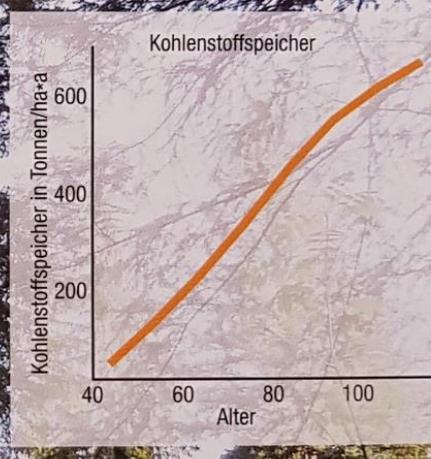
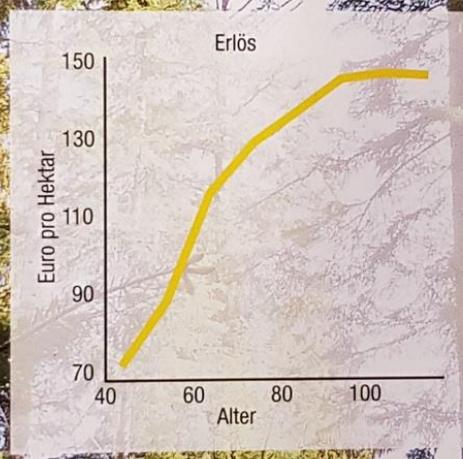
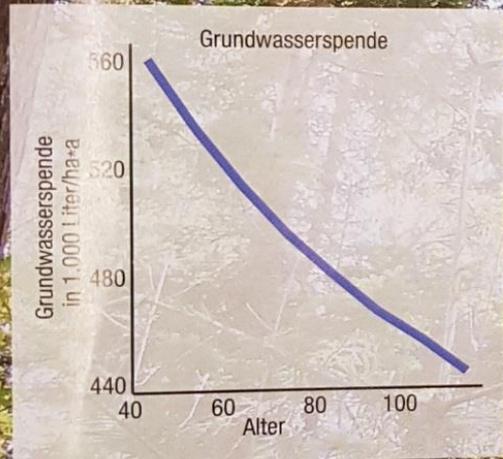


# AFZ Der Wald



# Waldinventuren

Ökosystemleistungen des Waldes bewerten

# Brandflächen in Ecuadors Tropenwald per Satellit erfassen

Brände beeinflussen das tropische Ökosystem der südlichen Anden Ecuadors in erheblichem Maße.

Meist handelt es sich um lokale Brände, deren Ausgangspunkt der Wanderfeldbau ist. In der Summe tragen sie in erheblichem Maße zu der Umwandlung der Wälder und somit zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Speichers sowie den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Wir haben untersucht, inwieweit die neue Generation räumlich und zeitlich hochauflösender Satellitensysteme in der Lage ist, diese kleinen Flächenbrände zu detektieren.

Nicolas Corti, Mengistie Kindu,  
Thomas Schneider

Mit ‚objekt-orientierter‘ Auswertung von RapidEye-Satellitendaten wurden 768 Brandflächen auf 0,6 % der 1.147 km<sup>2</sup> großen Untersuchungsfläche mit einer Trefferquote von 99,1 % erkannt. Die räumliche Analyse der Brandherde hat ergeben, dass 85 % davon bzw. 620 Brandflächen auf 592 ha Naturwaldflächen betroffen haben. 81 % dieser Brandflächen (620) sind kleiner als 1 ha, 407 davon kleiner als 0,5 ha, was auf Brände durch den Wanderfeldbau hindeutet. Keine dieser Flächen wurde von ‚globalen‘ Monitoring-Systemen erkannt.

## Kleine Waldbrände entgehen bisher der Fernerkundung

Durch Waldbrände emittiertes Kohlendioxid trägt wesentlich zur globalen Klimaerwärmung bei. Gleichzeitig wird der Kohlenstoffspeicher Holz reduziert. Lediglich ein geringer Anteil dieser Brände

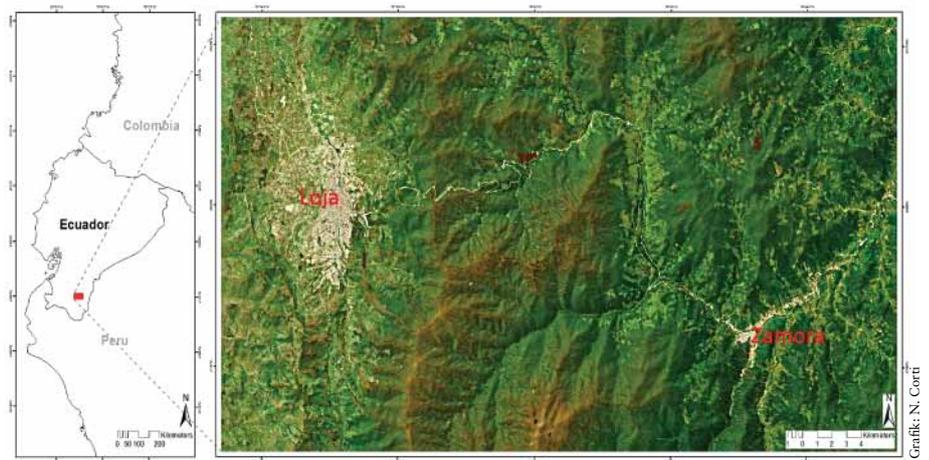


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes im Süden von Ecuador (links) und Visualisierung über eine RapidEye Echtfarben-Darstellung (RGB: Bänder 3, 2, 1) des untersuchten Datensatzes vom 21.11.2011

hat natürliche Ursachen [3, 17, 22]. Dies trifft auch auf Südamerikas tropische Waldökosysteme [17] zu und insbesondere auch auf die Tropenwälder Ecuadors. Wie Sierra & Stallings [25] beschreiben, beruht die Volkswirtschaft Ecuadors auf der Nutzung natürlicher Ressourcen. Die traditionelle Methode Ackerland zu gewinnen, ist die Urbarmachung von

