

ANALYSE STATISTIQUE DES RELATIONS PLUIE-VÉGÉTATION AU FERLO (SÉNÉGAL)

CISSÉ S. ^(1,2), EYMARD L. ⁽²⁾, NDIONE J. A. ^(1,3), GAYE A. T. ⁽¹⁾

(1) Laboratoire Physique de l'Atmosphère et de l'Océan / ESP / Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP 5085 Dakar-Fann, Sénégal [soclod@locean-ipsl.upmc.fr ; atgaye@ucad.sn]

(2) Laboratoire d'Océanographie et du Climat Expérimentation et Approches Numériques / Université Pierre et Marie Curie, 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France [laurence.eynard@locean-ipsl.upmc.fr]

(3) CSE (Centre de Suivi Ecologique), BP 15532 Dakar-Fann, Sénégal, [jacques-andre.ndione@cse.sn]

Résumé – Sur le Ferlo, on étudie les variations des caractéristiques d'apport en eau (pluie / humidité du sol) et leurs impacts sur la croissance de la végétation naturelle. À l'échelle de l'entité homogène (sol/végétation), les données satellite de 2000 à 2010 sont analysées. L'objectif principal de cette étude est d'analyser la dynamique de la végétation par rapport à la disponibilité annuelle en eau durant la saison des pluies aux échelles saisonnières et inter annuelles en utilisant des approches statistiques à l'échelle de l'entité homogène.

Mots-clés : pluviométrie, végétation, télédétection, Sahel.

Abstract – *Statistical analysis of rain-vegetation relationships on the Ferlo (Senegal)*

On the Ferlo, we study variations of water yield characteristics (rain/soil moisture) and their impact on the growth of natural vegetation. On the scale of the homogeneous entity (soil/vegetation), satellite data from 2000 to 2010 are analyzed. The principal objective of this study is to analysis the vegetation dynamic relative to the annual water available during the rainy season at the seasonal and inter-annual scales using the statistical approaches at the homogenous entity scale.

Keyword: rainfall, vegetation, Remote Sensing, Sahel.

Introduction

Le cycle végétatif au Sahel est étroitement lié à la pluviométrie (Camberlin *et al.*, 2007) qui connaît de fortes fluctuations, affectant fortement les écosystèmes mais aussi l'activité humaine et donc l'économie régionale. De nombreuses études ont mis l'accent sur ces relations entre précipitations et croissance de la végétation (Nicholson *et al.*, 1990). Mais peu d'entre elles tiennent compte de l'homogénéité des écosystèmes (type végétation/type de sol) à l'échelle de la sous-région, correspondant à celle de l'activité humaine. Dans la région semi-aride du Sahel, le facteur le plus limitant pour la croissance des plantes est la teneur en eau dans la zone d'enracinement (Rambal et Cornet, 1982 ; Pierre *et al.*, 2011). Le cycle phénologique dépend ainsi à la fois du cumul des précipitations et de sa distribution spatio-temporelle. Cependant, la plupart de ces études se limitent à l'analyse de la pluviométrie moyenne, du cumul, des dates de début et de fin de la saison des pluies, alors que les variables intra-saisonnières telles que les pauses pluviométriques, leur fréquence, leur durée ont un impact durant la phase de croissance de la végétation. Les variations intra-saisonnières à l'échelle de la sous-région ont été peu étudiées notamment parce que les données *in situ* sont souvent rares. Les produits satellitaires sont les seules données disponibles couvrant toute la région du Ferlo, permettant d'analyser ces variations dans la sous-région sur plusieurs années. Les principaux objectifs de cette étude sont donc d'analyser les relations entre la variabilité spatiale des précipitations et de la végétation en fonction des types de sol et formations végétales ; d'examiner les impacts des fluctuations intra-saisonnières des précipitations sur le cycle phénologique de la végétation, en prenant en compte les différences spatiales à l'intérieur du Ferlo.

1. Données et méthodes

1.1. Zone d'étude

Le bassin versant du Ferlo (cf. Figure 1 dans Cissé *et al.*, 2012) se situe au cœur du domaine climatique sahélien sénégalais entre les latitudes 16°15 et 14°30 Nord et les longitudes 12°50 et 16° Ouest. La végétation est constituée principalement de savane

caractérisée par une strate continue composée de graminées parsemée par une strate ligneuse ouverte constituée d'espèces dont la plus dominante est le *Pterocarpus lucens*. Une steppe plus abondante dans la partie nord du bassin est constituée d'un tapis herbacé discontinu à base de graminées annuelles avec des ligneux épineux couvrant la partie extrême nord dont les plus fréquents sont les *Balanites aegyptiaca* et les *Ziziphus mauritiana* (Akpo *et al.*, 1995).

