

**HUGO FERRUFINO UGARTE, TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI,
JOAO ROBERTO DOS SANTOS, FRANCISCO DARIO MALDONADO**

Monitoring wylesień lasów deszczowych Amazonii na podstawie radiometrycznych przetworzeń zdjęć satelitarnych

The monitoring of the Amazon rainforest deforestation on the basis
of a radiometric analysis of satellite images

ABSTRACT

Ferrufino Ugarte H., Zawiła-Niedźwiecki T., dos Santos J. R., Maldonado F. D. 2008. Monitoring wylesień lasów deszczowych Amazonii na podstawie radiometrycznych przetworzeń zdjęć satelitarnych. Sylwan 7: 3-8.

The article discusses the results of research on radiometric processing of multitemporal satellite images in order to monitor deforestation in the Amazon region. Images acquired by Landsat ETM+ and CBERS-2 were used. The proposed algorithms enabled an objective analysis of deforestation and regeneration distribution within tropical rainforests. The advantage of the method is its simple algorithm and lack of need for atmospheric correction.

KEY WORDS

satellite remote sensing, tropical forest, deforestation, Bolivia, the Amazon

ADDRESSES

Hugo Ferrufino Ugarte – Państwowa Agencja Leśna Boliwii;
Avenida 2 de Agosto 2; Pasando Cuarto Anillo; Santa Cruz, Boliwia; e-mail: hferrufino@sforestal.gov.bo

Tomasz Zawiła-Niedźwiecki – Wydział Leśny; Uniwersytet Nauk Stosowanych;
Alfred-Möller-Str. 1; D-16225 Eberswalde, Niemcy; e-mail: tzawila@fh-eberswalde.de

Joao Roberto dos Santos – Państwowy Instytut Badań Kosmicznych – INPE; Avenida dos Astronautas 1758;
CEP: 12.227-010 Sao José dos Campos – SP, Brazylia; e-mail: jroberto@dsr.inpe.br

Francisco Dario Maldonado – Państwowy Instytut Badań Amazonii – INPA;
CEP: 515-12245-970 Manaus – AM, Brazylia; e-mail: maldonado@inpa.gov.br

Wstęp

Postępujące wylesienia obszaru Amazonii, a szczególnie lasów deszczowych, skłaniają nie tylko do poszukiwania sposobów powstrzymania tego procesu, ale także do stworzenia obiektywnych metod diagnostycznych pozwalających na ocenę stanu i zmian pokrywy leśnej obszaru, którego stabilność jest nie do przecenienia z punktu widzenia klimatu całego globu. Artykuł omawia wyniki prac nad monitorowaniem wylesień boliwijskich lasów deszczowych. Badania te prowadzone były przez Uniwersytet Nauk Stosowanych w Eberswalde (Niemcy), Państwowy Instytut Badań Kosmicznych w São José dos Campos i Państwowy Instytut Badań Amazonii w Manaus (Brazylia).

Obecnie trudno jest ustalić faktyczny rozmiar i zasięg przekształceń lasów Amazonii. Różne źródła zawierają odmienne dane dotyczące tych samych obszarów. Raporty FAO podają,

dla pięciu z sześciu krajów amazońskich, mniejsze wielkości wylesień niż analizy bazujące na meteorologicznych zdjęciach satelitarnych [Hansen i DeFries 2004]. Z drugiej strony oficjalne dane boliwijskie wskazują, iż wylesienia są sześć razy mniejsze niż to wynika z danych FAO [Ferrufino Ugarte 2007].