Urwald durch Brandrodung [3]. Außer Kontrolle geratene Feuer sind in dem unwegsamen Gelände schwer zu bekämpfen, zumal es eklatante Schwachstellen im Bereich des Feuer-Managements gibt. Es beginnt bei der Detektion solcher Feuer, dann fehlt es an Notfallplänen und ganz allgemein an Ressourcen (terrestrisch oder aus der Luft) zur Bekämpfung von

## Schneller Überblick

- Zur Ermittlung von Brandflächen via Fernerkundung eignen sich Daten von Landsat und MODIS in Ecuador nur bedingt
- Wegen seiner hohe Aufnahmehäufigkeit bei hoher räumlicher und radiometrischer Auflösung wurden Daten des RapidEye-System in einem Pilotversuch als Alternative geprüft
- Brandflächen konnten mit dem RapidEye-System sehr genau erfasst werden

| LOLN Typ               | Beschreibung   |
|------------------------|--|
| Brandfläche Typ 1      | Vegetationsfreie Fläche, Asche und verkohlte Biomasse (frische Brände)   |
| Brandfläche Typ 2      | Wenig Vegetation, Reste verkohlter Biomasse (alte Brände)  |
| Naturwald              | Natürliche immergrüne Hochwald Formen: Tieflandform des Amazonasbeckens, tiefliegender, mittlerer und hochliegender Bergwald                             |
| Forst-Plantage         | Forstpflanzungen, meist Kiefern ( <i>Pinus patula</i> , <i>P. radiata</i> ) oder Eukalyptus ( <i>E. globulus</i> )                                       |
| Páramo                 | Hochandiner Vegetations-Typ > ca. 3.000 m. ü. NN mit Trockengräsern, Büschen und Riesen-Senezien (Pflanzengattung Greiskräuter [ <i>Senecio</i> ]), etc. |
| Grasland               | Meist sekundäre Grasgesellschaften, Weiden, Wiesen etc.  |
| Versiegelt/ degradiert | Siedlung, Infrastruktur, Felsen, degradiertes/übernutzter Boden, Bergrutsch, Schuttfächer, Erosionsrinnen etc.   |
| Landwirtschaft         | Landwirtschaftlich genutzte Flächen unterhalb 2.800 m ü. NN, u. a. Ackerland mit ein- bis mehrjährigen Feldfrüchten, Obstgärten etc.                     |
| Wasser                 | Wasserflächen  |

Tab. 1: Unterschiedene Landoberflächen-/Landnutzungstypen (LOLN) im Untersuchungsgebiet

Bränden. Flasse et al. [11] nennen den Aufbau räumlicher Informationssysteme zur Identifikation und Entwicklung von Rettungsketten als eine der dringlichsten Notwendigkeiten in diesem Bereich.

Aktuelle Forschung belegt den Erfolg fernerkundlicher Methoden zu Zwecken des Feuer-Monitorings [14, 19, 20, 26] und [2]. Am häufigsten werden hierfür die hochauflösenden Systeme des Landsat-Programms sowie die mittelhochauflösenden Daten des Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers (MODIS) eingesetzt, beide betrieben durch die National Aeronautics and Space Agency (NASA) der USA. Schwachstellen dieser Systeme sind einerseits die geringe zeitliche Auflösung von Landsat mit potenzieller Aufnahme-Option alle 16 Tage, andererseits die geringe räumliche Auflösung von MODIS mit 500 m Pixelgröße bei allerdings täglicher Aufnahmeoption. Die räumliche Auflösung von Landsat erlaubt regionale Auswertungen. MODIS und ähnliche Systeme werden für globale Modellierungen etwa der Treibhausgase, der saisonalen Vegetationsentwicklung oder des Kohlenstoffspeichers genutzt [16]. Allgemein zugängliche „Produkte“ dieser Systeme sind, u. a., das MODIS „Active Fire and Burned Area Product“, der European Remote Sensing Satellite 2 (ERS-2) Along-Track Scanning Radiometer (ATSR) World Fire Atlas (“ERS-2 ATSR World Fire Atlas”) und die „Global Fire Data“ Datenbank (GFED). Die Feuertdetektion erfolgt hier vor allem über

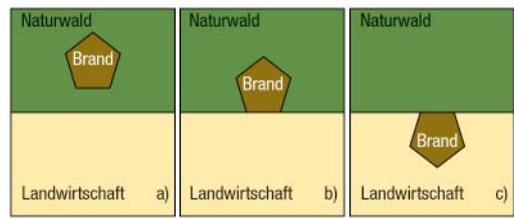


Abb. 2: Klassifikationsschema der Brandflächen über den Klassifikator „relative border to“ in 100 % oder eingeschlossen von Wald (a), 100 % bis 50 % (b) und unter 50 % Nachbarschaft zu Wald-Objekten

