

UAV-gestützte Untersuchung der durch Blattschneiderameisen verursachten Bioturbation im Catimbau-Nationalpark (NE-Brasilien)

JENS BRAUNECK¹ & RAINER WIRTH²

Zusammenfassung: Gegenstand dieses interdisziplinären Forschungsprojekts sind die ökologischen Auswirkungen anthropogener Störungen auf das Caatinga-Trockenwaldökosystem, eines der am stärksten bedrohten semiariden Naturgebiete Südamerikas. Vegetationssukzession und Ökosystemfunktionen werden im Untersuchungsgebiet nachhaltig von Blattschneiderameisen beeinflusst, da sich diese Ameisen aufgrund der anthropogenen Landnutzungseffekten drastisch vermehren und zu dominanten Schädlingen werden können. Mit Hilfe UAV-basierter Vermessung soll die Bioturbationsleistung der Ameisen auf Landschaftsebene quantifiziert werden. Dazu werden sowohl volumetrische Berechnungen auf Nestebene durchgeführt als auch die Verbreitung der Nester in der Landschaft per UAV-Kartierung erfasst.

1 Einleitung

Im Rahmen eines binationalen Forschungsprogramms wird aktuell in einer Kooperation der TU Kaiserslautern und der Universidade Federal de Pernambuco, Brasilien (DAAD, PROBRAL-ID: 57576555) analysiert, wie sich chronisch anthropogene Störungen auf Ökosystemfunktionen Desertifizierung und Regenerationsdynamik des nordostbrasilianischen Caatinga-Trockenwaldes auswirken. Blattschneiderameisen der Gattung *Atta* spielen in diesem Ökosystem eine Schlüsselrolle als dominante Pflanzenfresser und Ökosystem-Ingenieure, die sich infolge menschlicher Landnutzung drastisch vermehren und zu dominanten Schädlingen werden können. Im Fokus der Untersuchungen stehen die langlebigen, bis zu 200 m² großen Ameisennester und deren Effekte auf die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Oberbodens (MEYER et al. 2013; BIEBER et al. 2011).

Die Erkennung und Bestandsaufnahme der Blattschneiderameisennester ist für eine Abschätzung des Einflusses auf die Landschaftsentwicklung notwendig, stellt in dem je nach Vegetationsdichte unzugänglichen Gelände eine besondere Herausforderung dar, da sie kaum über herkömmliche freie Satellitendaten erkannt werden können. Der Einsatz von UAV soll helfen, hier die Grundlage für topografische und ökologische Erhebungen auch in abgelegenen Gebieten zu schaffen. Die UAV-Technologie schließt hier eine methodische Lücke zwischen satelliten- und bodengestützter Datenerfassung. In der einfachsten Konfiguration können mit Digitalkameras ausgerüstete UAVs hochauflösende digitale Luftbilder des Geländes erstellen, die dann mittels einer geeigneten Photogrammetrie-Software analysiert und in ein dreidimensionales digitales Oberflächenmodell

¹ Frankfurt University of Applied Sciences, FB 1, Labor für Laserscanning, Photogrammetrie und Fernerkundung, Nibelungenplatz 1, D - 60318 Frankfurt am Main, E-Mail: jens.brauneck@fb1.fra-uas.de

² TU Kaiserslautern, Molekulare Botanik (Sektion Pflanzenökologie), Erwin-Schrödinger-Str. Geb. 70/219, D - 67653 Kaiserslautern, E-Mail: wirth@rhrk.uni-kl.de

umgerechnet werden können. Mit dieser Methode soll sowohl eine Kartierung der Nestvorkommen als auch eine direkte Ableitung der Bioturbationsleistung der Ameisen vorgenommen werden.

2 Daten und Methoden

Die Untersuchungen wurden im Catimbau-Nationalpark (NPC) durchgeführt, einem 607 km² großen Gebiet im nordostbrasilianischen Caatinga-Trockenwald im Zentrum des Bundesstaates Pernambuco. Der Nationalpark ist durch ein stark heterogenes Landnutzungs mosaik mit sehr unterschiedlichem Ausmaß an anthropogenen Störungen und einem ausgeprägten W-O verlaufenden Niederschlagsgradienten (650 bis 1100 mm mittlerer Jahresniederschlag) gekennzeichnet. In der Caatinga-Kulturlandschaft wurde bereits etwa 60 % der ursprünglichen Waldbedeckung durch Sekundärvegetation ersetzt oder weitgehend degradiert (SILVA et al. 2017).

2.1 Problemstellung

Pilzzüchtende Ameisenarten der Gattung *Atta* sammeln Biomasse in Form frischer Blattfragmente, um darauf einen Pilz in ihrem unterirdischen Nest zu kultivieren (WEBER 1966), der ihnen als Nahrungsgrundlage dient. *Atta*-Nester sind allgegenwärtig in tropischen und subtropischen Lebensräumen Amerikas von semiariden Grasländern, Savannen, Trocken- und Regenwäldern bis hin zu Weideland und landwirtschaftlich genutzten Flächen (FOWLER & CLAVER 1991). Die kolossalen Nester der Gattung bestehen aus bis zu 8000 unterirdischen miteinander verbundenen Pilz-Kammern, die bis zu 7–8 m unter der Erde reichen (MOREIRA et al. 2004) sowie einem umfangreichen, komplex verzweigten Tunnelsystem zum Transport von Blättern und zur Belüftung und Drainage des Nestes (WIRTH et al. 2003).

