

Contributo del telerilevamento da satellite alla comprensione dei fenomeni idrologici del fiume Congo

Mirco Boschetti (*), Francesco Nutini (*, **), Pietro Alessandro Brivio (*),
Etienne Bartholomè (***) Daniela Stroppiana (*)

(*) Consiglio Nazionale delle Ricerche -IREA, Via Bassini 15 20133 Milano, +390223699297, +390223699300
boschetti.m@irea.cnr.it, stroppiana.d@irea.cnr.it, brivio.pa@irea.cnr.it,

(**) Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale, via Celoria 2, 20133 Milano
nutini.francesco@gmail.com

(***) JRC-EC, Global Environmental Monitoring, via E. Fermi 1, Ispra, Varese, Italy
etienne.bartholome@jrc.ec.europa.eu

Riassunto

Natural Resource Monitoring in Africa (NARMA) del progetto Geoland2 ha lo scopo di contribuire allo sviluppo di una serie di sistemi di monitoraggio delle risorse naturali in Africa; in particolare per il bacino del Congo l'obiettivo è lo sviluppo di servizi in supporto alla gestione delle risorse idriche concentrandosi sul sistema di allerta per la navigazione data la sua importanza strategica regionale. L'analisi è stata condotta per approfondire le dinamiche del bacino dell'Ubangui, affluente del Congo, riguardo il rapporto tra portate, precipitazioni e copertura vegetale, sfruttando le serie temporali dei dati satellitari. Le dinamiche sono descritte grazie alle stime RFE di FEWS-NET per le piogge, ai dati radar altimetrici ENVISAT forniti da LEGOS per le portate e agli indici di vegetazione da dati SPOT-VGT per la vegetazione. Il confronto tra le portate misurate a Bangui con le misure radar altimetriche dimostra che le misurazioni radar possono essere utilizzate per stimare la portata del fiume, ove non sono disponibili misurazioni dirette. Questo risultato permette di focalizzare l'analisi sull'Uelè, affluente dell'Ubangui, confrontando i livelli idrometrici con le stime delle precipitazioni stagionali, indagando l'effetto della vegetazione sul rapporto portata-pioggia. I risultati mostrano che vi è una correlazione positiva pioggia-portate solo alla fine della stagione vegetativa, quando è minore l'intercettazione da parte della vegetazione e diminuisce l'evapotraspirazione. L'analisi delle variabili tra il 2003 e il 2008 contribuisce al dibattito sullo sviluppo dei sistemi di monitoraggio della dinamica fluviale.

Abstract

Natural Resource Monitoring in Africa (NARMA) is one of the Core Information Services of EU-FP7 project Geoland2. Congo basin is one of the target area where NARMA has to contribute to the development of AMESD/CEMAC services in support to management of water resources focusing on environmental aspects of watersheds. In this contest and to better understand dynamics that occur in the watershed, an analysis has been conducted on the relation between precipitation, river discharge and vegetation dynamics by exploiting available time series of Earth Observation data. Rainfall dynamics has been described using FEWS-NET RFE estimations, river discharge has been monitored using ENVISAT radar altimeter data provided by LEGOS laboratory and vegetation dynamics have been examined through vegetation indices available from long term series of SPOT-VGT data. The comparison between river discharge measured at Bangui (Central African Republic), gauging station and radar altimeter virtual station data demonstrated that these data can be used to estimate river discharge. Results on Uelè basin showed that a strong positive correlation is obtained between rain data and river discharge only at the end of the vegetation season when plants have reduced water demand for evapotranspiration and less intercept rain. Trend analysis on the considered time windows are provided and the contribution of these finding for river water alert monitoring system is discussed.

Introduzione

Il recente rapporto del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 4th) afferma che le regioni in via di sviluppo sono quelle più vulnerabili ai cambiamenti climatici e, tra queste, l'Africa è la più sensibile al problema (Boko et al. 2007). L'elevata crescita demografica del continente, con un tasso del 2-4%, ha esasperato i problemi ambientali ed economici tipici della regione come l'approvvigionamento idrico e la produzione di derrate alimentari. In questo contesto la variabilità climatica rappresenta un importante fattore limitante allo sviluppo di queste regioni, come dimostrato dall'elevato numero di eventi estremi quali siccità ed inondazioni la cui frequenza è estremamente aumentata nel corso degli ultimi 30 anni.