Rauchwolken. Für lokale Anwendungen haben sich die Produkte der „globalen“ Systeme als räumlich nicht explizit genug erwiesen. In den Tropen kommt die häufige Wolkenbedeckung hinzu, die solche Rauchentwicklungen ‚verschluckt‘. In Ecuador sind zusätzlich die stark strukturierte Topographie zu nennen, die unterschiedlichste Beleuchtungsverhältnisse von Sonn- zu Schattenhängen verursacht, sowie die schnell wachsende Vegetation, welche sich Brandflächen schnell zurückeroberet [6, 10]. Hinzu kommt, dass die durchschnittliche Größe einer Farm unter 5 ha liegt und die gelegten Feuer zur Erweiterung der nutzbaren Fläche entsprechend klein sind [3, 21, 10]. Mit anderen Worten: zur Detektion von Brandflächen in diesem Umfeld sind räumlich und zeitlich hoch auflösende Fernerkundungssysteme gefragt, die darüber hinaus günstig bis unentgeltlich verfügbar sind. Die neue Generation hoch auflösender Systeme wie RapidEye (Fa. PlanetLabs) und Sentinel 2/3 (ESA Copernicus Programm) erfüllen diese Bedingungen. Integriert in ein Land-

nutzungs-Monitoring-Konzept können über Daten solcher Systeme detektierte Feuer eindeutig bestimmten Landnutzungen oder Oberflächentypen des natürlichen Umfeldes zugewiesen werden. Eine schnelle und effektive Informationsquelle von der Planung bis zur Unterstützung der Bekämpfungs- und Restorationsmaßnahmen von und nach Flächenbränden kann darüber hinaus zur Verfügung gestellt werden.

Mit einer potenziellen Wiederholrate von zwei bis drei Tagen für das Untersuchungsgebiet, 5 m räumlicher Auflösung und etwa 16.000 theoretisch unterscheidbaren Grauwerten (16 Bit, menschliches Auge 8 Bit oder 256 Grauwerte) erscheint aus heutiger Sicht das RapidEye-System gut geeignet, um ein derartiges Konzept für die Tropen zu überprüfen. Anhand eines einzelnen RapidEye-Datensatzes wurden folgende Forschungsfragen untersucht:

- Welche Genauigkeiten erreicht die Klassifikation der Landoberflächen-/Landnutzungstypen?
- Wie genau sind Brandflächen räumlich und zeitlich abgrenzbar?
- Welche Flächen nehmen die über RapidEye bzw. MODIS detektierten Brandflächen ein?
- Welche Beziehung besteht zu den betroffenen Nutzungstypen?
- Lassen sich sozio-ökonomische Rückschlüsse aus den Brandflächen-Mustern ziehen?

### Brandflächenerkennung mit Rapid-Eye-Aufnahmen

Das Untersuchungsgebiet liegt in den südöstlichen Ecuadorianischen Anden. Es umfasst 1.147 km<sup>2</sup> Fläche und eine Höhenlage von 830 bis 3.500 m über NN. Es liegt in einem „hot spot“ des andinischen Gefäßpflanzen-Lebensraumtyps [5], in dem 16 Ökosystemtypen unterschieden werden [12, 21, 4] (Abb.1). Das Gebiet erstreckt sich von tropisch feuchten Klimaten der Amazonastiefenebene im Osten über steile Anstiege zum Andenhauptkamm mit adiabatischer Abkühlung und dadurch bedingten hohen Niederschlagsmengen Richtung Westen bis in die Trockenlagen westlich des Anden-Hauptkamms um die Provinzhauptstadt Loja.

Untersucht wurde ein geometrisch, radiometrisch und topographisch korrigier-

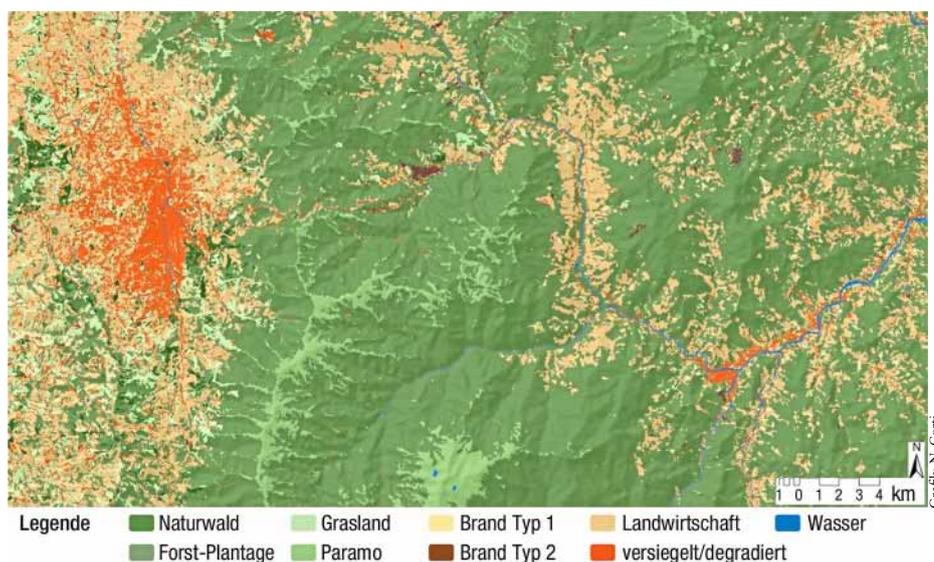


Abb. 3: Landoberflächen-/Landnutzungstypen-Klassifikation des Untersuchungsgebietes

ter (Level 3A) Datensatz des RapidEye-Systems, aufgenommen am 21.11.2011 bei einem Sonnenstand von 156,9251° Azimut- und 17,01° Zenit-Winkel. Der Datensatz wurde durch das RapidEye Science Archive Programm (RESA) des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt unter Projektnummer 463 zur wissenschaftlichen Auswertung zur Verfügung gestellt.

