

Mappe di uso e di copertura del suolo ottenute attraverso la classificazione di immagini Landsat-TM per la comprensione delle dinamiche in atto nelle regioni sub-Saheliane del Niger

Antoninetti M., Nutini F. (*); Boschetti M., Villa P., Bresciani M., Brivio P.A.

CNR-IREA, Via Bassini 15, 20133 Milano, 02-23699459, antoninetti.m@irea.cnr.it

(*) Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale, Via Celoria 2, 20133 Milano.

Riassunto

Il monitoraggio dello stato delle risorse naturali a scala locale nella regione africana del Sahel richiede lo sviluppo di strumenti cartografici di maggior dettaglio rispetto alle analisi di tipo regionale finora disponibili con dati satellitari a bassa risoluzione. Per valutare i cambiamenti di uso/copertura del suolo, riconducibili alla degradazione o al miglioramento della gestione delle aree agricole/pastorali, si sono utilizzate una serie di immagini Landsat relative ad annate diverse. Le classi di interesse identificate sono le aree agricole, i suoli nudi, la vegetazione naturale arborea/arbustiva e la vegetazione erbacea. L'identificazione delle differenti coperture vegetali è stata ottenuta grazie all'analisi delle risposte fenologiche alla pioggia, principale variabile guida dello sviluppo vegetazionale in queste aree, interpretando una serie multitemporale di dati di NDVI calcolati sulle immagini Landsat.

L'interpretazione dell'andamento fenologico, la foto interpretazione e le informazioni derivanti da letteratura specializzata consentono di utilizzare opportunamente le tecniche di classificazione supervisionate dei dati digitali per ottenere mappe di land cover ad alta risoluzione. Sono state così prodotte mappe di copertura e di uso del suolo per gli anni 2000 e 2007 sulle zone agropastorali del Niger. L'articolo presenta un confronto preliminare tra i prodotti cartografici ottenuti, con l'obiettivo di individuare, caratterizzare e comprendere le dinamiche dei cambiamenti in corso al fine di contribuire al monitoraggio, allo sviluppo ed alla gestione ottimale delle risorse naturali nel Sahel.

Abstract

This work is centered on African Sahel region, an area interested by an extensive famine and by chronic food emergency for local population during from the second half of the last century. Monitoring of natural and agricultural resources at local scale needs the development of systems with high cartographic detail, able to allow the change from regional analysis to more precise studies, as largely emphasized in various scientific papers. Different land cover maps, derived from multiyear Landsat imagery, have been compared to evaluate the changes of use/cover of a Sahel sub-area, directly traced back to a deterioration or improvement of agro/pastoral zones. The identified vegetation cover classes are: agricultural area, bare soil, natural tree/shrub, and grassland. The classes have been defined by means of interpretations of phenological response to rain, the main indicator of vegetation growth in this specific area, analyzing multitemporal sequences of Landsat NDVI images. Crops and animal pasture are renewed during the rainy season. The interpretation of phenological progress, photointerpretation, and other specific information from literature, finally allow the use of digital data supervised classification routines to produce high resolution land cover and use maps for the years 2000 and 2007 of a pasture and agriculture land in the Republic of Niger. The results show a preliminary comparison among different multiyear maps with the objective of identifying, characterizing, and understanding the dynamics of past and actual environmental changes, in order to offer a contribution in the development and protection of Sahel local population and nature.

Introduzione

Nel corso degli ultimi 35 anni le aree sub-Sahariane dell'Africa, a causa di una prolungata siccità, sono state interessate da anomali fenomeni antropici di migrazione e di pressione demografica, con conseguenti impatti negativi sulla vegetazione naturale, biodiversità, stabilità socio-economica e sicurezza alimentare (Brink, Eva, 2009). Infatti, lo sviluppo e la prosperità del Sahel Africano, una zona semi-arida di transizione fra il deserto del Sahara a Nord e la savana boschiva Sudanese a Sud, dipendono in gran parte dal regime delle piogge.