In questo quadro l'Unione Europea congiuntamente con l'Unione Africana ha promosso l'iniziativa AMESD (*African Monitoring of the Environment for Sustainable Development*) a cui contribuisce nell'ambito di GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*). In particolare l'azione NARMA (*Natural Resource Monitoring in Africa*) del progetto EU-FP7 Geoland2 ha l'obiettivo di fornire servizi e informazioni, derivati da telerilevamento satellitari, in supporto al monitoraggio e alla gestione sostenibile delle risorse naturali.

La gestione delle risorse idriche nel bacino del fiume Congo è l'obiettivo primario per *Communauté Economique et Monétaire des Etats d'Afrique Centrale* (CEMAC). In particolare, CEMAC è interessato a migliorare la gestione della navigazione lungo il fiume Ubangui, il maggiore affluente destro del Congo e importantissima via di comunicazione tra la città di Bangui (Repubblica Centrafricana) e Kinshasa (Repubblica Democratica del Congo) attraverso l'utilizzo di dati da telerilevamento per lo sviluppo di un sistema di allerta rapido per le condizioni di portate scarse (*Low Water Alert System*).

Nel bacino vi è una complessa interazione tra le piogge e le portate, soprattutto a causa dell'influenza della vegetazione nel ciclo idrologico. Alcuni dati qualitativi indicano che il 75-95 % delle piogge cadute nel bacino del Congo vengono intercettate ed evapotraspirate dalla fitta vegetazione (Hoare, 2007). Durante gli ultimi 30 anni si è osservata un incremento di scarse portate del fiume che ne hanno fortemente limitato la navigazione. Questo fenomeno può essere spiegato solo in parte con l'irregolarità delle precipitazioni (Orange et al., 1997; Laraque et al., 2001). Questo dato sottolinea la complessità dei processi che legano le portate fluviali alle precipitazioni. Orange et al., (1997) analizzando la relazione tra il valore medio annuale di pioggia (circa 1200 mm) ed il deflusso superficiale nel sotto bacino di Kotto ha evidenziato come più dell' 80% delle precipitazioni non raggiungono la rete delle acque superficiali. In accordo con queste osservazioni Shahin (2002) riporta che l'evapotraspirazione potenziale a Bambesa (03° 28' N, 25° 42' E) raggiunge circa 100 mm al mese (1200 all'anno) a fronte di una precipitazione media annuale di 1500 mm dimostrando l'importante ruolo della vegetazione in questo bacino.

Il presente lavoro si propone di indagare le relazioni tra piogge, portate e vegetazione nel bacino del Congo-Ubangui al fine di fornire informazioni utili al sistema di monitoraggio. Nell'area di studio le misurazioni locali dirette di queste variabili sono molto deficitarie per permettere una comprensione di un sistema così complesso, per questo motivo si sono utilizzati dati satellitari quale unica fonte informativa sistematica e spazialmente distribuita.

Materiali

Il bacino del fiume Congo è il secondo per superficie dopo quello del Rio delle Amazzoni, copre circa 3 700 000 km² ed ha una portata media di 40 000 m³/s (Orange et al., 1997). La maggior parte del bacino è incluso negli stati di Camerun, Repubblica Centrafricana, Repubblica del Congo, Angola e Repubblica Democratica del Congo. Le analisi del presente lavoro si sono concentrate sul sottobacino dell'Uele (figura 1 b) che rappresenta il maggiore affluente dell'Ubangui. L'analisi del Global Land Cover 2000 (GLC2000, Bartholomè et al., 2005) indica che il bacino dell'Uelè è coperto principalmente da foreste, in particolare la *Mosaic of Forest/Savanna* copre il 55% del territorio settentrionale e *Closed evergreen lowland forest* il 33% della parte meridionale del bacino.