Porównywanie różnych raportów jest tym trudniejsze, że nie zawsze znana jest dokładność metod stosowanych przez poszczególne zespoły. Ciągłe otwarte pozostaje zagadnienie która metoda – terenowa czy teledetekcyjna – dostarcza precyzyjniejszych danych. Terenowa, w trudnych warunkach tropikalnych lasów deszczowych, wcale nie musi być dokładniejsza, a na pewno jest droższa. Ponadto pomiary terenowe nie są możliwe na ogromnym obszarze całej Amazonii. Dlatego też postanowiono sięgnąć po analizę danych teledetekcyjnych, a jej celem było opracowanie operacyjnej metody przetwarzania wieloterminowych zdjęć wykonywanych przez satelity środowiskowe, których zobrazowania dostępne są na rynku od ponad trzech dziesięcioleci.

Krajowe i międzynarodowe agencje kosmiczne współzawodniczą w pozyskiwaniu zobrażeń powierzchni Ziemi. Dzięki temu mamy obecnie stosunkowo łatwy dostęp do danych teledetekcyjnych, których parametry jakościowe są coraz doskonalsze. Usprawniany jest także system dystrybucji. Na przykład instytucje południowoamerykańskie mogą bez kosztów i w czasie zbliżonym do rzeczywistego pozyskiwać zobrazenia przeznaczone do badań środowiskowych. Ponadto organizacje rządowe w Brazylii udostępniły darmowe oprogramowanie do analizy danych [Ferrufino Ugarte 2007]. Nowoczesna technologia umożliwia automatyzację przetwarzania danych, co w konsekwencji pozwala na kartowanie lasów południowoamerykańskich na obszarze 2-5 mln km² rocznie [Ferrufino Ugarte 2007]. Wymaga to jednak doskonalenia metod przetwarzania danych satelitarnych, czemu służy niniejsza praca.

Jako poligon badawczy wybrano fragment prowincji Guarayos w północno-wschodniej Boliwii, która jest terenem masowego napływu ludności z mało urodzajnej zachodniej części kraju. Analizie poddano obszar o powierzchni 4122 km², ograniczony współrzędnymi 63°25'21'' i 62°47'27'' W oraz 16°55'09'' i 16°28'22'' S. W wyniku ogromnej presji imigracyjnej tworzy się tutaj nowe gospodarstwa rolnicze kosztem pierwotnych lasów deszczowych.

W latach 1993-2000 średnia roczna wielkość wylesień na obszarze Boliwii osiągała 270 000 ha [Ferrufino Ugarte 2007]. W prowincji Guarayos, o powierzchni 3 275 749 ha, w 1994 roku lesistość wynosiła 97,6%. W latach 1993-2000 ubywało rocznie średnio 0,8% lasów.

Materiały i metoda

W omawianym opracowaniu wykorzystano dwa typy zobrażeń satelitarnych – zdjęcia wykonywane przez: amerykańskiego satelitę Landsat 7 skanerem Enhanced Thematic Mapper+ (ETM+) oraz przez satelitę chińsko-brazylijskiego CBERS-2 (China-Brazil Earth Resources Satellite) (tab. 1). Satelita Landsat 5, mimo technicznych problemów, jest ciągle eksploatowany. Konkurencją dla niego mogą być przeznaczone do monitorowania lasów amazońskich satelity serii CBERS. Ich kolejne misje, o powiększonej do 5 metrów rozdzielczości terenowej, planowane są na lata 2008 (CBERS-4) i 2011 (CBERS-5).

Prace polegały na analizie danych obrazowych przez:

- filtracje obszarów wodnych (maskowanie),
- wybór kanałów spektralnych oraz obrócenie osi rzutowania danych radiometrycznych według metody RCEN (radiometric rotation controlled by no-change axis), będącej rozwinięciem analizy składowych głównych (principal components) w odniesieniu do lasów deszczowych [Maldonado 1999, 2004; Maldonado i in. 2002; Santos i in. 2005],

Tabela 1.