La FAO (*Food & Agriculture Organization*) mette a disposizione dati aggiornati relativi all'estensione delle foreste ed alla produttività agricola del Sahel. Tuttavia, queste informazioni, causa le complesse condizioni ambientali e logistiche dell'area, sono carenti in consistenza e completezza (Brink, Eva, 2009).

La disponibilità e le peculiarità di serie continue di riprese d'immagini telerilevate da satellite hanno significativamente migliorato le conoscenze sulle variazioni annuali ed intra-annuali della vegetazione anche in queste aree remote.

Le aree Saheliane si sono recentemente caratterizzate per una ripresa dei fenomeni piovosi e, di conseguenza, dello sviluppo di copertura vegetale. L'analisi di serie temporali di NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), ottenute da immagini da satellite a bassa risoluzione (1 km), mostra chiaramente un trend positivo nella copertura vegetale del Sahel (Huber et al., 2011). In particolare, il periodo 1994-2003 segna un passaggio verso una stagione molto più umida rispetto al passato, anche se non così umida come il periodo di massima piovosità registrata nel Sahel dal 1930 al 1965 (Anyamba, Tucker, 2005). Questa variazione positiva nel regime delle piogge ha portato a un consistente aumento delle aree agricole, in particolare le coltivazioni di miglio (Capecchi e Crisci, 2008). Inoltre, la relazione NDVI/piogge mostra che in alcune aree il comportamento della vegetazione presenta caratteristiche anomale rispetto ad altre aree simili in funzione delle attività delle popolazioni locali. L'analisi multitemporale a scala appropriata dei limiti di queste zone, che in funzione del regime delle piogge possono variare anche di 150 km ogni anno (Tucker, Nicholson, 1999), aiuta alla comprensione dei complessi fenomeni di desertificazione e degrado ambientale in atto (Hermann, Anyamba, 2005).

Una serie temporale (1999-2008) di dati NDVI derivati dai dati SPOT-Vegetation (VGT) sono stati recentemente utilizzati per monitorare l'evoluzione della vegetazione in Africa, nell'ambito di NARMA (*Natural Resources Monitoring in Africa*) del Progetto Geoland2 finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro (Nutini et al., 2010). Oltre ai dati NDVI sono stati utilizzati dati di pioggia RFE (*Rain Fall Estimate*) resi disponibili da FEWS NET (*Famine Early Warning System Network*) dell'Agenzia per lo Sviluppo Internazionale (US-AID) degli Stati Uniti. Non disponendo di un numero sufficiente di stazioni pluviometriche a terra, FEWS NET utilizza dati satellitari per produrre mappe di piovosità con 8 km di risoluzione spaziale ogni 10 giorni. L'analisi congiunta di dati NDVI e RFE ha permesso di identificare le anomalie locali della vegetazione che in parte potrebbero non essere collegate direttamente alle sole variazioni della stagione umida dell'area. Queste zone, essenzialmente utilizzate per attività antropiche di pastorizia ed agricoltura, sono caratterizzate da un aumento dei valori di NDVI anche quando la quantità di precipitazione sembra essere rimasta costante nel tempo, o, in alcuni casi, addirittura diminuita.

L'analisi dei valori di NDVI calcolati da dati Landsat TM a maggior risoluzione spaziale può quindi migliorare le capacità di caratterizzazione e comprensione delle dinamiche dei cambiamenti attualmente in corso in queste aree.

Area di studio

Il Niger è uno dei paesi più poveri al mondo, con i tre quarti della superficie coperti da deserti e con l'85% della popolazione interamente dipendente dalle magre risorse dell'agricoltura e pastorizia, che rappresentano il 40% dell'intero prodotto interno lordo. Il Niger comprende una zona unicamente pastorale a Nord, verso i grandi deserti Saheliani, ed una parte agro pastorale a Sud, sufficientemente umida per consentire le colture di cereali, essenzialmente miglio. Tuttavia il reticolo irriguo è

talmente poco sviluppato, meno del 2% della superficie coltivata, da rendere molto aleatoria la produzione agricola.

