

Waldkonversion und Bodendegradation im tropischen Tiefland von Ostbolivien

GIS-gestützte Analyse zur Regionalisierung der Bodendegradation im Department Santa Cruz

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten

der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Jens-Peter Krüger

aus Hamburg

Göttingen 2005

D 7

Referentin/Referent: Prof. Dr. Gerhard Gerold

Korreferentin/Korreferent: Prof. Dr. Bernd Cyffka

Tag der mündlichen Prüfung: 20.01.2006

EcoRegio

herausgegeben von
Prof. Dr. Gerhard Gerold
Geographisches Institut
der Universität Göttingen

Band 17

Jens-Peter Krüger

Waldkonversion und Bodendegradation im tropischen Tiefland von Ostbolivien

GIS-gestützte Analyse zur Regionalisierung
der Bodendegradation im Department Santa Cruz

D 7 (Diss. Universität Göttingen)

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5154-5

ISBN-13: 978-3-8322-5154-3

ISSN 1612-5894

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Waldkonversion in den Tropen, wie auch die globale Entwicklung der Bodendegradation, ist nach wie vor ein international bedeutsames Thema im Rahmen der Ressourcendegradation und Entwicklung nachhaltiger Ressourcennutzungssysteme. Während auf Farm- und Plot-Ebene eine Vielzahl von Untersuchungen in tropischen Entwicklungsländern zu Bodendegradationsprozessen und der Anwendung nachhaltiger Nutzungssysteme existieren, fehlt es in den diesen Ländern an Bewertungs- und Monitoringsystemen, die auf der Grundlage meist schlechter Basisdaten quantitativ räumlich explizite Verfahren zur Prognose und Abschätzung von Degradationsprozessen ermöglichen.

Der Oriente im tropischen Tiefland von Bolivien gehört seit 20 Jahren zu einer Regionen mit sehr hohen Waldkonversionsraten durch die Agrarkolonisation. Der „Sojaboom“ auf dem Weltmarkt und die Infrastrukturerschließung über ein Weltbankprojekt im Departament Santa Cruz führte zu einer agroindustriellen Umwandlung der seitens der Biodiversität wertvollen wechselfeuchten Regen- und Trockenwaldformationen in der Alluvialebene zwischen dem Andenrand und dem brasilianischen Schild. Mit Hilfe detaillierter „*change detection*“ Analyse über Satellitenbilder sowie umfangreicher Auswertung lokaler unveröffentlichter Bodendatenquellen, wird in der Dissertation sowohl die zeitliche Entwicklung der Waldkonversion mit ihren Ursachen und zukünftiger Tendenz aufgezeigt, wie auch ein GIS-gestütztes Prognosemodell zur Bodendegradierung erarbeitet. Dabei werden die Prozesse Bodenverdichtung, Humusschwund und Winderosion behandelt und explizit (parzellenscharf) die Bodendegradationszustände ermittelt.

Methodisch waren dafür zahlreiche innovative Arbeiten, mit einer Verknüpfung unterschiedlicher Datenebenen von Satellitenbildern, DGM aus SRTM-Daten, Klimadaten und Bodendaten erforderlich. In der Arbeit wurden Regionalisierungsalgorithmen für Bodeneigenschaften mit der Anwendung von Degradationsszenarien mit metrischen Prognosevariablen für organische Substanz, Gesamtstickstoffgehalt und Lagerungsdichte entwickelt. Damit konnten neuartig Aussagen zu potenziellen Änderungen von Bodenparametern infolge der Landnutzungsdauer getroffen werden.

Das GIS-gestützte Methodeninstrumentarium ist auch in anderen tropisch-subtropischen Regionen anwendbar und kann für eine bessere Abschätzung der Bodendegradationsrisiken auf regionaler Skala bei annuellen Kulturen mit mechanisiertem Anbau eingesetzt werden.

Für Bolivien ist die Entwicklung und Diffusion humusschonender Anbautechniken in den jüngeren Agrarkolonisationsgebieten ein dringendes Entwicklungsziel, um nicht fortlaufend in den nächsten 10-20 Jahren ehemals produktive Böden in enormen Flächenausmaßen durch Bodendegradation zu verlieren. Die internationale Entwicklungspolitik sollte dafür verstärkte Hilfsprogramme, wie auch Auflagen im Rahmen ihrer Projektförderung für eines der ärmsten Entwicklungsländer Lateinamerikas fördern.