Die Nester zeigen oberflächlich zahlreiche Auswurf- und Belüftungshügel (s. Abbildung 1), unterirdisch zeigen sie sehr komplexe Strukturen und sind stark verzweigt. Die sichtbare Nestoberfläche nimmt mit dem Alter zu, da die Neststruktur ein direktes Produkt der wachsenden Ameisenkolonie ist (FOWLER et al. 1986). Dementsprechend nehmen auch die unterirdischen Wühltätigkeiten in ausgewachsenen Nestern zu, um den ständig wachsenden Pilz zu versorgen (RÖMER & ROCES 2015), da bei einigen Arten die entstehenden Abfälle, wie auch der gesamte ausgehobene Mineralboden außerhalb des Nests abgelagert werden (LEAL et al. 2014).

Diese kontinuierlichen Bioturbationsprozesse während des Nestbaus verändern beständig die chemisch-physikalische Struktur und die Nährstoffverfügbarkeit der Böden in unmittelbarer Nähe der Nester. Die durch die Grabungsaktivitäten entstehenden Nesthügel werden durch flächenhafte Wassererosion immer wieder eingeebnet und das Material in die unmittelbare Nestumgebung verlagert. Durch den in aller Regel geringeren Gehalt an Nährstoffen und insb. organischem Kohlenstoff in den unteren Bodenhorizonten (MEYER et al. 2013) erscheint die Nestoberfläche in Luftbildern erkennbar heller als die Umgebung (Abb. 1). Niedrige Vegetation an der Nestoberfläche stirbt bei größeren, resp. älteren Populationen durch die Grabungsaktivitäten und die damit einhergehende reduzierte Wasserverfügbarkeit ab.

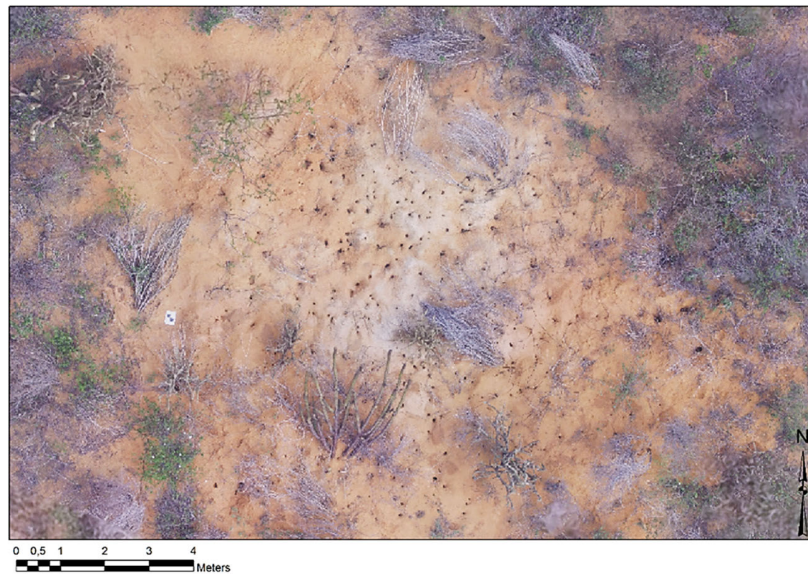


Abb. 1: Orthofoto einer Nestoberfläche der Art *Atta opaciceps* im Untersuchungsgebiet NPC, NE-Brasilien

2.2 Geländearbeiten

Gegenstand der Untersuchungen war die Art *Atta opaciceps* - die häufigste der Blattschneiderameisenarten im NPC und die einzige endemische Art im Caatinga-Trockenwald (SIQUEIRA et al. 2017). Die Studie beschränkt sich auf drei Teilgebiete des NPC, in denen ausschliesslich *A. opaciceps* vorkam. Sie wurden aufgrund der lokalen Merkmale und bestehender Ortsnamen "Brejo", "Canyon" und "Casa-d'água" genannt (Abb. 2). Auf allen Untersuchungsflächen wurde früher Landwirtschaft betrieben, erst in jüngerer Zeit entwickelte sich die Nutzung als extensive Viehweiden, wobei Viehhaltung in dem Gebiet insgesamt rückläufig ist. In früheren sowie in allen aktuellen Felduntersuchungen wurden in den Referenzgebieten sämtliche Ameisenkolonien erfasst, indem alle sichtbare Neststrukturen lokalisiert und deren Position mit einem GNSS-Handgerät aufgezeichnet wurde. Das Vorhandensein erkennbarer Nesthügel galt als primäres Merkmal für die Identifikation eines Ameisennests. Zusätzlich wurde die Nestaktivität nach den folgenden Anzeichen ermittelt; (1) Vorhandensein aktiv genutzter Ameisenstraßen, (2) Existenz von frisch geschnittenem Blattmaterial auf den Ameisenstraßen oder in unmittelbarer Nähe der Nesteingänge, und (3) das Erscheinen von Arbeitern nach einer Störung am Nesteingang. Für jede Kolonie wurde die Artzugehörigkeit mittels einschlägiger morphologischer Merkmale verifiziert.