Se nel 2004 l'ONU prevedeva una nuova carestia alimentare per l'anno successivo, a causa della siccità e della concomitante invasione di cavallette, con una diminuzione dell'11% della produzione cerealicola e del 35% di quella foraggiera, e conseguente penuria alimentare per 2,5 milioni di persone, e perdita del bestiame per più di 10.000 allevatori, nel 2010 la FAO ha tuttavia stimato un aumento del 62% della produzione agricola rispetto all'anno precedente.

L'area di studio, situata a ridosso del limite con il Sahara, è la regione circostante alla città di Filinguè, nella provincia di Tillabéri (Figura 1). In questa regione si sono verificate numerose crisi umanitarie (2000, 2004 e 2010, FEWS NET) in relazione ad un degrado delle risorse naturali e della produzione agricola. In uno studio recente condotto nell'ambito NARMA uno dei *Core Information Service* (CIS) del progetto EU Geoland-2 (<http://www.gmes-geoland.info/>), tale area è risultata un hot spot critico (Nutini et al., 2010).

La città di Filinguè (14°21'8"N 3°19'0"E), con una popolazione di 11.700 abitanti, ed una elevazione media i 212 metri sul livello del mare, è la capitale del Dipartimento di Tillabéri, nella parte Sud-Ovest del Niger, a circa 350 km dalla capitale dello Stato, Niamey. L'area, che confina a Sud con il Dipartimento di Dosso, a Nord-Est con la regione di Tahoua e con la Repubblica del Mali, e a Ovest con il Burkina Faso, copre una superficie di 97.251 km², pari al 7,7% dell'intero Niger. La popolazione è pari a circa 2 milioni di abitanti con una densità di 19 abitanti per km².

Le piogge sono generalmente concentrate nei mesi più caldi, da Aprile-Maggio a Settembre-Ottobre, con valori prossimi a zero nei rimanenti periodi (Tabella 1)



Figura 1 – Ubicazione dell'area di studio in Niger. In grigio chiaro l'area coperta dalle immagini Landsat selezionate.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dec	Anno
mm	0.0	0.0	0.0	1.6	20.5	60.9	139.1	164.4	59.8	6.5	0.1	0.0	449.9

Tabella 1 – Valore medio delle precipitazioni annue a Filinguè, dal 1951 al 1980 (fonte: www.worldclimate.com).

Immagini da satellite

Le immagini utilizzate per questo lavoro sono state acquisite dai sensori Thematic Mapper (TM) e Enhanced Thematic Mapper (ETM+) dei satelliti americani della serie Landsat, in particolare il Landsat 5, attivo dal marzo 1984, ed il Landsat 7, attivo dal Luglio 1999. Le immagini sono

disponibili in modalità gratuita grazie al servizio *Global Visualization Viewer GloVis* dell'USGS (*United States Geological Service*). Tuttavia le concomitanti limitazioni dovute al fatto che non tutte le scene riprese al di fuori degli Stati Uniti sono regolarmente acquisite dall'USGS, ed alla pressoché costante copertura nuvolosa presente nel periodo di sviluppo della vegetazione (massima piovosità) hanno condizionato la scelta della immagini.

Per l'area di studio sono state quindi scelte 6 immagini Landsat 7 nel periodo Marzo-Settembre 2000 e 8 immagini Landsat 5 ed una ripresa con il Landsat 7 nel periodo febbraio- agosto 2007, dalla fine del periodo secco al massimo sviluppo della copertura vegetale, lungo la valle di Filinguè, in Niger (Tabella 2).

Tuttavia per l'anno 2000 alcune zone delle immagini sono risultate sempre coperte dalle nuvole riducendo di conseguenza l'area utile per l'analisi ed il confronto con la stagione 2007.

Le immagini sono distribuite, in formato GeoTiff, con la correzione del terreno standard (Livello 1T). L'accuratezza radiometrica e geometrica è raggiunta utilizzando i punti di controllo ricavati da i DEM disponibili (STRM, NED, CDAC, DTED o GTOPO30). Le immagini vengono ricampionate con il sistema di Convoluzione Cubica (Cubic Convolution, CC) nella proiezione geografica UTM-WGS 84.