MODIS Monats-Daten des „Active Fire and Burned Area Product“ wurden für jeweils ein Jahr vor und nach der RapidEye-Aufnahme ausgewertet. Zur Unterstützung der topographischen Korrekturen und der Höhenstufen-Unterscheidung wurde das Geländemodell des Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) der National Aeronautics and Space Administration (NASA) genutzt. Zusätzlich wurde auf Informationen des Instituto Geografico Militar (IGM) zur Nordabweichung und von Klimadaten sowie Niederschlagsdaten und Daten zu Temperaturgradienten des Ministerio di Ambiente (MAE) und des Ministerio de Agricultura, Ganaderia, Acuacultura y Pesca del Ecuador (MAGAP) zurückgegriffen.

Aufgrund der großen Reliefunterschiede, der hochgradig strukturierten Topographie und der speziellen Lage am Andenhauptkamm mit unterschiedlicher atmosphärischer Beeinflussung und unterschiedlichen Beleuchtungssituationen war es notwendig, eine zusätzliche gekoppelte

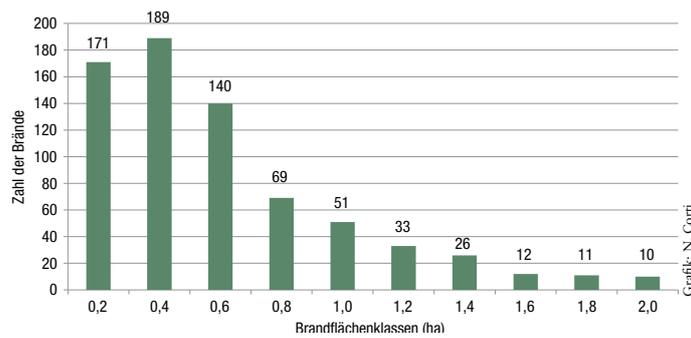


Abb. 4: Verteilung der Brandflächen kleiner 2 ha im Untersuchungsgebiet

atmosphärisch/topographische Korrektur durchzuführen. Hierzu wurde ATCOR-3 in der PCI Geomatica V12 Implementierung genutzt. Um die Verknüpfung mit den RapidEye-Daten zu vereinfachen, wurde das ASTER DGM von 30 m auf die RapidEye-Pixelgröße von 5 m umgerechnet und um Fehler bereinigt. Um den unterschiedlichen regional-klimatischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet Rechnung zu tragen, wurden neun Teilzonen ausgewiesen, die gesondert klassifiziert und hernach zusammengeführt wurden.

Für die Klassifikation wurde der objekt-orientierte (OO) Bildanalyse-Ansatz (object-based image analysis, OBIA) von eCognition Developer der Fa. Trimble genutzt. Jeder Klassifikationsschritt in eCognition beginnt mit einer Segmentation, bei der anhand von Homogenitätskriterien unter Auswahl der Merkmale (Bandwerte, Höhe laut DGM etc.) und deren Wichtung homogene Bereiche geschaffen werden. Für jedes Segment werden automatisch Merkmale berechnet und in einer Datenbank abgelegt. Die Klassifikation

erfolgt über Abfragen der Datenbankeinträge (Schneider et al., 2000). Die zu klassifizierenden Landoberflächen-/Landnutzungstypen (LOLN) sind in Tab. 1 dargestellt.

Der für die Zwecke dieser Analyse erstellte hierarchische Klassifikationsbaum beginnt mit der Unterscheidung von Brandflächen auf Ebene 1, die anhand des Normalized Dif-

ferentiated Vegetation Index (NDVI = NIR-rot/NIR+rot) und des Reflexionswertes im Nahen Infrarot Band (NIR) in zwei Untertypen getrennt wurden (Typ 1 und 2, frische und alte Brandflächen). Anschließend wurden die Landoberflächen-/Landnutzungstypen unterschieden. Hierzu wurde auf Ebene 2 zuerst in „Vegetation“ und „Nicht-Vegetation“ getrennt, wobei die bereits identifizierten Brandflächen nicht weiter berücksichtigt wurden. „Nicht-Vegetation“ wurde dann weiter unterteilt in „Wasser“ und „Versiegelt/Degradiert“. Auf der hierarchischen Ebene 3 wurde dann „Vegetation“ weiter unterschieden in die Klassen „Wald“ mit den Unterklassen „Forst-Plantage“ und „Natürlicher Wald“ sowie „Nicht-Wald“ mit den Unterklassen „Grasland“ und „Páramo“ sowie „Landwirtschaft“. Für die Klassifikation wurden spektrale, textuelle sowie Nachbarschafts-Merkmale genutzt.