Gerhard Gerold
Göttingen, April 2006

GLIEDERUNG

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Anhangsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Problemanalyse.....	3
1.2 Zielsetzung	6
1.3 Forschungsstand	7
2. Das Untersuchungsgebiet.....	13
2.1 Einführung	13
2.2 Naturräumliche Ausstattung	15
2.2.1 Klima	15
2.2.2 Geologie, Geomorphologie	17
2.2.3 Böden.....	18
2.2.4 Natürliche Vegetation.....	22
2.3 Landnutzung	24
2.3.1 Historische Entwicklung	24
2.3.2 Landnutzungssysteme und aktuelle Landnutzung.....	27
3. Datengrundlage und Methodik	33
3.1 Satellitendaten	34
3.2 Ableitung von Bodendaten	36
3.3 Ableitung von Reliefparametern	42
3.4 Ableitung von Klimaparametern	44
4. Waldkonversion	47
4.1 Waldkonversion im bolivianischen Tiefland.....	47
4.2 Waldkonversion im Untersuchungsgebiet.....	48
4.2.1 Multispektrale Klassifikation	50
4.2.2 Ableitung der Landnutzungssysteme	55
4.2.3 Entwicklung der Waldkonversion	55
4.2.4 Anteil der Produzentengruppen an der Waldkonversion.....	63
4.2.5 Entwicklung der Landwirtschaftsflächen im Untersuchungsgebiet	66
4.2.5.1 Generalisierung der Landwirtschaftsflächen und Ableitung von Bewirtschaftungsperioden	67
4.2.6 Zusammenfassung	69
5. Bodendegradation.....	71
5.1 Bodendegradation im ostbolivianischen Tiefland	71
5.1.1 Regionalisierung von Bodeneigenschaften	74
5.1.1.2 Zusammenfassung	78

5.1.2 Änderung von SOC und N _t unter ackerbaulicher Nutzung in den Tropen und Subtropen	78
5.1.2.1 Ableitung relativer SOC und N _t -Verluste - Literaturreview	81
5.1.2.2 Ableitung initialer SOC- und N _t -Gehalte im Untersuchungsgebiet	87
5.1.2.3 SOC- und N _t -Verluste im Untersuchungsgebiet - regionale Analyse	89
5.1.2.4 Zusammenfassung	94
5.1.3 Änderung der Lagerungsdichte unter ackerbaulicher Nutzung	94
5.1.3.1 Ableitung initialer Lagerungsdichten im Untersuchungsgebiet	99
5.1.3.2 Bodenverdichtung im Untersuchungsgebiet - regionale Analyse	100
5.1.3.3 Zusammenfassung	106
5.1.4 Bodenerosionsgefährdung durch Wind	106
5.1.4.1 Windverhältnisse im Untersuchungsgebiet	109
5.1.4.2 Erosivität der Winde	112
5.1.4.3 Erodibilität des Bodens	115
5.1.4.4 Einfluss des Landnutzungssystems	119
5.1.4.5 Zusammenfassung	123
6. Diskussion und Ausblick	125
7. Zusammenfassung	137
Abstract	141
Resumen	144
Literaturverzeichnis	148
Kartenverzeichnis	172
Anhang	174