Anno	Data	Satellite
2000	16 Marzo	Landsat 7
	19 Maggio	Landsat 7
	20 Giugno	Landsat 7
	22 Luglio	Landsat 7
	23 Agosto	Landsat 7
	24 Settembre	Landsat 7
2007	08 Febbraio	Landsat 5
	24 Febbraio	Landsat 5
	12 Marzo	Landsat 5
	31 Maggio	Landsat 5
	16 Giugno	Landsat 5
	02 Luglio	Landsat 5
	18 Luglio	Landsat 5
	03 Agosto	Landsat 5
28 Settembre	Landsat 7	

Tabella 2 – Elenco delle immagini Landsat acquisite, elaborate ed interpretate (path 192, row 50).

Metodologia

Come indicato da Brink, Eva (2009) per valutare i cambiamenti di uso/copertura del suolo in ambiente africano riconducibili a degradazione o miglioramento delle aree agricolo/pastorali è utile poter identificare almeno quattro macroclassi quali: aree agricole, suolo nudo, vegetazione naturale arborea/arbustiva e vegetazione erbacea. Poiché la firma spettrale della vegetazione varia in funzione di diversi parametri quali densità, stato fenologico e contenuto di umidità, analizzando le variazioni della risposta spettrale della vegetazione in differenti lunghezze d'onda e nel tempo, è possibile ottenere informazioni circa la tipologia di vegetazione esistente.

Le immagini sono state sintetizzate nell'indice spettrale NDVI utilizzando rispettivamente la banda TM3 (rosso 0.63-0.69 µm) e la banda TM4 (infrarosso vicino 0.76-0.90 µm) nella seguente formula $NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$.

Per poter effettuare un'analisi multitemporale dell'evoluzione della vegetazione è necessario l'utilizzo di misure quantitative e direttamente comparabili fra loro. Occorre perciò considerare e

quantificare sia le differenti condizioni di illuminazione sia l'influenza dell'atmosfera sulle singole riprese satellitari convertendo i valori di DN (*Digital Number*) in unità assolute di radianza spettrale ($W m^{-2} sr^{-1}$). Le immagini del sensore Landsat TM, sono state quindi calibrate per la radiometria (Chander et al., 2009), e corrette per gli effetti atmosferici con il codice *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S) (Vermote et al., 1997) utilizzando come input un profilo atmosferico tropicale e un modello di aerosol desertico con i valori di *Aerosol Optical Thickness* (AOT) ricavati dalla stazione AERONET di Banizoumbou (13°32'27" N e 02°39'54" E). I valori multitemporali di NDVI così ottenuti sono stati confrontati con i valori di NDVI dello strumento SPOT-VGT così come resi disponibili da NARMA (Combal et al., 2010).

Infine, per valutare comportamenti temporali distintivi delle differenti coperture di interesse si è condotta un'analisi dell'evoluzione dell'NDVI in relazione alla dinamica delle piogge della regione nell'anno 2007, utilizzando i dati RFE (*Rain Fall Estimate*), con risoluzione a terra di 8 km e temporale di 10 giorni, disponibili sempre nel CIS-NARMA.

Con lo scopo di individuare il migliore approccio metodologico per la classificazione delle immagini, si è confrontata l'accuratezza dei risultati ottenuti mediante l'algoritmo di *Maximum Likelihood* applicato a diversi dataset di immagini (tabella 3). È stata realizzata una classificazione di tipo spettrale (6 bande del TM/ETM+, esclusa la banda dell'infrarosso termico) per tre immagini considerate significative nell'identificare diverse fasi della evoluzione fenologica: periodo asciutto e massimo di piovosità. Inoltre sono state classificate differenti serie temporali di NDVI e infine è stata provata una combinazione dei due approcci spettrale e temporale. In tutte le classificazioni è stato sempre utilizzato lo stesso set di dati di training e di test.

	dataset	tipo classificazione
data singola	TM Febbraio	spettrale
	TM Luglio	spettrale
	TM Agosto	spettrale
serie temporale	2 date NDVI	trend
	3 date NDVI	trend
	8 date NDVI	trend
	9 date NDVI	trend
combinata	9 date NDVI + TM	spettrale + trend

Tabella 3 – Test di classificazione per l'anno 2007 con algoritmo "Maximum Likelihood" effettuati su singole immagini Landsat, serie temporali di NDVI e combinazione dei due approcci.