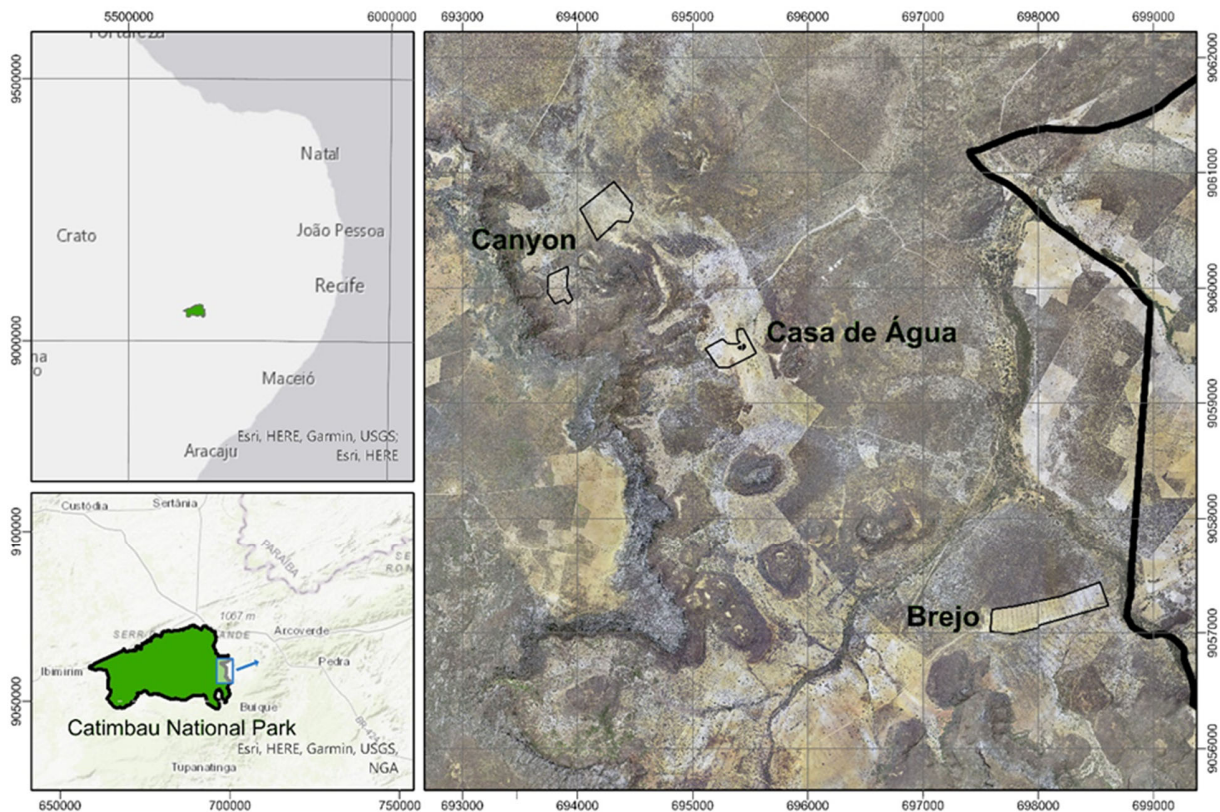


Abb. 2: Lage der Untersuchungsgebiete "Brejo", "Canyon" und "Casa-d'água"

Alle Untersuchungsgebiete wurden 2018 mit Hilfe von UAV-Flügen kartiert, die zu hochauflösenden digitalen Orthofotomosaiken mit einer hohen Auflösung (engl. high resolution, kurz: HR) von 5x5 cm und digitalen Oberflächenmodellen mit einer Auflösung von 10 cm führten. Für die Luftaufnahmen wurde ein handelsüblicher Quadrocopter (DJI Phantom III) verwendet, dessen Flughöhe von 50 m (Kartierung der Untersuchungsgebiete) bis hinunter zu 2 m (Detailaufnahmen einzelner Nester) reichte. Die Onboard-Kamera verwendet einen 1/2,3"-CMOS-Sensor und bietet eine effektive Auflösung von 12,4 Megapixeln. Das Objektiv hat eine Brennweite von 20 mm. Die Luftbilder wurden auf der Grundlage des integrierten GPS vorreferenziert und mit einem bestehenden Datensatz aus dem staatlichen Programm "Pernambuco Tridimensional" korrigiert.