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Potenzielle Auswirkungen landwirtschaftlicher Bodenbearbeitung	2
Abb. 2.1: Lage des Department Santa Cruz innerhalb Boliviens.....	13
Abb. 2.2: Lage des Untersuchungsgebietes	14
Abb. 3: Klimadiagramme der Stationen San Juan de Yapacani, Santa Cruz und Armando Gomez	15
Abb. 4: Mittlere Korngrößenzusammensetzung der Böden im Untersuchungsgebiet.....	19
Abb. 5: Verbreitung der natürlichen Vegetation im Department Santa Cruz.....	23
Abb. 6.1: Entwicklung des Sojabohnenanbaus im Department Santa Cruz von 1972 bis 2002	25
Abb. 6.2: Luftbilddaufnahmen landwirtschaftlicher Betriebssysteme im Department Santa Cruz	30
Abb. 7: Schema der Vorgehensweise.....	33
Abb. 8: Räumliche Anordnung der Landsat Szenen (WRS Kombination) im Department Santa Cruz	35
Abb. 9: Sekundäre Reliefparameter	43
Abb. 10: Klimavariablen Niederschlag, Temperatur, Strahlung.....	45
Abb. 11: Landnutzung und Vegetation 2001, basierend auf Klassifikation von Landsat 7-ETM+ Daten.....	53
Abb. 12: Erscheinungsmuster der Landnutzungssysteme im Landsat-7 ETM+ Bild.....	54
Abb. 13: Waldkonversion 1984-2001, basierend auf Klassifikation von Landsat 4, 5 TM und 7 ETM+ Daten.....	56
Abb. 14: Zunahme der Rodungsfläche im Untersuchungsgebiet 1984-2001	57
Abb. 15: Verteilung der Landnutzungssysteme 2001	61
Abb. 16: Entwicklung der Produktionsfläche für Sommersoja in den 1990er Jahren nach Produzenten.....	64
Abb. 17: Expansion landwirtschaftlicher Nutzflächen nach Produzenten 1984-2001.....	64
Abb. 18: Anteil an Sekundärwäldern in den Gebieten der verschiedenen Produzenten.....	65
Abb. 19: Streudiagramm der gemessenen und regionalisierten Sand- und Schluffgehalte im Oberboden	76
Abb. 20: regionalisierte Bodenarten und DGM des Untersuchungsgebiets	77
Abb. 21: relative SOC- und N _t -Verluste (Vorräte) in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer (Oberboden)	86
Abb. 22: Boxplots der SOC- und N _t -Ausgangsgehalte nach Regionen	88
Abb. 23: Boxplots der SOC- und N _t -Ausgangsgehalte in Abhängigkeit vom Tongehalt.....	88
Abb. 24: Mittlere SOC- und N _t -Vorräte in den Oberböden von Ackerflächen 2001	93
Abb. 25: Boxplots der initialen Lagerungsdichten in Abhängigkeit von der Bodenart (Oberboden)	99
Abb. 26: Lagerungsdichten, ab denen Einschränkungen im Wurzelwachstum auftreten....	102
Abb. 27: Mittlere Lagerungsdichten im Oberboden von Ackerflächen 2001	105
Abb. 28: Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit zur Erosion von Bodenpartikeln in 15 cm Höhe	107
Abb. 29: Winderosionsereignisse im südlichen Untersuchungsgebiet (05.09.2002).....	108
Abb. 30: Vorherrschende Windrichtungen im Untersuchungsgebiet	110
Abb. 31: Monatliche Tagesmaxima der Windgeschwindigkeit 1980.....	111
Abb. 32: Windprofile bei unterschiedlicher Bodenrauigkeit	112
Abb. 33: Berechnete Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit in % nach Rayleigh 14	

Abb. 34: Kurvenfit nach dem Algorithmus von FREDLUND et al. (2000) für sandige Lehme	116
Abb. 35: Einfluss von Textur, SOM-Gehalt und Aggregation sandiger Lehme auf die Erodibilität.....	118
Abb. 36: Einfluss von Textur, SOM-Gehalt und Aggregation sandiger Lehme auf die Erodibilität.....	119
Abb. 37: Potenzielles Winderosionsrisiko auf Grundlage der Bodenart und der Topographie	121
Abb. 38: Windschutzstreifen in der Mennonitenkolonie Riva Palacios	122
Abb. 39: Beziehung zwischen jährlichem Niederschlag (Station El Trompillo, Santa Cruz) und Southern Oscillation Index (SOI).....	127
Abb. 40: Häufigkeiten extrem trockener bzw. extrem feuchter Jahre (Station El Trompillo, Santa Cruz).....	128
Abb. 41: Änderung des SOC-Vorrats nach Umstellung von konventioneller auf reduzierte Bodenbearbeitung (0-20 cm).....	131