Risultati

Il confronto tra la serie di dati di NDVI ottenuti dalle immagini Landsat del 2007 e l'andamento decennale dell'NDVI SPOT/VGT (figura 2), indica una stretta corrispondenza tra i due andamenti temporali così come dimostrato dall'analisi di correlazione ($r^2 = 0.8$). Questo confronto conferma che le correzioni di tipo radiometrico e atmosferico effettuate permettono di ottenere un dato quantitativo comparabile ad altri prodotti satellitari di NDVI.

L'analisi della risposta dei dati NDVI alle piogge ha permesso di identificare diverse classi di copertura vegetazionale; tali dati sono quindi utilizzabili per interpretare il comportamento dei diversi tipi di copertura. In Figura 3 il profilo *a* mostra una risposta vegetativa positiva già alle prime piogge di maggio/giugno ed un NDVI che resta stabilmente più alto di quello di altre zone, indicando così la presenza di vegetazione arborea/arbustiva naturale. A differenza delle aree coperte da sola vegetazione erbacea, in queste zone l'indice NDVI non raggiunge mai valori paragonabili a quelli caratteristici dei suoli nudi. La vegetazione arbustiva ed arborea rappresenta quindi l'unica fonte di foraggio anche durante la stagione secca.

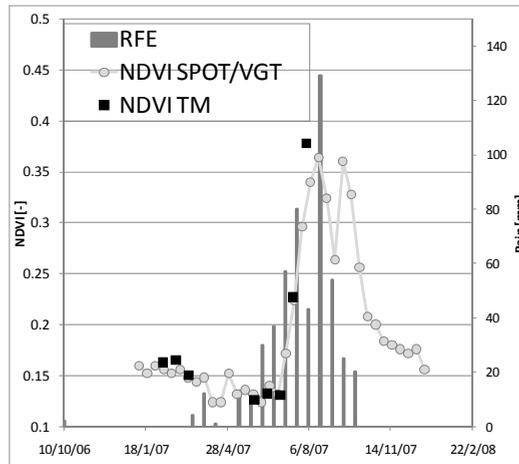


Figura 2 – Confronto fra andamento medio di dati RFE, NDVI-SPOT (grigio) e dati NDVI calcolati da immagini Landsat (nero).

Il profilo *b* in Figura 3 evidenzia una risposta tardiva alle piogge ma più intensa nel tempo. Queste aree sono interpretabili come zone coltivate poiché le pratiche agronomiche locali prevedono una semina unicamente in caso di piogge favorevoli, e questa pratica risulta in una risposta fenologica alle piogge posticipata rispetto alla vegetazione arbustiva.

Il profilo *c* in Figura 3 mostra una risposta della vegetazione alle piogge, oltre che tardiva rispetto ai casi precedenti, inferiore come intensità, con un massimo NDVI pari a 0.25 rispetto ai maggiori valori (0.40) dei due casi precedenti. Questo andamento è tipico di un sistema naturale erbaceo in cui la vegetazione non raggiunge il vigore di un campo coltivato a sorgo o miglio.

Il profilo *d* (Figura 3) non presenta alcuna stagionalità nell'NDVI, ad indicare un'area di suolo nudo durante l'intera annata, mentre il profilo di NDVI che identifica i corpi idrici mostra un suolo nudo che viene allagato con le prime piogge. Infatti il profilo *e* evidenzia che se ad inizio stagione delle piogge nelle aree umide è parzialmente presente la vegetazione, con l'aumento delle piogge tali aree vengono completamente sommerse.

