ETH zürich

ETH Library

Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change

Doctoral Thesis

Author(s):
Rahn, Eric

Publication date:
2018

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000273790

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH NO. 25109

EXPLORING ADAPTATION STRATEGIES OF COFFEE PRODUCTION TO CLIMATE CHANGE

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ERIC RAHN
Msc. in Geography, University of Zurich

born on 24 April 1982
citizen of Heimiswil (BE)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. Ghazoul, examiner
Prof. Dr. K. Giller, co-examiner
Dr. C. Garcia, co-examiner

2018

ABSTRACT

The increase in demand for agricultural products driven by population and economic growth and dietary changes has been met through agricultural intensification, most notably by the green revolution. The way this intensification was achieved came at the cost of several negative environmental and health externalities due to high use of synthetic inputs, water, and conversion of diversified landscapes to monocultures. Consequently, agriculture is one of the main drivers of climate change, while at the same time being most vulnerable to it. Tackling this issue requires a shift in perspective from a production centred agricultural intensification approach to alternative pathways such as sustainable intensification and climate smart agriculture, envisioning agriculture to provide multiple ecosystem services.

Coffee (*Coffea arabica* L.) is particularly vulnerable to climate change. It is a perennial crop, adapted to a narrow climatic niche, while relying on a narrow genetic base and farmed predominantly by smallholder farmers. Climate change impact assessments have relied on statistical niche models that analyse changes in future monthly temperature and precipitation of coffee growing areas, indicating significant investment needs for adaptation to climate change. While some areas will be able to continue in the coffee business, provided adaptation takes place, climate change will render coffee production economically non-viable in other areas. Only few areas are expected to experience a beneficial change. Commonly suggested agronomic adaptation options are the use of improved coffee varieties, management of shade trees and irrigation. Yet, improved understanding is required regarding where, when and how these general adaptation options can contribute to adaptation needs. Responding to these knowledge gaps will require new approaches for climate change impact assessment. These methods need to go beyond analysing monthly temperature and precipitation data and include the ecophysiological response of coffee to the interactive effects of light, temperature, water and atmospheric chemistry. It entails the recognition of genotypic and phenotypic plasticity of coffee as well as facilitative and competitive interactions with shade trees. Such an analysis needs to integrate current knowledge, highlight knowledge gaps and explicitly take into account uncertainty.

The aim of this thesis is to improve our understanding of the coffee (*Coffea arabica* L.) crop's response to climate change and evaluate adaptation options. First, different coffee agro-ecological systems are compared along an elevation gradient in the Mt. Elgon area of Uganda. This provides insights on how coffee farmers adapt to a range of temperature and precipitation conditions and how this affects coffee yield. Second, based on an extensive literature review and an existing process-based coffee model, the interactive effects of climate on coffee yield and the modifying effects of associating coffee with shade trees is explored along two East African mountain slopes, namely Mt. Elgon, Uganda, and Mt. Kilimanjaro, Tanzania. The presented approach aids in providing shade tree recommendations in space and time. Third, the uncer-

tainty in climate change impact assessment with limited calibration data from Cauca, Colombia is explored using Bayesian inference. Coffee model parameter uncertainty is combined with Global Climate Model ensemble uncertainty. Past effects of El Niño-Southern Oscillation are analysed using the calibrated coffee model.

In the first study, I analyse (i) coffee yield as a response to different constellations of intercropped banana and shade tree densities, (ii) shade tree species diversity and (iii) factors influencing farmer' choices of these different vegetation structures along an elevation gradient of 1000 and 2200 m.a.s.l. The results indicated that elevation had a positive effect on coffee yield. At low elevation, coffee yield benefited from increased shading, while no significant effects of vegetation structure were found on higher elevations. Yet, vegetation structure differed greatly along the elevation gradient, with increasing banana densities and decreasing shade tree densities and shade tree diversity at higher elevations. Intercropping densities decreased with socio-economic status of farmers, indicating increased diversification needs with decreasing resource availability. Other factors such as distance to urban markets that co-vary with elevation additionally might influence farmers' choices regarding vegetation structure of coffee agroecosystem.

In the second study, I explore potential responses of the coffee plant to interactions of light, temperature, water and elevated atmospheric carbon dioxide [CO_2] using a process-based coffee model connected to spatially variable soil and climate data. Moreover, the potential for adaptation through shade tree management is explored. The results indicate significant negative effects of increasing temperature on coffee yield at low elevation, whereby elevated [CO_2] could potentially mitigate these negative effects substantially. Shade management proves to be a promising adaptation strategy, yet requiring careful consideration of competitive effects, particularly water competition. Main uncertainties remain regarding impacts of climate change on flowering success, coffee quality and adequate representation of climate extremes.