Parametry satelitów Landsat ETM+ i CBERS-2 wykorzystywanych w badaniach
Parameters of Landsat ETM+ and CBERS-2 satellites used in the study

Parametr	Landsat 7	CBERS-2
Data umieszczenia na orbicie	15.04.1999	2003
Orbita	heliosynchroniczna, 705 km	heliosynchroniczna, 778 km
Okres obrazowania globu (oraz czas jednego okrążenia kuli ziemskiej)	16 dni (99 min)	26 dni (100,26 min)
Zasięg sceny	185 km	113 km
Typ sensora	skaner ETM+	kamera CCD z obiektywem o ogniskowej 520 mm
Rejestrowane zakresy spektralne w μm (i rozdzielczość terenowa w m)	1: 0,450-0,515 (30) 2: 0,525-0,605 (30) 3: 0,630-0,690 (30) 4: 0,750-0,900 (30) 5: 1,550-1,750 (30) 6: 10,40-12,50 (60) 7: 2,09-2,35 (30) Pan: 0,52-0,90 (15)	1: 0,45-0,52 (20) 2: 0,52-0,59 (20) 3: 0,63-0,69 (20) 4: 0,77-0,89 (20) Pan: 0,51-0,73 (20)
Zapis cyfrowy	8 bitów (256 tonów szarości)	8 bitów (256 tonów szarości)
Termin zobrazowania	11-sie-01	20-lip-06

- nałożenie zobrazowań wynikowych oraz zlokalizowanie obszarów zmian,
- finalną edycję map.

Prowadzono je w trzech etapach:

1. Wybór kanałów spektralnych i ich wstępne przetworzenie,
2. Zmiana układu współrzędnych rzutowania danych radiometrycznych,
3. Operacje analityczne i edycja map.

W pierwszym etapie dokonano wyboru kanałów spektralnych, które mogą być użyteczne w analizach zmierzających do określenia zasięgu wylesień oraz dokonano geometryzacji zobrazowań. Ten etap miał na celu uzyskanie zdjęć o dobrej jakości radiometrycznej i geometrycznej. Metoda wykorzystana w niniejszej pracy nie wymagała stosowania korekcji atmosferycznych obrazu.

W drugim etapie prac zastosowano metodę RCEN, która polega na utworzeniu dwuwymiarowych wykresów, gdzie osie X i Y reprezentują tony szarości analizowanych zakresów spektralnych rejestrowanych w różnych terminach. Wykresy takie, w postaci elipsy, pokazują rozkład chmury punktów odpowiadających wartościom poszczególnych pikseli tworzących obrazy. Następnie dokonuje się obrotu osi współrzędnych tak, aby nowoutworzona oś X przechodziła przez dłuższą oś elipsy. Wskutek tej operacji otrzymuje się zmianę współrzędnych każdego piksela. Nowa oś przedstawia kierunek i długość najszerzego przekroju elipsy, co jest miarą największej wariancji danych. Wartości zarejestrowane na nowej osi X będą reprezentowały większe spektrum niż dane wejściowe, a więc informacja przekazywana przez nowy obraz będzie bogatsza niż w przypadku danych pierwotnych.

Trzeci etap prac obejmował finalne porównanie obrazów wieloterminowych w celu określenia lokalizacji obszarów zmian pokrywy roślinnej i zmian form użytkowania ziemi oraz edycję map wynikowych.

Do analiz wykorzystano systemy przetwarzania obrazu Erdas Imagine i ENVI.

Wyniki

Analizy zawartości informacyjnej zdjęć Landsat ETM+ i CBERS-1 CCD wykazały, że kanały zielony, czerwony i bliskiej podczerwieni (2, 3 i 4) są najbardziej użyteczne w analizach wieloterminowych. Kanały 3 i 4 były wykorzystywane do rozpoznawania przejrzystych wód bez zawartości sedymentacyjnych. Te ostatnie natomiast musiały być lokalizowane na podstawie kanału 4, który jest także najbardziej przydatny do analiz pokrywy leśnej.

Zdjęcia Landsat ETM+ były dobrej jakości. Natomiast szereg zobrazowań CBERS musiało zostać poddanych operacjom usunięcia zakłóceń spowodowanych błędami w zapisie obrazu.