Le differenze osservate sono diagnostiche dei differenti tipi di vegetazione e possono essere perciò utilizzate come chiavi interpretative per un processo di classificazione automatica.

Il contenuto informativo, in questa analisi preliminare, è stato messo in evidenza dalla classificazione delle serie di NDVI multitemporale. L'utilizzo di serie diverse di NDVI ha permesso di individuare quante e quali date siano necessarie per ottenere un prodotto di copertura vegetale ad una accuratezza accettabile.

Come mostrato dal grafico in figura 4, le classificazioni con la miglior accuratezza risultano essere quella che ha utilizzato le 6 bande dell'immagine di Agosto 2007 e quella multitemporale che prende in considerazione 9 date di NDVI (9NDVIa). Entrambe hanno un'accuratezza comparabile, anche se presentano degli errori in alcune classi di interesse.

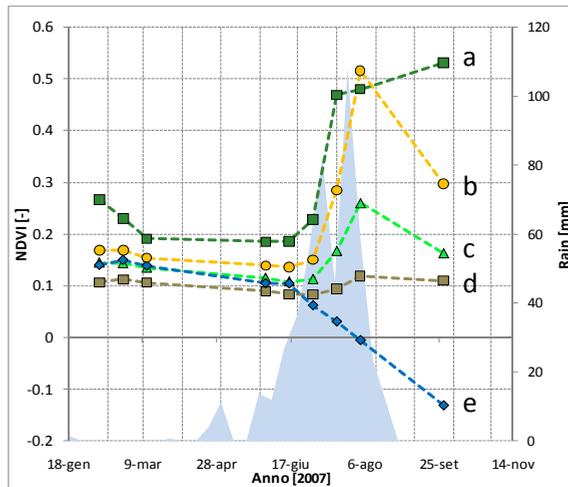


Figura 3 – Confronto tra le piogge e l'andamento temporale medio di NDVI nel 2007 dei training test individuati per le 5 classi di interesse: arbustiva (a), coltivata (b), erbacea naturale (c), suolo nudo (d) e zone umide (e).

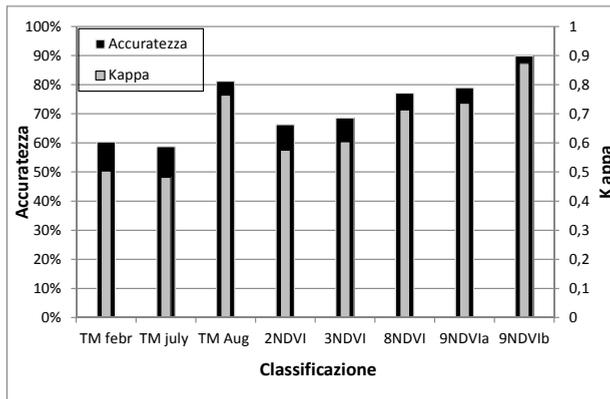


Figura 4 – Confronto tra le performance di classificazione (9NDVIb indica l'approccio combinato temporale e spettrale).

In particolare la classificazione spettrale (TM AUG) confonde l'arbustivo con l'erbaceo, a causa del vigore vegetativo tipico della stagione. Invece la classificazione temporale (9NDVIa) sovrastima l'agricolo e l'arbustivo. Questa seconda classificazione è stata usata per un ulteriore passo di classificazione (9NDVIb) limitatamente alle classi risultate sovrastimate. Come rappresentato nella figura 3, avendo le diverse classi una risposta diversa alle piogge, una classificazione spettrale nelle date in cui le classi sovrastimate si differenziano maggiormente dalle altre (agricolo su Agosto, arbustivo su Luglio) permette di ottenere una mappa di copertura del suolo con una maggiore accuratezza (Figura 4).

Le immagini riprese nel corso del 2000, come già accennato precedentemente, sono state utilizzate per un confronto qualitativo e non quantitativo. La copertura nuvolosa molto irregolare ma costante ha infatti impedito il confronto diretto fra le classi definite nella classificazione del 2007. Molti training sets scelti per la classificazione non potevano essere utilizzati nelle immagini del 2000.