Als Ergebnisse dieser Analyse sind drei thematische Ebenen verfügbar, jede mit angefügter Datenbank zu Fläche, Lage, Nachbarschaften etc. der Objekte, die

| LOLN<br>visuell zugeordnet:<br>klassifiziert als: | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           | 6           | 7           | 8           | 9           | Total          | NG (%)       |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|--------------|
| Brandfläche Typ 1 (1)                             | 48          | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 2           | 0           | 0           | 50             | 96,0         |
| Brandfläche Typ 2 (2)                             | 1           | 59          | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 60             | 98,3         |
| Naturwald (3)                                     | 0           | 0           | 125         | 0           | 3           | 1           | 0           | 0           | 0           | 130            | 96,1         |
| Forst-Plantage (4)                                | 0           | 1           | 0           | 69          | 0           | 0           | 0           | 0           | 1           | 70             | 98,5         |
| Páramo (5)  | 0           | 0           | 2           | 0           | 78          | 0           | 0           | 0           | 0           | 80             | 97,5         |
| Grasland (6)                                      | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 80          | 1           | 4           | 0           | 85             | 94,1         |
| Versiegelt/degradiert (7)                         | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 86          | 4           | 0           | 90             | 95,5         |
| Landwirtschaft (8)                                | 0           | 0           | 0           | 1           | 0           | 4           | 1           | 94          | 0           | 100            | 94,0         |
| Wasser (9)  | 0           | 0           | 2           | 0           | 0           | 0           | 0           | 1           | 52          | 0              | 94,5         |
| <b>Total</b>                                      | <b>49</b>   | <b>60</b>   | <b>129</b>  | <b>70</b>   | <b>81</b>   | <b>85</b>   | <b>90</b>   | <b>103</b>  | <b>53</b>   | <b>720</b>     |              |
| <b>PG (%)</b>                                     | <b>97,9</b> | <b>98,3</b> | <b>96,9</b> | <b>98,5</b> | <b>96,3</b> | <b>94,1</b> | <b>95,5</b> | <b>91,2</b> | <b>98,1</b> | <b>Gesamt:</b> | <b>95,9%</b> |

Genauigkeiten: NG = Nutzer, PG = Produzenten, Gesamt = Gesamtgenauigkeit, Kappa Statistik: 0,954

Tab. 2: Konfusionsmatrize zur Klassifikationsgenauigkeit der RapidEye-Daten auf Hierarchieebene 3

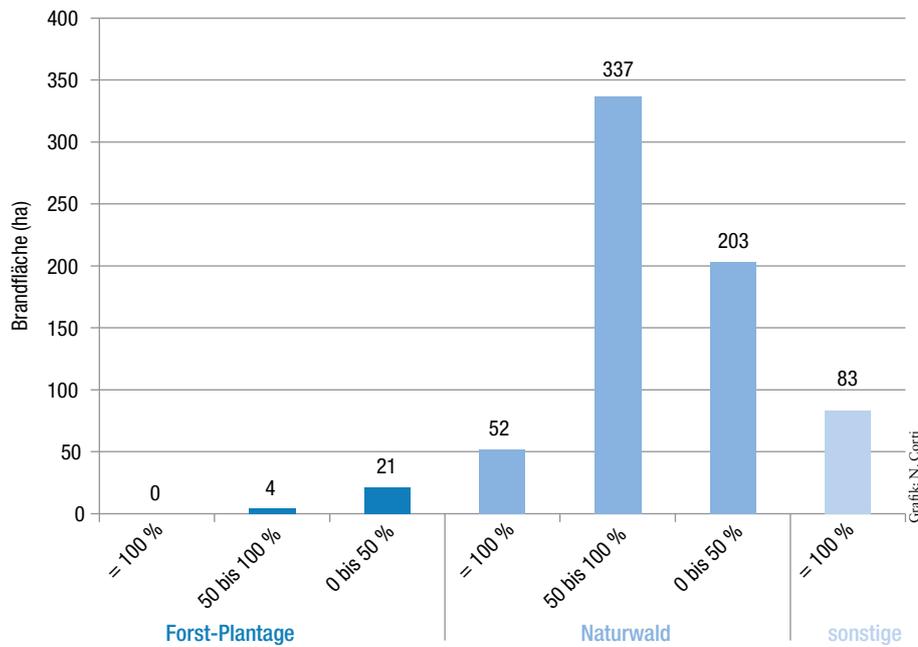


Abb. 5: Nachbarschaftsbeziehung der Brandflächen unter 2 ha

direkt in GIS-Systeme überführbar sind. Wie aus der GIS-Umgebung bekannt, können diese Ebenen jeweils als Karten dargestellt werden. Die nachfolgenden Analyseschritte entsprechen dann auch einer GIS-Analyse: Größenverteilung der Brandflächen, Nachbarschaft der Brandflächen zu Wald/Plantage und „anderen Klassen“ in den drei Kategorien „eingeschlossen“, gemeinsame Grenze zwischen „100 % und 50 %“ sowie zwischen „50 % und 0 %“ (Abb. 2).

Die Genauigkeitsanalyse jedes Klassifikationsergebnisses erfolgte aus Mangel an vertrauenswürdigen Basisdaten des Untersuchungsgebietes über Vergleich der computergestützten Klassifikationsergebnisse mit den visuellen Eindrücken und Interpretationen des Experten. Hierzu wurden insgesamt 720 Punkte, mit mindestens 50 Punkten pro Klasse, zufallssteuert ausgewählt und verglichen (siehe [7, 15, 23]).