Die erreichbare Genauigkeit in Höhe und Lage hängt von einer Vielzahl an Kriterien ab, darunter sind Flughöhe, Güte und Kalibrierung der Kameras oder die Ausgangspunkte zur Referenzierung (SANZ-ABLANEDO et al. 2018). Die relativen Genauigkeiten für handelsübliche UAV-basierte Oberflächenmodelle aus photogrammetrischen Auswertungen liegen bei etwa dem 1-3-fachen der Bodenauflösung, was für die Untersuchungen im Nahbereich als ausreichend angesehen wird. Insbesondere für niedrige Flughöhen besteht zusätzlich die Möglichkeit, Oberflächen und Kubaturen mit hohen Genauigkeiten auch ohne Bodenkontrollpunkte zu erfassen, wenn zusätzlich Maßstäbe verwendet werden können (MADOUBI et al. 2021). Zusätzlich zu den Erhebungen aus großer Höhe wurden sehr hochauflösende Bilder (engl. very high resolution, kurz: VHR) von 12 identifizierten Neststandorten sowohl per Drohne als auch per Bodenfotografie aufgenommen, um

eventuelle Unterschiede in der Genauigkeit ableiten zu können. Da die absolute Genauigkeit für diese Frage weniger wichtig war, wurden als Kontrolle lokale Referenzobjekte auf der Grundlage von digitalen 12-Bit-Markern und Schachbrettzeichen verwendet. Diese Bilder wurden als Grundlage zur volumetrischen Modellierung der Bioturbation einzelner Ameisennester verwendet. Die daraus entstandenen Modelle werden im Folgenden als VHR-Modelle bezeichnet.

Im Dezember 2021 erfolgten erneut Befliegungen in den Untersuchungsgebieten. Dazu wurde ein DJI P4 RTK Quadrocopter eingesetzt. Die Onboard-Kamera verwendet einen 1"-CMOS-Sensor und bietet eine effektive Auflösung von 20 Megapixeln. Das Objektiv hat eine Brennweite von 24 mm. Mit Flughöhen von 90 m konnten digitale Orthofotos mit ca. 3×3 cm Auflösung erzeugt werden. Analog zu 2018 wurden auch Detailaufnahmen einzelner Nester mit Flughöhen unter 5 m erzeugt, um Veränderungen in der Oberflächenstruktur erfassen zu können.

2.3 Nestkartierung

Zur Erfassung der Verbeitung sowie zur Kalkulation der durchschnittlichen Nestoberflächen wurden die bekannten, per GNSS markierten Nester innerhalb einer GIS-Umgebung (ArcGIS Pro) in den Orthofoto-Mosaiken (HR) identifiziert und anschließend auf dieser Grundlage manuell kartiert. Für jedes detektierte Nest in den Orthofotomosaiken beider räumlichen Auflösungen (HR & VHR) wurde die jeweilige Nestfläche durch Erfassung der Form entlang der Nestkontur bestimmt.

Eine methodische Unterscheidung musste zwischen einem ökologischen und dem technischen Kartierungsansatz getroffen werden. Der methodische Unterschied bestand darin, dass beim sog. technischen Ansatz konsequent die gesamte Vegetation um das Nest herum ausgeschlossen und nur der unbedeckte Boden erfasst wurde, um eine Referenz für spätere spektrale Untersuchungen der helleren Nestflächen zu schaffen. Bei dem sog. ökologischen Ansatz wurde der gesamte Nestbereich auf der Grundlage des biologischen Fachwissens über die Struktur von Ameisennestern erfasst, einschließlich abgelegener Eingänge ohne sichtbare Ablagerungen. Die verschiedenen Ansätze sollen es später ermöglichen, aus der automatischen Erfassung der hellen Nestoberfläche auf die Gesamtgröße eines Nests schließen zu können (Abb. 4).

Alle bekannten Ameisennester wurden anhand vorgegebener Kriterien als Polygone in einer GIS-Umgebung kartiert (FINKLER 2020). Dabei konnte während der Kartierung bereits auf den Zustand des Nests (aktiv/inaktiv/zerstört) geschlossen werden.

Im Allgemeinen heben sich die Nester in ihrem Kerngebiet aufgrund des helleren Farbtons des Mineralbodens am deutlichsten von ihrer Umgebung ab. Aufgrund von stark variierenden Bodenfarben in den Untersuchungsgebieten und den zum Rand hin graduellen Farbverläufen erwiesen sich die Standardmethoden zur Kantenerkennung als nicht geeignet. Höhere Vegetation oberhalb eines identifizierten Ameisennests wurde bei der Kartierung nicht ausgelassen aber in den der Bioturbationsberechnung zugrundeliegenden Punktwolkenmodellen entfernt. Problematisch für eine Detektion über Luftbilder erscheinen Nester unterhalb von Bäumen und hohen Sträuchern mit hohen Anteilen an Bedeckung.