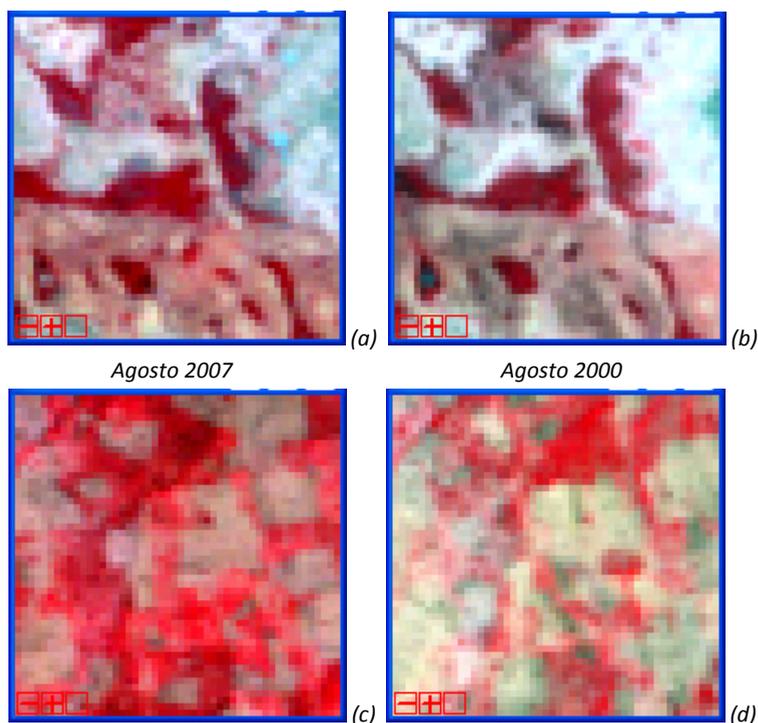


Figura 5 – Confronto fra due aree omologhe coperte da vegetazione naturale arbustiva (a e b) e da campi coltivati (c e d). Rappresentazione in falso colore RGB=432.

In attesa di ottenere una serie di immagini Landsat prive di nuvole per un altro anno, si è proceduto alla comparazione visiva delle aree comuni libere da nuvole nelle immagini del 2000 e del 2007. In particolare mentre le aree classificate a vegetazione arbustiva (*shrub*) appaiono essere costanti nel tempo, sia come posizione sia come densità (Figura 5, a e b), i campi coltivati, identificabili per la forma regolare e la vicinanza ad aree urbanizzate, mostrano una notevole variabilità (Figura 5, c e d), con una superficie maggiore per l'anno 2007.

Inoltre l'evoluzione dei valori di NDVI, misurati nelle immagini multitemporali del 2000, mostra una notevole similitudine con le curve ottenute analizzando la serie di immagini del 2007, per ognuna delle classi definite (figura 6). Le differenze relative ai singoli valori per data temporale sono collegabili direttamente alla quantità di pioggia caduta nel periodo.

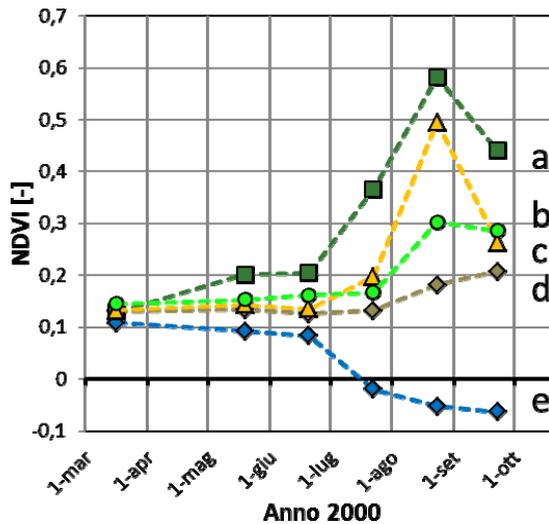


Figura 6 – Andamento temporale medio di NDVI nel 2000 nei training set liberi dalla copertura nuvolosa comuni a quelli identificati per l'anno 2007. Classi: arbustiva (a), coltivata (b), erbacea naturale (c), suolo nudo (d) e zone umide (e).

