokalen Kontext abgeleitet werden, um nachhaltige Folgen zu erzielen. In dieser Dissertation werden UPSs als eine Reihe von bewährten Praktiken zur Sicherung der Nahrungsmittelproduktion in lokalen und regionalen Lebensmittelwertschöpfungsketten definiert. Das Lernen von erfolgreichen Strategien, das Priorisieren nach ihrer Eignung und das Testen mit Landwirten erweitern somit das Wissen darüber, wie man Risiken in der Pflanzenproduktion unter schwierigen Bedingungen reduziert. Wissen und Daten aus lokalem Kontext können durch den Einsatz von Pflanzenwachstumsmodellen in regionale Skalen integriert werden. Ertragsmodelle bieten, wenn sie für bestimmte Kulturen kalibriert und validiert werden, eine solide Möglichkeit für die Optimierung der UPSs unter aktuellen und zukünftigen Szenarien des Klimawandels. In diesem Zusammenhang umfasst diese Dissertation vier Peer-Review-Publikationen, die sich auf das Testen von ausgewählten UPSs mit Landwirten und die Integration der jeweiligen Strategien in die Pflanzenmodellierung zur Verbesserung der Ernährungssicherheit im semiariden SSA konzentrieren.

Zunächst wurden UPSs und biophysikalische Modelle zur Simulation von UPSs identifiziert, indem 187 Veröffentlichungen aus peer-reviewed Zeitschriften, Konferenzen und Berichten über für Getreide geeignete Strategien überprüft wurden. Anschließend wurden biophysikalische Modelle identifiziert, die bei der Auswahl von UPSs für semi-aride Gebiete hilfreich waren. Experten bewerteten jede UPS nach definierten Kriterien und berücksichtigten dabei die Eignung jeder UPS, die Niederschlagsvariabilität und die Bodenfruchtbarkeitsbedingungen zu integrieren. Aus einer ersten Liste von 13 UPSs wurden vier hochbewertete UPSs als die vielversprechendsten zur Verbesserung der Getreideproduktion in semi-ariden Gebieten für Landwirte mit niedrigem Einkommen identifiziert. Diese UPSs sind räumliche Verteilung der bewirtschafteten Felder, Anlage von Dammkulturen, Mikrodosisdüngung und unterschiedliche Aussaat-/Pflanzungsdaten. Unter den verschiedenen

biophysikalischen Modellen, die identifiziert wurden, wurden drei - DSSAT, APSIM und AquaCrop – ausgewählt, um die vier ausgewählten UPSs zu untersuchen. Die Häufigkeit der Verwendung von Modellen ist ein wichtiger Indikator für ihre Robustheit als Forschungs- und Entscheidungsinstrument.

Zweitens wurden Feldversuche mit lokalen Bauern im Dorf Idifu, in der ländlichen semiariden Region Dodoma in Zentral-Tansania, durchgeführt, um die UPSs zu testen und das Ausmaß der intra- und intersaisonalen Niederschlagsvariabilität zu quantifizieren. Die Positionen für die Installation von Regensammlern zur Niederschlagsquantifizierung wurden mit dem K-means Clustering-Algorithmus definiert, dann im geografischen Informationssystem (QGIS) dargestellt und schließlich vor Ort während der Installation auf Grundlage der Standortbedingungen und -merkmale modifiziert. Es wurde festgestellt, dass die registrierten saisonalen Niederschläge zwischen den benachbarten Feldern innerhalb eines kleinen Gebietes stark variierten (mit einem Abstand von weniger als 200 m zwischen den Feldern), was sich auf die Erträge von Perlhirse auswirkte ("Okoa"-Sorte (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.)). Es wurde auch festgestellt, dass die Variabilität der täglichen Niederschlagsmengen über den gesamten Raum hinweg die Erträge von Perlhirse stärker beeinflusst, als die gesamte saisonale Niederschlagsvariabilität. Dennoch kann die Streuung von Feldern über den gesamten Raum den Landwirten helfen, das Risiko zu vermeiden, eine ganze Ernte der Saison zu verlieren, indem sie es den Landwirten ermöglichen, zumindest Pflanzen von Standorten zu ernten, die ausreichend Regen erhielten. Die Verwendung der Dammkultur als Regenwassernutzungssystem im Feld trägt dazu bei, die Erträge gegenüber dem konventionellen Anbau zu verbessern. Diese UPS wird als Strategie empfohlen, um Landwirten zu helfen, Ertragsausfälle in semiariden Gebieten zu reduzieren.

Drittens wurden die Bewirtschaftungsstrategien der Perlhirsebauern zur Verbesserung des Ertrages und der Wassernutzungseffizienz (WUE) inmitten unterschiedlicher Niederschlagsmuster bewertet. Es wurde festgestellt, dass Schwankungen in den Parametern der saisonalen Niederschläge zu Planungskomplikationen für den Landwirt führen. Dies führt folglich zu Ertragsunsicherheiten für die Landwirte. Da der Beginn der Regenzeit stark variiert, unterscheiden sich auch die Saattermine, was die Erträge sowohl innerhalb als auch zwischen den Jahreszeiten erheblich beeinflusst. Der frühe Beginn der Regenzeit veranlasst die Landwirte, früh mit der Aussaat zu beginnen, mit einem breiteren zeitlichen Saatfenster, während der späte Beginn die Landwirte veranlasst, sofort zu säen und ihre Saat in einem engen Fenster zu konzentrieren. Frühe Aussaaten führten zu höheren Erträgen und WUE-Werten im Vergleich zu normalen und späten Saatterminen, außer bei übermäßigen Niederschlägen. Die Mikrodosis-Düngung steigerte sowohl den Ertrag als auch den WUE-Wert der Perlhirse signifikant, mit einer höheren Wirkung unter Dammkultur als unter konventionellem Anbau. Obwohl die Verwendung von Dammkultur mit Mikrodosis-Düngung bei frühzeitiger Aussaat eine effektivere Strategie unter raumzeitlichen Niederschlagsvariationen und schlechten Böden war, waren die

durchschnittlichen Erträge unter normalen Aussaatzeiten stabiler. Die Unsicherheit über die optimalen Saattermine erfordert eine Analyse des zukünftigen Saatzeitpunkts im Hinblick auf den fortschreitenden Klimawandel und die Analyse der Empfindlichkeit der angebauten Hirsesorte.