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Statistische Parameter verschiedener Klimastationen im Department Santa Cruz..	16
Tab. 2: Regionale Einordnung bodenchemischer Parameter in Ostbolivien.....	20
Tab. 3: Anbauflächenentwicklung (in ha) der wichtigsten landwirtschaftlichen Produkte im Department Santa Cruz (1985-2002)	26
Tab. 4: Verteilung der Landnutzung im Department Santa Cruz.....	31
Tab. 5: Verwendete Satellitenbildszenen	34
Tab. 6: Verwendete Profilbeschreibungen der Bodendatenbank	37
Tab. 7: Korngrößenklassen nach USDA/FAO und AG Boden	38
Tab. 8: Korrelationsmatrix Oberbodenparameter unter natürlicher Vegetation.....	39
Tab. 9: Korrelationsmatrix Oberbodenparameter unter landwirtschaftlicher Nutzung.....	39
Tab. 10: Waldkonversion in Bolivien.....	49
Tab. 11: Flächenanteil der Landbedeckungsklassen (Untersuchungsgebiet).....	58
Tab. 12: Veränderung des Flächenanteils der Landbedeckungsklassen (Untersuchungsgebiet)	58
Tab. 13: Entwaldungsrate (Untersuchungsgebiet).....	58
Tab. 14: Flächenanteil der Landbedeckungsklassen (nördliches Untersuchungsgebiet, WRS-2 230/72)	59
Tab. 15: Veränderung des Flächenanteils der Landbedeckungsklassen (nördliches Untersuchungsgebiet, WRS-2 230/72).....	59
Tab. 16: Entwaldungsrate (nördliches Untersuchungsgebiet, WRS-2 230-72).....	59
Tab. 17: Flächenanteil der Landbedeckungsklassen (südliches Untersuchungsgebiet, WRS-2 230/73)	60
Tab. 18: Veränderung des Flächenanteils der Landbedeckungsklassen (südliches Untersuchungsgebiet, WRS-2 230/73).....	60
Tab. 19: Entwaldungsrate (südliches Untersuchungsgebiet, WRS-2 230-73)	60
Tab. 20: Änderung der Klassenanteile an der Landnutzungsfläche 1984-2001 in [%].....	61
Tab. 21: Flächenanteile der Produzentengruppen an der Landnutzungsfläche 1984-2001....	62
Tab. 22: Flächenanteile der Produzentengruppen an der Rodung 1984-2001	63

Tab. 23:	Hauptsächliche Entwicklungen landwirtschaftlicher Nutzflächen im Zeitraum 1984-2001	67
Tab. 24:	Einteilung der Bewirtschaftungsperioden	68
Tab. 25:	Korrelationskoeffizienten [r] von Klima- und Reliefparametern mit Oberbodenvariablen unter natürlicher Vegetation	74
Tab. 26:	SOC- und N _t -Verluste im Oberboden nach Konversion natürlicher Vegetation in eine ackerbauliche Nutzung im tropischen Tiefland von Ostbolivien	80
Tab. 27:	Mittlere prozentuale Rückgänge der SOC- und N _t -Gehalte unter moderner und traditioneller Bewirtschaftung nach mehr als 10 Jahren (10-70 a) kontinuierlicher Nutzung (Oberboden).....	81
Tab. 28:	Korrelationsmatrix von Gesamtverlusten und jährlicher Raten für SOC und N _t aller analysierten Studien (Oberboden).....	83
Tab. 29:	Relative SOC- und N _t -Verluste in Abhängigkeit von Nutzungsdauer und Tongehalt (Oberboden)	85
Tab. 30:	Mittlerer SOC-, SOM- und N _t -Status im Oberboden unter natürlicher Vegetation in Abhängigkeit vom Tongehalt.....	89
Tab. 31:	Mittlere SOC-Verluste im Oberboden in Abhängigkeit von Nutzungsdauer und Tongehalt.....	90
Tab. 32:	Mittlere N _t -Verluste im Oberboden Abhängigkeit von Nutzungsdauer und Tongehalt.....	90
Tab. 33:	Mittlere Gehalte und Vorräte organischer Substanz (SOM) der Anbauflächen 2001	91
Tab. 34:	Einordnung der Bodenvorräte organischer Substanz	92
Tab. 35:	Veränderung von Lagerungsdichte und Porenvolumen unter kontinuierlichem Ackerbau im Untersuchungsraum	98
Tab. 36:	Allgemeine Beziehung zwischen Lagerungsdichte und Wurzelwachstum auf Grundlage der Bodenart	100
Tab. 37:	Ausgangsniveau und mittlere Veränderung von Lagerungsdichte und Porenvolumen durch mechanische Bodenbearbeitung.....	101
Tab. 38:	Deskriptive Statistik der Windgeschwindigkeiten (Monatsmittel in m s ⁻¹)	111
Tab. 39:	Erodibilitätsklassen (K-Faktor).....	117
Tab. 40:	Korrelationskoeffizienten des K-Faktors mit SOM-Gehalt, Aggregation und Textur	118
Tab. 41:	Jährliche Abholzungsraten in ausgewählten tropischen Regionen mit hoher Waldkonversion	126