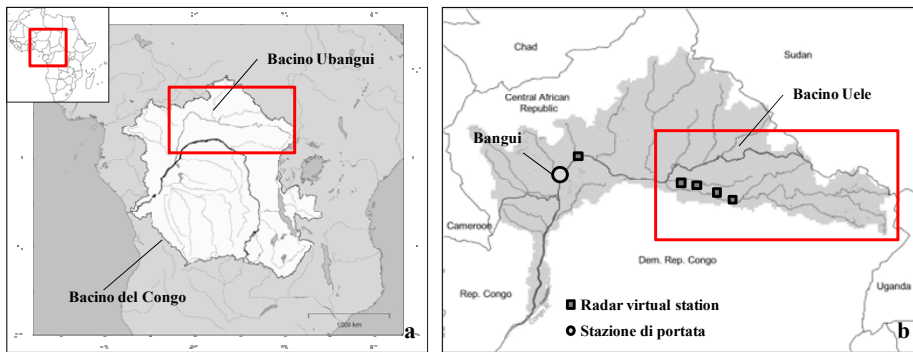


Figura 1 – Area di studio: il bacino del fiume Congo (a) e il dettaglio del sottobacino dell’Uele.

Data set

I dati utilizzati per la ricerca sono forniti da diverse agenzie e database online. Gli unici valori di portata disponibili sono quelli registrati giornalmente dalla stazione idrometrica di Bangui e forniti da AMESD per il periodo tra Marzo 1935 e Dicembre 2005. La dinamica della vegetazione è stata indagata mediante due indici spettrali, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, Rouse et al., 1974) e NDWI (*Normalized Difference Water Index*, Gao et al., 1996), derivati da SPOT-VGT (<http://www.vgt4africa.org/>) a partire dal dicembre 1998. Questi prodotti hanno risoluzione spaziale di 1 km e temporale di 10 giorni. Si è voluto testare l’indice NDWI in quanto presenta dei vantaggi rispetto al più noto NDVI di cui sono ben noti i problemi di saturazione in condizioni di alta copertura e densità vegetale e di rumore dovuti a contaminazione atmosferica (Karnieli et al., 2001; Boschetti et al., 2009). NDWI grazie all’utilizzo della banda SWIR al posto del RED potrebbe teoricamente fornire in ambienti tropicali un segnale più pulito ed un minore rumore di fondo.

Per la pioggia sono stati utilizzati dati RFE (*Rain Fall Estimate*): essi sono ottenuti da un’integrazione di osservazioni satellitari con misure di pioggia delle stazioni pluviometriche presenti nell’area (www.cpc.ncep.noaa.gov/products/fews/RFE2.0_tech.pdf). Questi dati, distribuiti da FEWS-NET (*Famine Early Warning Systems Network*) dell’ USAID (*United States Agency for International Development*), hanno risoluzione spaziale di 8km e temporale di 10 giorni.

Infine, sono stati usati dati di radar altimetro, processati da LEGOS (<http://www.legos.obs-mip.fr/en/soa/hydrologie/hydroweb/>) per i valori di altezza del corso d’acqua. Il radar altimetro fornisce misure di distanza tra la quota del satellite, definita rispetto ad una superficie di riferimento (ellissoide standard), e il livello altimetrico delle acque nel fiume. LEGOS fornisce dati sull’altimetria di diversi fiumi, riuniti in un database di 250 “stazioni virtuali” per i maggiori corsi d’acqua del globo. Sono state selezionate cinque stazioni relative all’Ubangui (ENV_930, ENV_214, ENV_543, ENV_1001 e ENV_586) ottenute dal 2002 con il radar altimetro del satellite ENVISAT dell’ESA, che ha un tempo di rivisitazione di 35 giorni.

Metodi

La prima analisi ha riguardato lo studio dei dati radar per verificare la possibilità di descrivere i cambiamenti di portata del fiume Ubangui tramite queste misurazioni remote. È stata condotta una analisi di regressione tra le portate misurate alla stazione di Bangui e l’altezza del fiume alla stazione virtuale più vicina (ENV_930) per ogni giorno in cui entrambe le misure sono disponibili. Le altre stazioni virtuali sono servite successivamente per ricostruire il comportamento idrico del fiume nel sotto bacino dell’Uelè ove non esistono misurazioni dirette. Per incrementare la frequenza temporale delle misurazioni radar relative ad un tratto dell’Uelè si sono selezionate diverse stazioni virtuali i cui dati sono acquisiti da orbite diverse. Per rendere confrontabili le misurazioni effettuate in punti diversi del fiume i valori altimetrici di ogni stazione virtuale sono stati processati come differenze rispetto alla media locale per il periodo considerato (2002-2008). Una volta ricostruito il

proxy delle portate del fiume Uelè per il periodo 2003-2008, è stata condotta una analisi degli andamenti temporali confrontando il livello idrometrico con le stime delle precipitazioni e le dinamiche vegetazionali. Il confronto è stato effettuato per valori mensili: per l'altezza idrometrica e gli indici vegetazionali sono stati considerati i valori medi mentre per le piogge sono state considerate le cumulate di tre decadi. Infine l'analisi di correlazione delle serie temporali è stata effettuata per indagare il ruolo della stagionalità nel rapporto precipitazioni-portate.