Betrachtet man nur diejenigen Nester, die einwandfrei erkennbar und nicht weitgehend zerstört sind, konnten 66 Nester einwandfrei kartiert werden. In den Ergebnissen zeigte sich zusätzlich, dass die durchschnittliche Größe der Nestoberflächen zwischen den Untersuchungsgebieten

variiert. So liegen die durchschnittlichen Nestflächen in den Gebieten Canyon und Casa ca. 30 bzw. 20 m² über denen im Gebiet Brejo. Inwiefern hier die Bodenbedingungen oder das Nahrungsangebot eine Rolle spielen, muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Tab. 1: Ergebnisse der Nest-Kartierung in den drei Untersuchungsflächen mit 5×5 cm Auflösung HR

	Anzahl Untersuchungs-nester	Mittlere Nestgröße (m ²)	Minimale Nestgröße (m ²)	Maximale Nestgröße (m ²)
Brejo	38	72,74	36,15	215,12
Canyon	21	100,89	37,63	180,43
Casa	7	92,92	48,21	157,46
gesamt	66	83,84		

2.4 Berechnung der Bioturbation

Zwölf aktive, bereits mehrjährig bestehende Ameisennester wurden 2018 per UAV mit einer resultierenden Bodenauflösung im Orthofoto von 5x5 mm (VHR) erfasst. Diese Bilder bildeten die Grundlage für die volumetrische Modellierung der Bioturbation einzelner Ameisennester. In einem weiteren Verarbeitungsschritt wurde das Nesthügelvolumen dieser detaillierten Nester auf der Grundlage digitaler Oberflächenmodelle (DOM) berechnet. Für die Berechnung wurden die durch ökologische Konturierung ermittelten mittleren Nestflächen berücksichtigt.

Um der komplexen Topographie Rechnung tragen zu können und den Effekt von geneigten Oberflächen zu kompensieren, wurde die volumetrische Berechnung direkt an die Nestmorphologie angepasst. Bei dieser Vorgehensweise wird das Volumen jedes Nests in Bezug auf eine vorgegebene virtuelle Oberfläche als normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDOM) gebildet. Diese Bezugshöhe wird direkt durch die Lage und Höhe der Nestkontur vorgegeben.

Um dies zu erreichen werden zunächst sämtliche Polygonstützpunkte (engl. vertices) der kartierten Flächen mit den an dieser Stelle ermittelten Höhen aus den Flächenmodellen versehen. Mit Hilfe dieser Punkte wird eine interpolierte Fläche konstruiert, die im weiteren Verlauf als Referenzhorizont oder Urgelände dient. Dieses Urgelände schneidet die eigentliche Neststruktur und stellt eine vereinfachte Geländeoberfläche ohne Nest dar.

Subtrahiert man diese Fläche von dem digitalen Oberflächenmodell mit Nest, erhält man ein Differenzmodell in Form eines normalisierten digitalen Oberflächenmodells (nDSM), bei dem die ursprüngliche Geländeoberfläche eine Höhe von 0 hat (Abb. 3). Diese Methode funktioniert auch bei komplexem Relief, jedoch ist es hier wichtig zu berücksichtigen, wie hoch die Kubaturen im Vergleich zum gesamten Höhenunterschied sind. Je größer der Unterschied zwischen Nesthöhe und Relief, und je geringer die allgemeine Rauheit der Oberfläche, desto geringer wird der Fehler bei der Berechnung der Kubatur sein. Die hier kartierten Nester sind grundsätzlich auf schwach geneigten Stufenflächen zu finden. Die Stufenhänge sind frei von Nestern. Größere Fehler aufgrund starker Reliefunterschiede sind daher nicht zu erwarten.