Ważnym etapem prac było maskowanie wód. Szczególnie wody z zawiesiną sedymentacyjną, ze względu na ich podobieństwo do terenu zaliczanego do klasy odkrytych gleb oraz gleb zabagnionych, musiały być wyeliminowane z sklasyfikowanego obszaru. Dokonano tego przez digitalizację na ekranie komputera z wykorzystaniem kompozycji barwnej utworzonej z kanałów 5, 4, 3 (RGB) zdjęcia Landsat tworząc maski wód otwartych. Maski te posłużyły do eliminacji z dalszych analiz obszarów, których charakterystyki spektralne mogły spowodować błędy przy klasyfikacji zdjęć.

Dla każdej pary kanałów (zielony 2001 i 2006, czerwony 2001 i 2006 oraz podczerwony 2001 i 2006) obliczono parametry obrotu osi współrzędnych, a następnie na ich podstawie utworzono nowe obrazy, których własności opisuje równanie:

$$I_{\text{int}(n)} = -\text{ETM}_{2001} \cdot \sin\alpha + \text{CBERS}_{2006} \cdot \cos\alpha$$

gdzie:

$I_{\text{int}(n)}$ – wartość piksela obrazu przetworzonego,

n – zakres spektralny (2, 3 i 4),

ETM_{2001} – wartość piksela obrazu ETM+ z roku 2001,

CBERS_{2006} – wartość piksela obrazu CBERS z roku 2006,

α – kąt obrotu osi współrzędnych.

Kolejnym krokiem było nadanie obrazom w poszczególnych zakresach spektralnych odpowiednich wag w zależności od ilości przekazywanej informacji. Ten krok może być opisany wzorem:

$$I_{\text{int}(n)} = (-\text{ETM}_{2001} \cdot \sin\alpha + \text{CBERS}_{2006} \cdot \cos\alpha) \cdot \text{waga}_n$$

Następnie nałożono na siebie informacje z poszczególnych obrazów utworzonych na podstawie powyższego wzoru tworząc obraz wynikowy prezentujący obszary zmian. Dokonano tego przez według formuły:

$$I_{\text{detection}} = \sum I_{\text{int}(n)}$$

Obraz wynikowy został poddany edycji tak, aby przedstawiał obszary wylesione, odnowione oraz bez zmian. Dokonano tego za pomocą analizy histogramu wartości spektralnych poszczególnych pikseli. Centralna część histogramu, obrazująca maksimum częstotliwości, reprezentuje obszar, na którym nie zaobserwowano zmian w pokrywie leśnej. Wartości wykresu w lewo i prawo pokazują po dwie klasy regeneracji lasu (umiarkowane i silne) oraz jego degradacji (umiarkowane i silne).

Dokładność tak przeprowadzonej wieloterminowej analizy zdjęć satelitarnych osiągnęła wartość κ równą 0,72.

Obszary zdegradowane zajmują ponad 11% (tab. 2), co biorąc pod uwagę krótki, pięcioletni analizowany okres (sierpień 2001-lipiec 2006), jest wartością niepokojącą. Tereny wylesione zajęte zostały przez uprawy rolne (soja, ryż, kukurydza i pastwiska). Główna różnica pomiędzy silną i umiarkowaną degradacją polega na zmienności uwilgotnienia siedliska, która wpływa na możliwość jego rolniczego wykorzystania.

Tabela 2.

Struktura powierzchniowa zmian lesistości na analizowanym obszarze
Changes in the areal structure of forest cover in the discussed area

Nazwa klasy	Powierzchnia	
	[km ²]	[%]
Silna regeneracja	5,5	0,13
Umiarkowana regeneracja	32,63	0,79
Bez zmian	3433,59	83,29
Umiarkowana degradacja	440,3	10,68
Silna degradacja	34,2	0,83
Wody	176,12	4,27
Razem	4122,35	100

Obszary odnowień zajmują bardzo małą powierzchnię – poniżej 1%, a więc można stwierdzić, iż na analizowanym obszarze dokonuje się dramatyczna degradacja środowiska naturalnego.