Risultati

La figura 2a**Figura** mostra il confronto tra i dati di portata raccolti alla stazione di misura di Bangui e le misurazioni radar in corrispondenza della stazione virtuale ENV_930 di LEGOS. I due dataset risultano altamente correlati ($n=18$, $r^2 = 0,96$) confermando quindi l'ipotesi di un possibile utilizzo dei dati radar come *proxy* delle portate fluviali, per quelle zone ove non sono disponibili misure dirette. Basandoci su questo presupposto è stata calcolata l'altezza relativa mensile dell'Uelè come una media delle misure altimetriche di quattro stazioni virtuali, ENV_214, ENV_543, ENV_1001 e ENV_586. La figura 2b mostra come una volta calcolata la differenza relativa sia possibile integrare diverse *virtual station* ricadenti sullo stesso tronco di fiume i cui valori siano stati acquisiti su orbite diverse. L'alta correlazione tra i dati delle diverse stazioni e le portate misurate a valle dimostra come sia possibile aumentare la risoluzione temporale del dato integrando più stazioni.

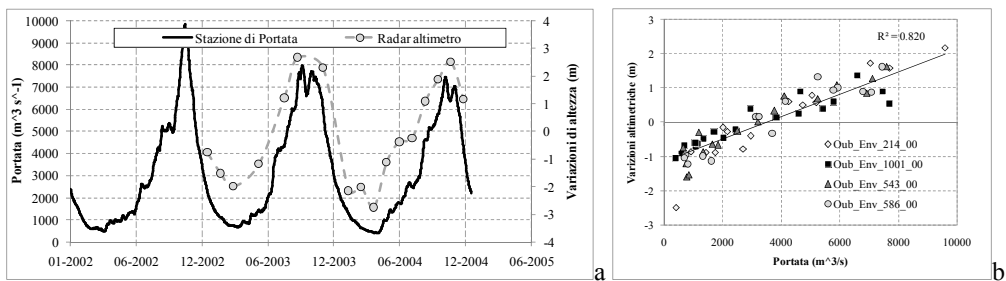


Figura 2 – Portate misurate a Bangui e stime satellitari (a); scatterplot tra i valori giornalieri.

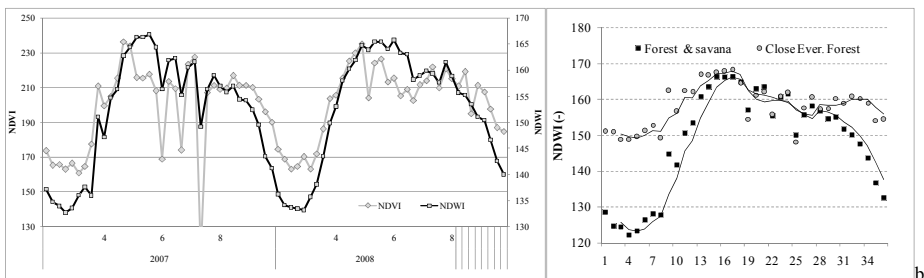


Figura 3 – Confronto tra andamento temporale di NDVI e NDWI per gli anni 2007-2008 (a). Andamento dell'NDWI per le due classi di copertura forestale presenti nel bacino (b).

La figura 3 mostra i valori medi dei due indici di vegetazione derivanti da dati SPOT-VGT. I due indici risultano altamente correlati ($r^2 > 0,72$) e descrivono coerentemente la stagionalità della copertura vegetale del bacino Uele. Come atteso, l'NDVI risulta più "rumoroso" dell'NDWI come indicato da numerosi *spike*. L'NDWI è perciò stato scelto per analizzare la dinamica della vegetazione per le due maggiori classi di copertura dell'area (*Mosaic of forest/savanna* and *Close evergreen forest*).