Conclusioni

La impossibilità di ottenere dati al suolo aggiornati e costanti nel tempo in aree africane remote e poco antropizzate rende l'utilizzo del satellite una validissima fonte di informazioni a costi molto contenuti. Le variazioni positive o negative nello stato della copertura vegetale che caratterizzano l'ambiente dell'area africana del Sahel possono essere così analizzate, interpretate e controllate nel tempo. In tal modo gli impatti sulla salute e l'alimentazione delle popolazioni locali possono essere individuati e in parte mitigati per tempo.

Le serie multitemporali dell'indice NDVI, analizzate insieme ai dati di precipitazione, anch'essi ottenuti da dati satellitari, ha permesso la stesura di mappe di uso del suolo, individuando le variazioni delle singole classi negli anni. In particolare le nuove aree a vocazione agricola possono essere quantificate e valutate nella loro evoluzione ed estensione.

La miglior risoluzione spaziale delle immagini Landsat ha permesso di meglio comprendere le anomalie vegetative evidenziate in precedenza nelle immagini SPOT Vegetation. Tuttavia la presenza di estese e continue coperture nuvolose, legate alla stagione delle piogge e quindi allo sviluppo fenologico della vegetazione, limita il confronto pluriennale. La disponibilità di ulteriori serie di immagini a media e alta risoluzione e lo sviluppo e l'applicazione in modalità semiautomatica di specifici algoritmi di classificazione potrà contribuire nel prossimo futuro ad un ulteriore avanzamento nel processo di comprensione delle complesse dinamiche delle aree desertiche e subdesertiche africane.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato condotto nel quadro del progetto GEOLAND-2 che è un Collaborative Project (2008-2012) finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro (progetto numero 218795), <http://www.gmes-geoland.info/>.

Bibliografia

- Anyamba A., Tucker C.J. (2005), "Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003", *Journal of Arid Environments*, 63:596-614.
- Brink A.B., Eva H.D. (2009), "Monitoring 25 years of land cover change dynamics in Africa: a sample based remote sensing approach", *Applied Geography*, 29:501-512.
- Capecchi V.A., Crisci A., (2008), "Analysis of NDVI trends and their climatic origin in Sahel 1986-2000", *Geocarto International*, 23(4):297-310.
- Chander G., Markham B. L., Helder D. L. (2009). "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors", *Remote Sensing of Environment*, 113: 893-903.
- Combal B., Bartholomè E., Brivio P.A., Boschetti M., Stroppiana D., Martini M., (2010), "The NARMA-geoland2 e-station an Earth Observation based decision support system tool for real time environmental monitoring in Africa", *ISPRS GI4DM*, Torino (Italy), 2-4 February 2010, CD, ISBN 978-88-903132-3-3
- Hermann S.M., Anyamba A., (2005), "Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate", *Global Environment Change, Part A*, 15 (4): 394-404.
- Huber S., Fensholt R., Rasmussen K. (2011), "Water availability as driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007", *Global and Planetary Change*, in stampa
- Nutini F., Boschetti M., Brivio P.A., Bartholomè E., Hoscilo A., Stroppiana D., Bocchi S. (2010), "Analysis of vegetation pasture climate response on Sahel region through 10 years remoted sensed data", *Proc. of SPIE Remote Sensing for Agriculture, Ecosystem and Hydrology XII*, edited by C.M.U. Neale, and A. Maltese, SPIE vol. 7824.
- Tucker C.J., Nicholson S.E. (1999), "Variations in the size of the Sahara desert 1982-1999", *Ambio*, 28:587-591.
- Vermote E. F., Tanrè D., Deizè J. L., Herman M., Morcrette J. J. (1997), "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview", *IEEE Trans. on Geo. and Rem. Sens.*, 35: 675-686