Warto podkreślić, że intensywna transformacja opisywanego obszaru rozpoczęła się 10 lat temu, po zbudowaniu drogi, której przebieg jest widoczny na analizowanych zdjęciach satelitarnych.

Wnioski

- ✦ Zaprezentowana metoda radiometrycznej analizy wieloterminowych i wielospektralnych zdjęć satelitarnych pozwala na obiektywną analizę rozmieszczenia i stopnia degradacji deszczowych lasów tropikalnych. Dostarcza ona informacji powierzchniowych, które są odniesione przestrzennie.
- ✦ Zaletą metody jest możliwość wykorzystania różnych typów zobrazowań satelitarnych. Jednakże stosowane powinny być te, które rejestrują kanały zielony, czerwony i bliskiej podczerwieni.

Literatura

- Ferrufino Ugarte H. R. 2007. Change Detection in the Amazonian Rainforest with Radiometric Rotation Technique. University of Applied Sciences, Eberswalde. 77.
- Hansen M., DeFries R. 2004. Detecting long term forest change using continuous field of tree cover maps from 8 km AVHRR data for the years 1982-1999. *Ecosystems* 7 (7): 695-716.
- Maldonado F. D. 1999. Análise por componentes principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semi-árido brasileiro: Quixaba, Brasil. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (INPE-7180-TD/680): 116.
- Maldonado F. D. 2004. Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal da região semi-árida. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (INPE-7243-TDI/929): 314.

- Maldonado F. D., Santos J. R., Carvalho V. C. 2002. Land use dynamics in the semi-arid region of Brazil (Quixabá-PE): characterization by principal components analysis. *International Journal of Remote Sensing*, v.23, n.23: 5005-5013.
- Santos J. R., Maldonado F. D., Graça, P. M. L. 2005. New change detection technique using ASTER and CBERS-2 images to monitor Amazon tropical forest. In: *International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Seoul.

SUMMARY

The monitoring of the Amazon rainforest deforestation on the basis of a radiometric analysis of satellite images

The proceeding deforestation of the Amazon region, particularly of the rainforests, leads not only to a search for the ways of decrease this process, but also to the creation of diagnostic methods enabling evaluation of the status and changes of forest cover in the area stability of which is fundamental for global climate. The article discusses the results of the research related to the monitoring of Bolivian rainforest deforestation carried out by the University of Applied Sciences in Eberswalde (Germany), the National Institute for Space Research in Sao Jose dos Campos and the National Institute for Amazonian Research in Manaus (Brasil).

A part of the Guarayos Province in Northwest Bolivia – the area of a mass influx of people from the poor western part of the country – was selected as a study area. A territory covers 4122 km² and is limited by the coordinates 63°25'21" and 62°47'27" W as well as 16°55'09" and 16°28'22" S. As a result of a huge immigration pressure, new agricultural farms have appeared at the expense of the primeval rainforests.

Two types of satellite images (Table 1) were used in the study. They included images acquired by the US Landsat 7 satellite with an Enhanced Thematic Mapper+ (ETM+) and those by the China-Brasil Earth Resources Satellite (CBERS-2). The accuracy of the multi-temporal analysis of satellite images reached κ coefficient of 0.72.

The degraded fragments cover 11% of the area. Taking into consideration the short, 5-year period of study (August 2001 – July 2006), this figure arouses concern. The restocked areas take up less than 1%, which indicates dramatic degradation of the natural environment taking place in the area under study.

The presented method of radiometric analysis of multitemporal and multispectral satellite imagery allows an objective analysis of the distribution and degradation degree of tropical rainforests. It provides surface data with their geographical reference. The advantage of this method is the possibility to use different types of satellite images. However, those recording green, red and near-infrared bands should be selected.