L'analisi dei dati ha mostrato come a discapito di regimi pluviometrici pressoché identici (dati non mostrati) le due classi di foresta abbiano comportamenti diversi (figura3b). La classe *Mosaic of*

forest/savanna mostra una spiccata stagionalità coincidente con il regime pluviometrico. E' interessante notare come anche la classe *Close evergreen forest*, tradizionalmente considerata invariabile nel corso dell'anno, mostri una stagionalità in relazione alle piogge. Questo dimostra come, anche se la foresta sempre verde non modifica la sua copertura, lo sviluppo di questa copertura sia caratterizzato da una certa stagionalità.

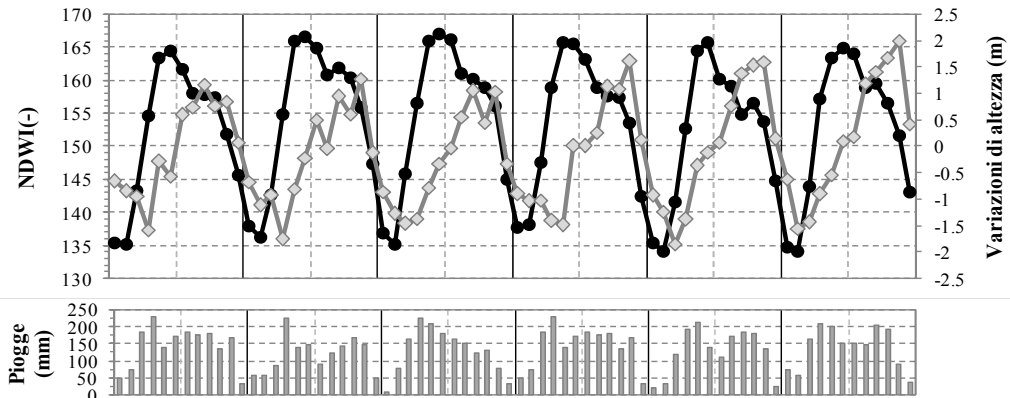


Figura 4 – Trend temporali di piogge, NDWI e altezze del fiume.

La figura 4 riporta la dinamica temporale delle variabili considerate per l'intero set di dati (2003-2008). La stagione delle piogge inizia in Marzo per arrivare al suo massimo tra Aprile e Maggio, mantenendosi ad alti livelli sino alla fine della stagione piovosa in Ottobre. I dati mostrano come questa dinamica governi il comportamento dell'ecosistema, in cui l'inizio della stagione vegetativa inizi solo poche settimane dopo l'inizio delle piogge. L'analisi di regressione pioggia-vegetazione dimostra quantitativamente questo fenomeno, il coefficiente di determinazione della regressione passa da 0,4 a 0,7 quando si analizzano i due dati con un lag temporale di un mese. Le portate fluviali mostrano un andamento differente rispetto a piogge ed NDWI. I massimi delle portate si evidenziano tra Ottobre e Novembre, con un notevole ritardo rispetto al picco delle piogge. Gli studi presenti in bibliografia (Ornage et al., 1997; Laraque et al., 2001) riguardo la relazione tra le piogge e le portate fluviali evidenziano la complessità del sistema e pongono l'accento sull'influenza del sistema delle acque sottosuperficiali. Tuttavia, tali osservazioni sono state ottenute analizzando dati annuali su di un lungo periodo e non tengono conto della stagionalità climatica. L'analisi della regressione tra i dati mensili di piogge e altezza idrometrica, effettuata prendendo in considerazione quattro finestre temporali, mostra che i dataset sono correlati positivamente solo tra Luglio-Settembre ($r^2 = 0,21$) e Ottobre e Dicembre ($r^2 = 0,50$) a differenza di Gennaio-Marzo ($r^2 = 0,12$) e Aprile-Giugno ($r^2 = 0,34$).