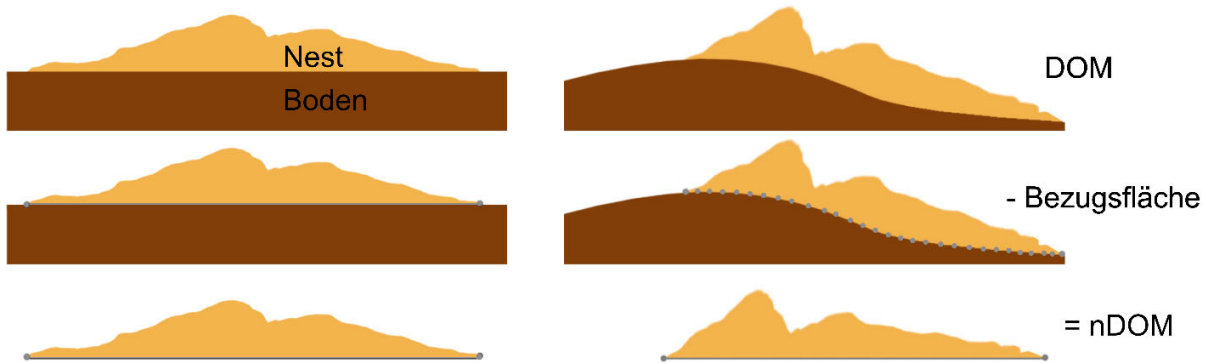


Abb. 3: Schematische Ableitung eines nDOM

Die Berechnung von oberflächlichen Erdvolumina kann grundsätzlich mit unterschiedlichen Methoden, wie Dreiecksvermaschung oder Trapezberechnung erfolgen. In aller Regel sind dabei zunächst Flächen zu berechnen, die im Anschluss eine Höhenkomponente und eventuell eine Bezugshöhe erhalten. Bei digitalen Geländemodellen bietet sich die Berechnung über die Rastermethode an. Die Fläche liegt im digitalen 2,5 D-Modell in Form gleichmäßiger quadratischer Zellen (Fläche eines Pixels= A) mit jeweils einem Höhenwert (h) vor. Bei der Bezugshöhe Null ergibt sich für das Volumen einer Zelle die Rechnung $V = h * A$. Innerhalb von ArcGIS Pro kann mit Hilfe der Funktion „Oberflächenvolumen“ (engl. surface volume, 3D-Analyst) dann das Volumen eines Körpers zwischen einer digitalen Oberfläche und einem Urgelände (Höhe = 0) oder einer beliebigen Bezugsebene berechnet werden. Berechnet man das Volumen oberhalb (aufgeworfene Fläche) und unterhalb der Bezugshöhe (ausgehobene Eingänge) erhält man das gesamte Volumen des oberflächlichen Nestanteils. Zur Kalkulation der Bioturbation wurde jedoch nur das Volumen oberhalb der Bezugsfläche herangezogen (Tab. 2). Bei der photogrammetrischen Erfassung dieser Daten wird auch die Höhe der Vegetation erfasst und fließt so in das digitale Oberflächenmodell (DOM) ein. Mit Hilfe der technischen Konturierung der Nestoberfläche kann die umgebende Vegetation, d. h. die Vegetation im Randbereich des Ameisennests, aus der Modellierung ausgeschlossen werden, nicht aber die Vegetation, die sich möglicherweise direkt auf der Oberfläche des Nesthügels befindet.

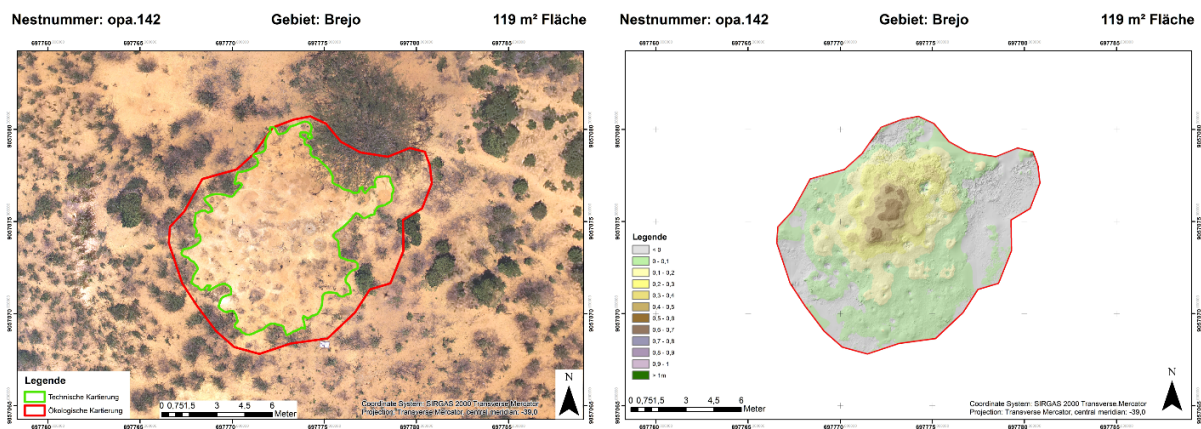


Abb. 4: Kartierung (links) und abgeleitetes nDOM (rechts) eines Nests im Untersuchungsgebiet Brejo

Daher muss die Vegetation entweder manuell oder durch Klassifizierung von Bodenoberfläche und Vegetation entfernt werden, was nicht immer ohne Rückstände möglich ist. Um diese Ungenauigkeiten bei der Darstellung der Nestoberfläche und bei der Bestimmung des Nesthügelvolumens zu reduzieren, wurden die Modelle zusätzlich durch Tiefpassfilterung geglättet.

Von den vorhandenen 12 Nestern musste bei zwei nahe beieinander liegenden Nestern davon ausgegangen werden, dass diese zusammenhängen und nur von einer Kolonie bewohnt werden. Daher reduziert sich die Auswertung auf insg. 11 Nester. Zusammenfassend lässt sich auf dieser Basis ableiten, dass es zu auffälligen Unterschieden in der maximalen Fläche der Nester gegenüber der Kartierung auf Grundlage der 5 cm HR-Daten gibt (Tab. 1), da auf der hochaufgelösten Grundlage (VHR) kleine Eingänge, die ebenfalls zur Struktur des Nests gehören besser erkannt werden können und somit weitere Flächen zur Nestfläche einbezogen werden. Farbunterschiede treten hierbei stärker in den Hintergrund. Zum anderen lässt sich erkennen, dass das Verhältnis von ausgehobenem Material zur Nestfläche trotz der Variation in der durchschnittlichen Größe stabil bei ca. 0,1 (m^3/m^2) bleibt. Durch die Berechnung weiterer Nestvolumina im Untersuchungsgebiet die auf Grundlage der Geländekampagne im Dezember 2021 durchgeführt werden können, sind weiterführende Ergebnisse und insbesondere eine Erhöhung der Nestanzahl erwartet.