Der letzte Analyseschritt vergleicht das Detektionsergebnis der hier durchgeführten RapidEye-Daten-Analyse mit den Ergebnissen des MODIS „burned area products“, das monatlich von der NASA als globale Datenebene zur Verfügung gestellt wird. Um die Analyse zu vereinfachen, wurden lediglich RapidEye detektierte Brandflächen größer 25 ha in den Vergleich aufgenommen, da kleinere von MODIS nicht erkannt werden können. Monatliche MODIS Brandflächen-Karten ein Jahr vor bis ein Jahr nach dem

Aufnahmedatum von RapidEye wurden berücksichtigt.

### Naturwälder mit hohem Brandrisiko

Das Klassifikationsergebnis der Hierarchieebene 3 ist in Abb. 3 dargestellt. Die dominierende LOLN-Klasse sind die „Naturwälder“ (64,4 %), gefolgt von „Landwirtschaft“ (19,8 %), „Versiegelt/Degradiert“ (5,1 %), „Grasland“ (4,8 %), „Páramo“ (3,7 %), ergänzt durch „Forst-Plantage“ (1,1 %), „Brandfläche“ (0,6 %) und „Wasser“ (0,4 %).

Die Konfusionsmatrize zur Klassifikation in Detaillierungsstufe 3 ist in Tab. 2 dargestellt.

Die Gesamtgenauigkeit der LOLN-Klassifikation auf Hierarchieebene 3 erreicht mit 95,9 % korrekt zugewiesenen Objekten einen extrem guten Wert. Die geringste Trefferquote ist für die landwirtschaftlichen Flächen zu verzeichnen, die jedoch mit einer Nutzergenauigkeit („NG“ = „was wurde aus der lokalen Kenntnis des Nutzers richtig zugewiesen“) von 94 % und einer Produzentengenauigkeit („PG“ = „was wurde aus Bearbeiter-Sicht richtig zugewiesen“) von 91,2 % immer noch in Bereichen liegt, die als „sehr gut“ angesehen werden [7]. Die im Interessenschwerpunkt stehenden Brandflächen werden mit einer NG/PG von 96 %/97,9 % für den Typ 1 und 98,3 %/98,1 % für Typ 2 ausgewiesen. Damit kann man sagen, dass die Detektion von Brandflächen mit

hochauflösenden Systemen des RapidEye-Typs mit hoher Genauigkeit möglich ist.

Ausgehend von diesem Befund wurden die quantitativen Bewertungen durchgeführt. Insgesamt wurden 768 Brandflächen detektiert. Die mittlere Größe wurde mit 0,91 ha berechnet, die Standardabweichung mit 3,13 ha. Die absolute Mehrzahl der Brandflächen lag unter 12 ha, drei Flächen lagen zwischen 12 und 24 ha und lediglich zwei Flächen waren größer 24 ha. Von den 763 Brandflächen unter 12 ha liegen 712 (93 %) unter 2 ha, 620 sogar unter 1 ha (81 %), davon 407 zwischen 0,1 und 0,2 ha (Abb. 4).

Um die Frage der Brandursachen sowie das Brandrisiko einschätzen zu können, wurde analysiert, welche Nachbarschaftsbeziehungen zu welcher LOLN-Klasse bestehen. Hier zeigt es sich, dass die überwiegende Mehrzahl der Brände inmitten oder in unmittelbarer Nachbarschaft zu Wäldern auftreten. Dieses entspricht einer Fläche von 617 ha. Lediglich 83 ha (13 %) haben einen Bezug zu all den anderen LOLN-Klassen im Studiengebiet. Die Analyse zeigt auch deutlich, dass Naturwälder einem höheren Risiko ausgesetzt sind, einem Feuerbrand zum Opfer zu fallen. Von den 617 ha Fläche mit Bezug zu Wald sind 592 ha dem Naturwald zugehörig, davon lagen 52 ha innerhalb des natürlichen Waldes.

Der Vergleich der Detektionserfolge der RapidEye-Studie mit dem MODIS „Burned Area Product“ fiel negativ aus. Keine der beiden theoretisch mit MODIS detektierbaren Flächen (37,9 ha und eine mit 70,7 ha) wurden in dem MODIS „Burned Area Product“ als Brandflächen ausgewiesen.

### Diskussion

Angestoßen wurde diese Studie durch die Notwendigkeit, die Änderung der LOLN im Studiengebiet eines Tropenökologie-Vorhabens der DFG [4] zu bilanzieren und darüber Eingangsgrößen für Restaurierungs-Konzepte und eine nachhaltige Nutzungsplanung bereitzustellen. Die hohe zeitliche Aufnahmefrequenz bei hoher räumlicher und radiometrischer Auflösung der neuen Generation der satellitengestützten Erdbeobachtungssysteme, hier vertreten durch das RapidEye-System, haben die Studie auch ökonomisch sinnvoll erscheinen lassen. Erst

die Aussicht, in den durch häufige Wolkenbedeckung bisher für die Erdbeobachtung nicht erreichbaren Gebieten Daten in ausreichender zeitlicher Auflösung beziehen zu können, macht den Aufbau eines darauf beruhenden Monitoring-Systems überhaupt sinnvoll. Die hier präsentierte Studie ist als Pilotprojekt zu verstehen.