Dalla figura 4 si nota che la portata è massima quando cala lo sviluppo della vegetazione, vale a dire quando si riduce l'intercettazione e la domanda di acqua da parte della foresta. L'analisi di regressione multipla tra le portate (variabile dipendente) con le precipitazioni e l'NDWI (variabili indipendenti) indica che la variabilità delle portate è spiegata significativamente dall'NDWI ($***p < 0,0001$), piuttosto che dalla variabile climatica. Questo suggerisce che le portate sono condizionate dalla dinamica della vegetazione più che dal regime delle precipitazioni, confermando quanto supposto riguardo l'influenza della copertura vegetale nelle dinamiche idrologiche.

Conclusioni

Questo lavoro presenta i primi risultati di una analisi condotta nel quadro di NARMA Geoland2 con lo scopo di valutare la possibilità di fornire informazioni utili per il monitoraggio idrologico del fiume Congo-Ubangui. I dati radar altimetrici sono strettamente correlati con la portata del fiume,

anche se non è stato possibile testare la precisione delle stime radar non essendo disponibili misure in situ in corrispondenza delle stazioni virtuali. Si è verificato che le stime da satellite rappresentano un'utile *proxy* delle portate da usarsi in condizioni dove non vi siano misure di campo disponibili. Per sopperire alla frequenza dei prodotti ENVISAT (35 giorni), troppo bassa per un sistema di “allerta precoce” delle acque basse come richiesto da AMESD CEMAC, nel presente lavoro si sono integrate più stazioni virtuali acquisite con un'orbita diversa su zone del fiume considerate omogenee. Altri satelliti come Topex /Poseidon (1992-2002) e Jason (2001-oggi) con un ciclo orbitale di 10 giorni potrebbero rappresentare una soluzione al problema. I dati così trattati hanno consentito di esaminare la relazione tra precipitazioni e dinamiche vegetazionali nel bacino Uele. Le piogge stimate RFE e gli indici di vegetazione SPOT-VGT permettono di riprodurre in maniera distribuita il regime pluviometrico e le dinamiche delle aree vegetate nel bacino. L'analisi delle serie temporali mostra che l'altezza massima del fiume viene raggiunta solo dopo alcuni mesi rispetto al picco delle precipitazioni e che variazioni stagionali della foresta osservate con l'NDWI (meno rumoroso che NDVI) possano avere un effetto significativo sulle portate fluviali. Questi risultati sottolineano l'importanza dei fenomeni di intercettazione e di evapotraspirazione nella modellazione delle dinamiche idrologiche del bacino del fiume Congo. L'evapotraspirazione viene spesso considerata costante nelle foreste pluviali poiché esse non cambiano la loro copertura vegetale nell'arco di una stagione, tuttavia i risultati ottenuti su bacino dell'Ubangui suggeriscono la presenza di una certa dinamica stagionale in grado di influenzare i deflussi del bacino.

Bibliografia

- Bartholomé E., Belward A., (2005), “GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data”, *International Journal of Remote Sensing* 26(9), 1959-1977.
- Boko M., Niang I., Nyong A., Vogel C., Githeko A., Medany M., Osman-Elasha B., Tabo R., Yanda P., (2007), *Africa, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E. (editors), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 433-467.
- Boschetti M., Stroppiana D., Brivio P.A., Combal B., Bartholomé E., “La qualità delle osservazioni nelle analisi di serie temporali di dati NDVI a scala regionale in Africa”, *13a Conferenza Nazionale ASITA*, 1 - 4 dicembre 2009, Bari, 495-500 (2009).
- Gao B.C., (1996), “NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space”, *Remote Sensing of Environment* 58 (3), 257-266.
- Hoare A.L., (2007), *Clouds on the Horizon: The Congo Basin's Forests and Climate Change* (<http://www.rainforestfoundationuk.org/files/Global%20Warming%20Low%20PDF.pdf>).
- Karnieli A., Kaufman Y.J., Wald R.A., (2001), “AFRI-aerosol free vegetation index”, *Remote Sensing of Environment* 77 (1), 10-21.
- Laraque A., Mahe G., Orange D., Marieu B., (2001), “Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century”, *Journal of Hydrology* 245, 104-117.
- Orange D., Wesselink A.J., Make G., Feizure C.T., (1997) “The effects of climate changes on river baseflow and aquifer storage in Central Africa. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty” *Proc. Rabat Symposium* S1. IAHS Publ. 240, 113-123.
- Rouse J.W.J., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., (1974), “Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS”, *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351, December 10-14, 1973, Washington D.C., 309- 317.