Tab. 2: Zusammengefasste Ergebnisse der Volumenberechnung von 11 Nesthügeln auf Basis der hochaufgelösten Grundlage (VHR). Angegeben ist das mittlere Bodenvolumen pro m^2 Nestoberfläche

	Ökologische Kartierung (VHR)			
	Mittlere Nestgröße (m^2)	Bodenvolumen (m^3 pro m^2)	Anzahl Nester	max m^2
Brejo	151,70	0,10	4	224,42
Canyon	104,21	0,12	5	210,06
Casa	146,78	0,10	2	169,94

2.5 Detailbetrachtung Nestentwicklung 2018 bis 2021

Die Kartierungen von 2018 und 2021 ermöglichen einen direkten Vergleich der Nestentwicklung und werden in den kommenden Wochen ausgewertet. Im aufgeführten Beispiel (Abb. 5) zeigte sich anhand der Orthofotos, dass die Nestgröße bei einem älteren Nest sich zwischen 2018 und 2021 kaum weiterentwickelt hatte. Dafür hatte sich die Zahl kleinerer Öffnungen deutlich erhöht. Ebenso zeigten sich einige neue größere Öffnungen, die mutmaßlich von Räufern stammen können. Die Vegetationsbedeckung im südlichen Randbereich hatte deutlich zugenommen. Trotz dieser Anzeichen zeigten frische Auswürfe aus dem Jahr 2021, dass dieses Nest eine aktive Kolonie enthielt. Außerdem zeigten auffällig helle Stellen im Nordosten Hinweise auf neu aufgeworfenes Material. Durch die Vegetationsbedeckung könnte aber bereits mit den Orthofotos aus 2018 nicht eindeutig eine Aktivität in diesem Bereich detektiert werden. Diese Problematik wird sich nur durch einen höheren Anteil an Schrägaufnahmen oder den Einsatz von UAV-gestütztem LiDAR beheben lassen

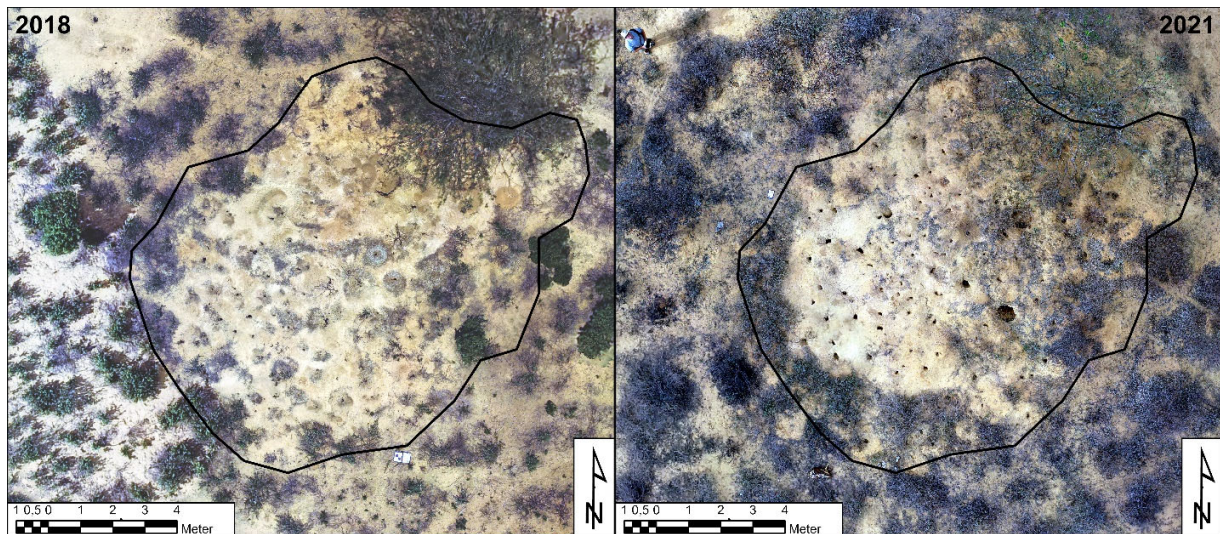


Abb. 5: Beispielhafte Darstellung eines Nests mit VHR Orthofotos aus den Jahren 2018 (links) und 2021 (rechts), kartierte Nestfläche (schwarz) von 2018

3 Fazit & Ausblick

UAV-gestützte Feldarbeit ermöglicht grundsätzlich eine einfache Quantifizierung der durch Blattschneiderameisen verursachten Bodenverlagerung an den Nestoberflächen. Außerdem wird eine Bestandsaufnahme der Nester, sowohl hinsichtlich ihrer Verbreitung und ihrer Größe als auch ihrer Aktivität erreicht. Dies ist besonders relevant, da es kaum andere Möglichkeiten gibt, die Verteilung von Ameisennestern auf Landschaftsebene zu kartieren. Neben den methodischen Aspekten müssen bei der Kartierung von Ameisennestern auch biologische Faktoren berücksichtigt werden, insbesondere, wenn ökologische Kriterien zur Bestimmung der Grenzen dieser Strukturen herangezogen werden. Dabei muss natürlich in erster Linie berücksichtigt werden, dass es sich um Momentaufnahmen der Nester handelt und somit die ökologisch wichtige zeitliche Dynamik außer Acht gelassen werden muss.