Die OBIA-Analysemethode hat sich bewährt und bestätigt somit die Erfahrungen, über die bereits [8, 13, 24, 9] u. a. in kleinstrukturiertem Gelände berichten. Insbesondere die Möglichkeit, externe Daten, etwa Höhendaten, oder vorhandene thematische Vektordaten in die Auswertungen zu integrieren, hat sich als hilfreich erwiesen. Zu erwähnen seien auch die Vorteile der ‚weichen‘ Klassifikatoren über Zugehörigkeitsfunktionen, die bei graduellen Merkmalsänderungen zu guten Ergebnissen führen. Die Brandflächen selbst sind damit gut zu erfassen. Dies liegt primär an den hohen Kontrasten zu nicht von Brand betroffenen Flächen. Das eCognition-Verfahren kann

aber auch ältere Brandflächen sicher identifizieren, wobei sich vor allem die ‚weichen‘ Klassifikatoren, die über ‚fuzzy logic‘-Ansätze und Zugehörigkeitsfunktionen arbeiten, als zielführend erwiesen haben.

Die Ergebnisse unserer Analysen geben wertvolle Hinweise auf zwei thematisch recht unterschiedliche, aber dennoch zusammenhängende Vorgänge: einmal die zunehmende Ausbreitung der Landnutzung in bisher unberührte andine Regionen Ecuadors und die Bilanzierung von Bränden in diesen Gegenden, die unmittelbar mit diesen Landnutzungsänderungen zusammenhängen. Während der erste Wirkungskreislauf weitestgehend dokumentiert ist [18, 3, 4, 22, 25], gibt es für den zweiten weltweit nur wenige Studien, insbesondere keine, die die spezifischen Bedingungen in den andinen Regionen Ecuadors behandelt. Diese Diskussion befasst sich daher hauptsächlich mit der Frage der Bilanzierung von lokalen Brandflächen sowie deren sozio-ökonomischen Einordnung.

Die Studie hat aufgezeigt, dass all die kleinen Brandflächen etwa 0,6 % der Untersuchungsfläche einnehmen. Das klingt nach wenig. Bei der hohen Dynamik durch eine exponentiell wachsende Bevölkerung kann der darüber praktizierte Wanderfeldbau (‚shifting cultivation‘), der ja wie aufgezeigt vor allem die Naturwälder betrifft, schnell größere und damit nicht mehr zu vernachlässigende Größenordnungen erreichen.

Die Größenverteilung der Brandflächen mit wenigen großen und vielen kleinen bis sehr kleinen Brandflächen lässt den eindeutigen Zusammenhang mit dem kleinstrukturierten bäuerlichen Wanderfeldbau erkennen. Mit wachsender Bevölkerung wird der Druck auf die Naturwaldflächen zunehmen. Die Studie zeigt eindringlich, dass bei der lokalen bis globalen Bilanzierung von Flächenbränden zum Zwecke der Modellierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Kohlenstoffspeichers im Zusammenhang mit Treibhauseffekten auch kleine Brände in der Summe Beiträge leisten und somit berücksichtigt werden müssen. Diese kleinen Brände liegen mehrheitlich unterhalb der nominellen Detektierbarkeits-Grenze der ‚globalen‘ Produkte. Nicht wahrgenommen wird, dass auch Brände, die von der Flächenausdehnung über 25 ha liegen und theoretisch von den globalen Produkten erfasst werden müssten, in dem stark strukturierten, lokal-klimatisch speziellen Untersuchungsgebiet nicht sicher bis gar nicht erkannt werden. Die Lücke, die sich bei der globalen Bilanzierung der Waldbrand-Auswirkungen auftut, scheint in der Realität somit noch größer zu sein, als bisher angenommen. Ein Monitoring mit hochauflösenden Systemen, etwa des Copernicus-Programms, scheint geboten und mit den verfügbaren Systemen auch möglich.