The third Chapter presents a climate change impact assessment by combining Bayesian parameter estimation of a process-based coffee model with Global Climate Model ensembles and past effects of El Niño-Southern Oscillation for the case of Cajibío, Cauca, Colombia. For model calibration, yield data is usually the only data type widely available. Therefore, by comparing different calibration set-ups I evaluate to what degree yield data alone is appropriate to constrain the coffee model. The results indicated that when combining coffee model parameter uncertainty and climate change uncertainty, yield data is of great value to explore plausible impacts of future climate change impacts. Running the calibrated model using past climate data allows to improve our understanding of potential impacts of interannual climate variability. I discuss ways to improve uncertainty assessment and representation of climate variability.

ZUSAMMENFASSUNG

Der steigende Bedarf an landwirtschaftlichen Gütern wurde vor allem durch das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum bestimmt und durch die landwirtschaftliche Intensivierung ermöglicht, wobei die Grüne Revolution entscheidend war. Diese Intensivierung erfolgte auf Kosten negativer Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen aufgrund des hohen Einsatzes synthetischer Düngemittel und Pestiziden, hohen Wasserverbrauchs und der Ersetzung biologischer Vielfalt durch Monokulturen. Infolgedessen, ist die Landwirtschaft einer der grössten Verursacher des Klimawandels, gleichzeitig jedoch auch am meisten davon betroffen. Um dieser Problematik entgegenzusetzen ist ein Perspektivenwandel notwendig, welche die produktionszentrierte Intensivierung mit alternativen Lösungsansätzen der nachhaltigen Intensivierung und klimaintelligenten Landwirtschaft ersetzt, wobei nicht nur die Erträge, sondern mehrere Ökosystemdienstleisungen gleichzeitig verbessert werden.

Für die Kulturpflanze Kaffee (*Coffea arabica* L.) ist der Klimawandel eine besondere Herausforderung. Kafee ist eine mehrjährige Pflanze, angepasst an eine schmale ökologische Nische, mit einer schmalen genetischen Basis und mehrheitlich von Kleinbauern angepflanzt. Forschungsstudien haben die vom Klimawandel verändernden Temperatur- und Niederschlagsbedingungen der Kaffeeanbaugebiete mittels statistischer Methoden analysiert und kamen zum Schluss, dass für viele Anbaugebiete grosse Investitionen für die Anpassung notwendig sind. In einigen Gebieten wird der Kaffeeanbau auch trotz Anpassung nicht mehr ökonomisch rentabel sein, während andere Gebiete vom Klimawandel profitieren können. Die meist empfohlenen agronomischen Anpassungsstrategien sind die Verwendung von verbesserten Kaffeevarietäten, Anpassung mittels Schattenbäumen, und die Bewässerung. Es fehlen jedoch konkrete Empfehlungen bezüglich wo und wann diese Anpassungsstrategien notwendig sind und wie diese Umgesetzt werden sollen. Dies erfordert neue Methoden für die Bewertung der Folgen des Klimawandels. Dabei muss der Einfluss der Interaktionen von Licht, Temperatur, Wasser und atmosphärischem Kohlendioxid [CO2] auf die Ökophysiologie der Kaffeepflanze berücksichtigt werden. Zudem bedingt dies das Verständnis von genotypischer und phänotypischer Plastizität der Pflanze sowie Synergie- und Konkurrenzeffekte von Schattenbäumen. Diese Analyse sollte die Integration der wissenschaftlichen Kenntnis, das Aufzeigen von Forschungslücken und die explizite Berücksichtigung von Unsicherheiten ermöglichen.

Das Hauptziel dieser Doktorarbeit ist es zur wissenschaftlichen Kenntnis bezüglich den Auswirkungen des Klimawandels auf die Kaffeepflanze beizutragen und Anpassungsstrategien zu evaluieren. Dafür wurden zuerst verschiedene Produktionssysteme entlang eines Höhengradienten zwischen 1000 und 2200 m.ü.M. verglichen, welche sich vor allem bezüglich ihrer vegetativen Zusammensetzung unterscheiden. Diese Untersuchungen erfolgten in der Mt. Elgon Region in Uganda und ermöglichten Einsichten in die Anpassungsstrategien der Kaffeebauern zu den verschiedenen