Daher wurde die Sensitivität des Perlhirse Ertrages auf abiotische Faktoren unter nicht gedüngten Bedingungen und Mikrodosis-Düngung bewertet. Das DSSAT-CERES Hirse-Modell wurde kalibriert und unter Regenfeldbaubedingungen validiert. Das Modell wurde dann verwendet, um die Empfindlichkeit des Perlhirseanbaus für erhöhte Temperaturen (in Schritten von 0 bis +3,0 °C) anhand von neun verschiedenen Aussaatzeiträumen zu bewerten, die vom frühen (1. Dezember) bis zum späten Aussattermin (25. Februar) reichen. Zusätzlich wurde das Modell verwendet, um die Reaktionen von Perlhirse auf die Auswirkungen eines kombinierten Szenarios mit stufenweiser Temperaturerhöhung und Niederschlagsänderungen unter Verwendung des optimalen Saattermines zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass Temperaturerhöhungen die Erträge für alle Aussattermine unter ungedüngten Bedingungen und auch der Mikrodosis-Düngung negativ beeinflussen. Frühe und späte Aussaatfenster waren negativer betroffen als das normale Aussaatfenster, was bedeutet, dass Temperaturerhöhungen die Länge des effektiven Aussaatfenster verkürzen, um hohe Erträge sowohl unter ungedüngten als auch unter Mikrodosisbedingungen zu erzielen. Den Landwirten wird empfohlen, den Zeitpunkt ihrer Aussaat anzupassen. Die Aussaat kann bis zu 30 Tage nach Beginn der Regenzeit vorgenommen werden, wobei die Aussaat in den ersten 10 Tagen nach Beginn der Regenzeit in allen Szenarien am besten abschneidet. Die Wahl des Saattermines muss mit der Einführung einer Mikrodüngerdosierung verbunden sein, um das Produktionsrisiko aufgrund von Klimaänderungen und schlechten Böden zu verringern. Die heute weit verbreitete Sorte Okoa kann jedoch nur bis zu einer maximalen Temperaturerhöhung von 1,5°C Ertragsstabilität aufweisen; daher sollte die Züchtung und Einführung hitzetoleranter Sorten ein Schwerpunkt der zukünftigen Forschung zur Vorbereitung auf Risiken im Zusammenhang mit dem Klimawandel sein.

Diese Dissertation hebt hervor, dass gemeinsame Anstrengungen aus Feldversuchen und Modellierung helfen können, Lösungen für Ertragsstabilität in der Pflanzenproduktion zu verstehen und zu finden. Dies wird letztendlich Möglichkeiten zur Verbesserung und Aufrechterhaltung der Ernährungssicherheit bieten. Crop Upgrading-Strategien und Modellierung ergänzen sich gegenseitig, um die Herausforderungen des Pflanzenbaus auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ebenen zu verstehen und anzugehen. Es zeigte sich, dass es geeignete UPSs gibt oder diese modifiziert werden können, um von einkommensschwachen und mit Ertragsschwankungen wirtschaftenden Kleinbauern zur Risikominderung in der Perlhirseproduktion bei stark schwankenden Niederschlagsverhältnissen und schlechten Böden eingesetzt zu werden. Die Suche nach diesen UPSs und allen erforderlichen Verbesserungen muss ein kontinuierlicher Prozess sein, der sowohl von Landwirten als auch von Wissenschaftlern mit starker Unterstützung von Regierungen,

Nichtregierungsorganisationen, Entwicklungspartnern und politischen Entscheidungsträgern durchgeführt wird. Darüber hinaus ist das Ausmaß der raumzeitlichen Niederschlagsvariabilität in semiariden Regionen stark ausgeprägt. UPSs, wie nichtarondierte Felder und Dammkultur, haben sich jedoch zur Ertragssteigerung von Perlhirse bewährt. Die Kombination von Dammkultur und Mikrodosis-Düngung weckt hohe Erwartungen an die Erzielung guter Perlhirserträge unter den unterschiedlichsten Aussaatterminen. Das normale Saatfenster (die Zeit bis zu 30 Tage nach Beginn der Regenzeit) weist ein reduziertes Risiko von Ertragseinbußen im semiariden Agroklima auf. Mit dem DSSAT CERES Hirse-Modell wurde unter simulierten Klimawandelbedingungen modelliert, dass die getestete Perlhirse ("Oko" -Sorte (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.)) das geringste Risiko von Ertragseinbußen unter Mikrodosierungspraxis aufweist, wenn die Aussaat während des normalen Saatfensters von etwa 10 Tagen nach Beginn der Regenzeit durchgeführt wird. Extreme Temperaturerhöhungen über +1,5 °C machen die Oko-Sorte jedoch ungeeignet für die Erzielung eines stabilen Ertrages; daher wird zur Vorbereitung auf den Klimawandel die Züchtung hitzetoleranter Sorten empfohlen.