Eine Ableitung der gesamten Bioturbationsleistung der Blattschneiderameisen ist grundsätzlich durch die Verbindung von Expertenkartierungen und detaillierten Volumenberechnungen auf der Landschaftsebene möglich. Für eine exakte Abschätzung der Bioturbationsprozesse über die gesamte Lebensdauer eines Ameisennestes müssen zukünftig wiederholte Messungen der Oberflächenstrukturen, der Erosionsrate und auch genauere Untersuchungen des tatsächlichen Nestvolumens unterhalb der Bodenoberfläche durchgeführt werden. Erst wird es möglich sein, die Auswirkungen dieser Organismen auf der Landschaftsebene zu beurteilen.

Ein Upscaling des durch Blattschneiderameisen verursachten edaphischen Ökosystem-Engineerings soll mit Hilfe fortgeschrittener Fernerkundungs-Klassifikationsmethoden auf hochaufgelösten Satellitendaten (WorldView 2) durchgeführt werden. Bei erfolgreicher Durchführung der Untersuchungen wäre es erstmals möglich, das Vorkommen aktiver Nester großflächig zu erfassen und deren Aktivitäten und Einfluss auf Ökosysteme zu quantifizieren.

4 Literaturverzeichnis

- BIEBER, A. G. D., OLIVEIRA, M. A., WIRTH, R., TABARELLI, M. & LEAL, I. R., 2011: Do abandoned nests of leaf-cutting ants enhance plant recruitment in the Atlantic Forest? *Austral Ecol.*, **36**, 220-232.
- FINKLER, D., 2020: Ökosystem-Engineering von Blattschneiderameisen durch Bioturbation im Caatinga-Trockenwald (Brasilien). Diplomarbeit, Technische Universität Kaiserslautern, FB Biologie.
- FOWLER, H.G. & CLAVER, S., 1991: Leaf- cutter ant assemblies: effects of latitude, vegetation, and behavior. *Ant- Plant Interactions*, Huxley, C. R., Cutler, D. F. (Hrsg.), Oxford University Press, 51-59.
- FOWLER, H.G., PEREIRA DA SILVA, V., FORTI, L.C. & SAES, N.B., 1986: Population dynamics of leaf-cutting ants: a brief review. *Fire ants and Leaf-cutting ants*, Lofgren, C.S., Vander Meer, R.K. (Hrsg.), Boulder and London, Westview Press, 123-145.
- LEAL, I. R., WIRTH, R. & TABARELLI, M., 2014: The multiple impacts of leaf- cutting ants and their novel ecological role in human- modified neotropical forests. *Biotropica*, **46**, 516-528.
- MABOUDI, M., ELBILLEHY, A., GHASSOUN, Y. & GERKE, M., 2021: Improving the Internal Accuracy of UAV-Image Blocks Using Local Low-Altitude Flights and Scale-Bars, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B1-2021, 183-188, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-183-2021>.
- MEYER, S. T., NEUBAUER, M., SAYER, E. J., LEAL, I. R., TABARELLI, M. & WIRTH, R., 2013: Leaf-cutting ants as ecosystem engineers: topsoil and litter perturbations around *Atta cephalotes* nests reduce nutrient availability. *Ecological Entomology*, **38**, 497-504.
- MOREIRA, A., FORTI, L. C., ANADRADE, A. P., BOARETTO, M. A. & LOPES, J. F. S., 2004: Nest architecture of *Atta laevigata* (F. Smith 1858) (Hymenoptera: Formicidae). *Stud. Neotrop. Fauna E.*, **39**, 109-116.
- RÖMER, D. & ROCES, F., 2015: Available space, symbiotic fungus and colony brood influence excavation and lead to the adjustment of nest enlargement in leaf-cutting ants. *Insectes Sociaux*, **62**, 401-413.
- SANZ-ABLONADO, E., CHANDLER, J.H., RODRÍGUEZ-PÉREZ, J.R. & ORDÓÑEZ, C., 2018: Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sens.*, **10**(10), 1606. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>.
- SILVA, J.M.C., LEAL, I.R. & TABARELLI, M. (Hrsg.), 2017: *Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America*. Springer International Publishing.
- SIQUEIRA, F. F., RIBEIRO-NETO, J. D., TABARELLI, M., Andersen, A. N., Wirth, R. & Leal, I. R., 2017: Leaf-cutting ant populations profit from human disturbances in tropical dry forest in Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, **5**, 337-344.
- WEBER, N. A., 1966: Fungus growing ants. *Science*, **153**, 587-604.
- WIRTH, R., W. BEYSLAG, H. HERZ, R. J. RYEL, & HOELDOBLER. B., 2003: *Herbivory of leaf-cutter ants: a case study of *Atta colombica* in the tropical rainforest of Panama*. *Ecological Studies*, **164**, Springer-Verlag, Berlin, Germany.