Temperatur- und Niederschlagsbedingungen und deren Auswirkungen auf die Kaffeeproduktion. Danach wurde mittels einer umfassenden Literaturrecherche und anhand eines prozess-basierten Kaffee Models die wechselwirkende Beeinflussung des Klimas auf die Produktivität des Kaffees und der Einfluss der Schattenbäume eruiert. Hierfür wurden zwei Ostafrikanische Berghänge gewählt, nämlich Mt. Elgon, Uganda, und Mt. Kilimanjaro, Tansania, um die verschiedenen Klimabedingungen zu vergleichen. Die entwickelte Methode ermöglicht wichtige Erkenntnisse welche für die Bewirtschaftung von Schattenbäumen notwendig sind. Letztlich wurde die Kaskade an Unsicherheiten welche sich bei der Bewertung der Folgen des Klimawandels anhäufen mittels Bayesianischer Inferenz in Kombination mit dem Ensemble der globalen Klimamodelle berechnet. Der Einfluss der El Niño-Southern Oscillation wurde anhand des kalibrierten Kaffeemodels und Klimadaten der letzten 30 Jahre analysiert. Diese Analyse wurde anhand vorhandener Daten aus Cajibío, Cauca, Kolumbien unternommen.

Die erste Studie analysiert (i) wie verschiedene Konstellationen von assoziierten Bananen- und Schattenbaumdichten die Kaffeeerträge beeinflussen, (ii) die Diversität von Schattenbäumen und (iii) Faktoren welche die Entscheidungen der Bauern beeinflussen bezüglich Vegetationsstruktur der Agrarökosysteme. Der Kaffeeertrag stieg mit der Höhenlage an und wurde an tiefen Höhenlagen von erhöhtem Schatten begünstigt. Auf anderen Höhenlagen konnten jedoch keine signifikanten Effekte der Vegetationsstruktur ausgemacht werden. Entlang des Höhengradienten veränderte sich die Vegetationsstruktur markant, mit erhöhten Bananendichten und reduzierten Schattenbaumdichten mit steigender Höhe. Ärmere Bauern hatten tendenziell höhere Dichten an Bananen und Schattenbäumen in ihren Kaffeefeldern, was auf höhere Diversifizierungsbedürfnisse hinweist um die Ernährungssicherheit zu gewährleisten. Weitere Faktoren welche sich mit der Höhenlage verändern, wie die Distanz zu urbanen Märkten, tragen zusätzlich zur Entscheidungsfindung der Bauern bezüglich Vegetationsstruktur des Kaffee-Agrarökosystems bei.

In einer zweiten Studie wurden die sich wechselseitig beeinflussenden Effekte von Licht, Temperatur, Wasser und erhöhtem [CO2] auf die Kaffeeeträge mittels eines prozess-basierten Modells untersucht. Das Modell wurde mit räumlich variablen Klima- und Bodendaten verknüpft um Erkenntnisse über räumlich explizite Anpassungsmöglichkeiten an den Klimawandel mittels Schattenbäumen zu erlangen. Die Resultate weisen auf markant negative Auswirkungen von Temperaturanstieg auf den Kaffeeertrag tiefer Höhenlagen hin, zeigen aber auch das Potenzial von erhöhtem [CO2] diesem negativen Effekt entgegen zu wirken. Die Bewirtschaftung von Schattenbäumen erweist sich als vielversprechende Anpassungsstragie, jedoch müssen die Konkurrenzeffekte, vor allem die Konkurrenz um Wasser, sorgfältig beurteilt werden. Die wichtigsten Unsicherheiten welchen mehr Forschung gewidmet werden muss ist der Effekt des Klimawandels auf den Kaffeeblüherfolg, die Kaffeequalität und verbesserte Evaluierung der Auswirkungen von Klimaextremen.

Die dritte Studie ermittelte die Folgen des Klimawandels für den Kaffeeanbau mittels Bayesianischer Parameterschätzung des prozess-basierten Kaffeemodels ver-

knüpft mit dem Ensemble von globalen Klimamodellen und vergangener Auswirkungen des El Niño-Southern Oscillation für den Fall von Cajibío, Cauca, Kolumbien. Für die Kalibrierung des Modells stehen grösstenteils nur Ertragsdaten zur Verfügung, weshalb verschiedene Kalibrationskonfigurationen getestet wurden um herauszufinden ob Ertragsdaten alleine genügen um Modellparameter zu schätzen. Die Resultate zeigen auf, dass die Kalibrierung mit nur Ertragsdaten genügen, wenn die Unsicherheiten der Kaffeemodellparameter und die Klimaunsicherheiten kombiniert werden. Zudem erweist sich die Simulation mit vergangen Klimadaten als nützlich um die Auswirkung von interannuellen Klimavariabilität zu untersuchen. Schliesslich diskutiere ich Optionen um die Unsicherheitsanalyse und die Darstellung von Klimavariabiliät zu verbessern.