Anhangsverzeichnis

Tab. A1:	Richtwerte chemischer Bodeneigenschaften nach CIAT	174
Tab. A2:	Technische Daten der verwendeten Landsat Satellitenbilder	174
Tab. A3:	Fehlermatrizen (<i>confusion matrix</i>) der Satellitenbildanalyse (Maximum-Likelihood, ML)	174
Tab. A4:	Anbaukalender der Hauptanbaufürchte im Department Santa Cruz.....	176
Tab. A5:	Allgemeine Beschreibung der Standorte und relative Abnahme von Bodenkohlenstoff (SOC) und Bodenstickstoff (N _t) nach Konversion natürlicher Vegetation in landwirtschaftliche Kulturlächen der durchgesehenen Studien (Literaturreview)	177

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen von Programmen und Institutionen

ASSOD	Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation
CIAT	Centro de Investigación Agrícola Tropical
FAN	Fundación Amigos de la Naturaleza
GLASOD	Global Assessment of Soil Degradation
MBAT	Misión Británica en Agricultura Tropical
NRCS	Natural Resources Conservation Service
PLUS	Plan de Uso de Suelo
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (staatlicher Wetterdienst)
SOVEUR	Soil Vulnerability Assessment in Central and Eastern Europe
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

bodenchemische und -physikalische Symbole, chemische Verbindungen

Al	Aluminium
BS	Basensättigung
C	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlendioxid
d _b	Lagerungsdichte
Fe	Eisen
ffS	Feinstsand
fS	Feinsand
fU	Feinschluff
gS	Grobsand
gU	Grobschluff
K	Kalium
KAK	Kationenaustauschkapazität
mS	Mittelsand
N	Stickstoff

N _t	Gesamtstickstoff
P	Phosphor
pH	negativer dekadischer Logarithmus der H ₃ O ⁺ -Ionenkonzentration
SOC	Soil Organic Carbon
SOM	Soil Organic Matter
T	Ton
U	Schluff

Statistische Parameter

Max	Maximum
Min	Minimum
MW	arithmetischer Mittelwert
n	Anzahl (Stichprobe)
r	Korrelationskoeffizient
r ²	Bestimmtheitsmaß
Stabw	Standardabweichung

Reliefparameter

AD	Altitude above drain culmination (Höhe über Tiefenlinie)
AS	Altitude below summit culmination (Höhe unter Scheitellinie)
NA	Normalized altitude (normierte Höhe)
WI _S	SAGA-Wetness Index (SAGA-Bodenfeuchte-Index)

sonstige Abkürzungen und Symbole

~	ungefähr
±	Standardabweichung
>	größer
<	kleiner
Δ	Differenz
a	annus (Jahr)
%	Prozent

α	Signifikanzniveau
π	Kreiszahl (Pi ~3,14159)
Abb.	Abbildung
Anm.	Anmerkung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
boliv.	bolivianischer
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
cm	Zentimeter
cmol	Zentimol
Dep.	Department
DGM	Digitales Geländemodell
E	Ost
Ed.	Editor
et al.	und andere
etc.	et cetera
exp	Exponent
GCM	General Circulation Models
Gew.-%	Gewichtsprözent
GIS	Geographische Informationssysteme
GPS	Global Positioning System
h	Stunde
ha	Hektar
i.V.	in Vorbereitung
ISODATA	Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique
ITCZ	Innertropische Konvergenzzone
JM	Jeffries-Matusita
Kap.	Kapitel
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
Landsat-TM	Landsat Thematic Mapper
lat	latitude
ln	Logarithmus
long	longitude
m	Meter
mg	Milligramm
ML	Maximum-Likelihood
mm	Millimeter

m ü. NN	Meter über Normalnull
mündl. Mitt.	mündliche Mitteilung
N	Nord
n.	nach
n.s.	nicht signifikant
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NE	Nordosten
NW	Nordwesten
o. Bez.	ohne Bezeichnung
ppm	parts per million
PV	Porenvolumen
S	Süd
s	Sekunde
SE	Südosten
südl.	südlich
SW	Südwesten
Tab.	Tabelle
TM	Thematic Mapper
ü. NN	über Normal Null
u.a.	unter anderem
v.a.	vor allem
W	West
WRS	World Reference System
z.T.	zum Teil

Bodenarten nach SOIL SURVEY STAFF (2003)

C	clay (Ton)
CL	clay loam (toniger Lehm)
L	loam (Lehm)
LS	loamy sand (lehmiger Sand)
SCL	sandy clay loam (sandig toniger Lehm)
SICL	silty clay loam (schluffig toniger Lehm)
SIL	silty loam (schluffiger Lehm)
SL	sandy loam (sandiger Lehm)