## Literaturhinweise:

- [1] BASTARRICA, A. (2009): Cartografía Automática de Área Quemada a Nivel Local-Regional Mediante Algoritmos de Contexto Espacial. Doctoral Thesis, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. [2] BASTARRICA, A.; CHUIVECO, E.; PILAR MARTIN, M. (2011): Automatic Burned Land Mapping From MODIS Time Series Images: Assessment in Mediterranean Ecosystems. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 49 (9), 3401–13. doi:10.1109/TGRS.2011.2128327. [3] BECK, E.; HARTIG, K.; ROOS, K. (2008a): Forest Clearing by Slash and Burn. In: Gradients in a tropical mountain ecosystem of Ecuador: Analysis and Synthesis, 371–374. *Ecological studies*, Bd. 198, Springer, Berlin, S. 371–374. [4] BECK, E.; MAKE-SCHIN, F.; HAUBRICH, F.; RICHTER, M.; BENDIX, J.; VALAREZO, C. (2008b): The Ecosystem (Reserva Biológica San Francisco). In: Gradients in a tropical mountain ecosystem of Ecuador. Analysis and Synthesis. *Ecological studies* Bd. 198. Springer, Berlin, S. 1–13. [5] BRUMMITT, N.; LUGHADHA, E. N. (2003): Biodiversity: Where's hot and where's not. *Conservation Biology*, 17 (5), S. 1442–1448. [6] CHUIVECO, E. (1997): A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá, Departamento de Geografía. [7] CONGALTON, R. G.; GREEN, K. (2009): Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis "ERS-2 ATSR World Fire Atlas. Accessed April 10, 2015. <http://due.esrin.esa.int/wfa/>. [8] deKOK, R.; BUCK, A.; SCHNEIDER, T.; AMMER, U. (2000): Analysis of image objects from vhr imagery for forest VBIS updating in the Bavarian Alps. *ISPRS*, Bd. XXXIII, Amsterdam. [9] ELATAWNEH, A.; WALLNER, A.; MANAKOS, I.; SCHNEIDER, T.; KNOKE, T. (2014): Forest Cover Database Updates Using Multi-Seasonal RapidEye Data-Storm Event Assessment in the Bavarian Forest National Park. *Forests* 2014/5, S. 1284–1303 (doi:10.3390/f5061284). [10] FERNÁNDEZ, G.; OBERMEIER, W.; GERIQUE, A.; SANDOVAL, M.; LEHNERT, L.; THIES, B.; BENDIX, J. (2015): Land cover change in the Andes of Southern Ecuador — Patterns and Drivers. *Remote Sensing*, 7 (3), S. 2509–2542 (doi:10.3390/rs70302509). [11] FLASSE, S. P.; TRIGG, S. N.; CECCATO, P. N.; PERRYMAN, A. H.; ANDREW, H. T.; THOMPSON, M. W.; BROCKETT, B. H. et al. (2004): Remote sensing of vegetation fires and its contribution to a Fire Management Information System. In: *Wildland fire management handbook for Sub-Sahara Africa*. Hrsg. von Goldammer, J. G.; deRonde, C., 158–211. [S.I.], Global Fire Monitoring Center (GFMC). [12] GALEAS, R.; GUEVARA, J. E.; MEDINA, B.; CHINCHERO, M. A.; HERRERA, X. (eds.) (2012): Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental. Ministerio del Ambiente del Ecuador, Quito. [13] KINDU, M.; SCHNEIDER, T.; TEKETAY, D.; KNOKE, T. (2013): Land Use/Land Cover Change Analysis Using Object-Based Classification Approach in Munessa-Shashemene Landscape of the Ethiopian Highlands. *Remote Sensing*, 5 (5), S. 2411–2435 (doi:10.3390/rs5052411). [14] LEBLON, B.; BOURGEOU-CHAVEZ, L.; SAN-MIGUEL-AYANZ, J. (2012): Use of Remote Sensing in Wildfire Management. In: *Sustainable development: Authoritative and lead*. [15] LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. (2008): Remote sensing and image interpretation. 6. Aufl.; John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. [16] MODIS Active Fire and Burned Area Products. <http://modis-fire.umd.edu/index.php> (10.04.2015). [17] MANTA, M.I.; SANHUEZA, P. (2009): Wildfires in South America. *Crisis-Response-2009-Vol-6-1*, S. 56–57. [18] MOSANDL, R.; GÜNTHER, S.; STIMM, B.; WEBER, M. (2008): Ecuador suffers the highest deforestation rate in South America. In: Gradients in a tropical mountain ecosystem of Ecuador: Analysis and Synthesis. *Ecological studies*, Bd. 198, Springer, Berlin, S. 37–40. [19] PEREIRA, J. M.; FLASSE, S.; HOFFMAN, A.; PEREIRA, J. A.; GONZÁLEZ-ALONSO, F.; TRIGG, S. (2000): Operational Use of Remote Sensing for Fire Monitoring and Management: Regional Case Studies. In: *Forest Fire Monitoring and Mapping: A Component of Global Observation of Forest Cover*. Report of a Workshop. Ahern, F.; Grégoire, J.-M.; Justice, C. (Hrsg.), Ispra: European Commission - Joint Research Centre, S. 98–110. [20] PEREIRA, J. M. (2003): Remote sensing of burned areas in tropical savannas. *Int. J. Wildland Fire*, 12 (4), S. 259 (doi:10.1071/WF03028). [21] POHLE, P. (2008): The People Settled Around Podocarpus National Park. In: Gradients in a tropical mountain ecosystem of Ecuador: Analysis and Synthesis. *Ecological studies*, Bd. 198, Springer, Berlin, S. 25–36. [22] POHLE, P.; GERIQUE, A. (2008): Sustainable and Non-Sustainable Use of Natural Resources by Indigenous and Local Communities. In: Gradients in a tropical mountain ecosystem of Ecuador: Analysis and Synthesis. *Ecological studies*, Bd. 198, Springer, Berlin, S. 347–361. [23] RICHARDS, J. A.; JIA, X. (1999): Remote sensing digital image analysis: An introduction. 3. Aufl., Springer, Berlin. [24] SCHNEIDER, T.; ELATAWNEH, A.; RAHLF, J.; KINDU, M.; RAPPL, A.; THELE, A.; BOLDT, M.; HINZ, S. (2013): Parameter determination by RapidEye and TerraSAR-X data — a step toward a remote sensing based inventory, monitoring and fast reaction system on forest enterprise level. *EOGC Sonderausgabe*, Springer, Berlin, S. 81–107. [25] SIERRA, R.; STALLINGS, J. (1998): The dynamics and social organization of tropical deforestation in Northwest Ecuador, 1983–1995. *Human Ecol.*, 26 (1), S. 135–161. [26] XIAO-RUI, T.; MCRAE, D. J.; LI-FU, S.; MING-YU, W.; HONG, L. (2005): Satellite remote-sensing technologies used in forest fire management. *Journal of Forestry Research* 16 (1), S. 73–78 (doi:10.1007/BF02856861).

Nicolas Corti,  
nicolas.corti@tum.de, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie der Technischen Universität München (TUM). Mengisti Kindu und Thomas Schneider sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung an der TUM.