1.2. Données satellitaires

Pour caractériser les apports en eau et la phénologie dans le Ferlo, différents produits satellitaires sont disponibles. Nous avons utilisé trois produits pour les apports en eau, en raison des incertitudes sur les données. La période 2000 à 2010 a été choisie afin d'avoir au moins 10 ans de données, mais aussi d'assurer de disposer de produits validés.

1.2.1. Apports en eau journaliers des précipitations

Le produit TRMM3B42 (Huffman *et al.*, 2007) est disponible à une résolution spatiale de 0.25°x0.25° et au pas de temps de 3h. L'algorithme de pluie utilise une combinaison de données de plusieurs capteurs micro-ondes, et des températures de brillance infrarouge des satellites météorologiques géostationnaires. Le produit RFE2.0 (Xie et Arkin, 1996) a une résolution spatiale de 0.1°x0.1° et un pas de temps journalier. Il est élaboré au moyen de mesures infrarouges et micro-ondes, et intègre des données de pluviomètres sur le continent africain. Ces deux produits ont été validés sur la région sahélienne (Roca *et al.*, 2010) et sont largement utilisés (Pierre *et al.*, 2011). Le produit d'humidité du sol (SM) (couche superficielle, profondeur 0.5-2cm) est issu des mesures micro-ondes actives et passives, et est fourni à une résolution de 0.25°x0.25° et au pas de temps journalier (Dorigo *et al.*, 2011; Parinussa *et al.*, 2013).

1.2.2. Végétation (LAI)

Le LAI, indice foliaire, est la surface d'une feuille par unité de surface du sol (m²/m²). Le produit MODIS LAI a une résolution spatio-temporelle de 1 km et 8 jours avec une bonne qualité sur le Sahel (Ruhoff *et al.*, 2013), malgré un biais d'environ 0.2 m²/m² pendant la saison sèche.

1.3. Sélection des entités homogènes

Pour prendre en compte l'impact des types de sol et de végétation sur la relation pluie-croissance de la végétation, la sous-région est partitionnée en sous zones homogènes (même couvert végétal et même type de sol, continuité de surface). L'analyse de l'impact des variations des apports d'eau est effectuée par entité homogène.

La classification du couvert végétal est déduite de la carte d'occupation du sol de la FAO (Food and Agriculture Organization) en 2005. Nous disposons également d'une carte des types de sol du PNAT (Plan National de l'Aménagement du Territoire) du Sénégal, réalisée en 1985. A partir de ces classifications, les entités homogènes sont délimitées avec un SIG (Système d'Information Géographique). Une entité homogène est constituée par un type de sol unique et un type de végétation unique. Seules les entités les plus grandes ont été conservées,

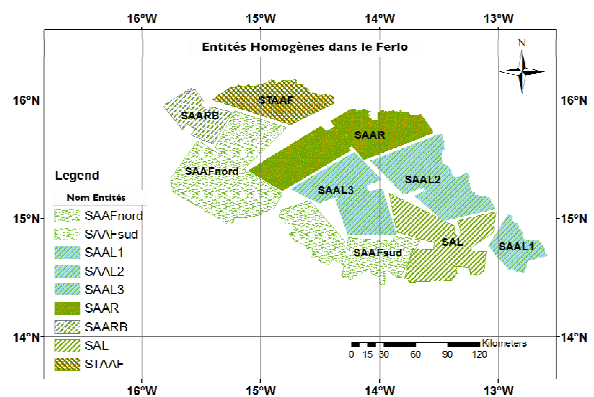


Figure 1. Carte des différentes entités homogènes sur le Ferlo

par cohérence avec la résolution spatiale des données satellitaires. Pour cela, nous avons défini des polygones contenant chacun au moins 100 points de LAI (Figure 1). Les principaux types de sol qui couvrent cette région sont les lithosols (L), régosols (R), ferrugineux tropicaux (F) et les sols Rouges-Bruns (RB). Les principales classes de végétation majoritaires sont la Savane Arbustive-Arborée (SAA), et la Steppe Arbustive-Arborée (STAA).

1.4. Sélection des indicateurs pertinents (pluie et végétation)

Pour examiner l'impact de la variabilité de la pluie sur la croissance de la végétation pour chaque saison, sur chaque entité la répartition saisonnière de ces deux variables a été caractérisée par les indicateurs suivants :

Les indicateurs de la pluie :

La date de début et la date du maximum de pluie (ou d'humidité superficielle), relativement à la date moyenne pour l'entité. La date de début correspond à la première courbure positive sur le cumul saisonnier, suivant Odekunle, 2005 ; le maximum à la courbure négative la plus grande sur le cumul. Le cumul de pluie durant la période de croissance (juin-septembre). Le nombre de pauses de plus de 2 jours, la durée de la plus longue, l'amplitude de l'anomalie la plus longue, l'amplitude cumulée des anomalies.

Les indicateurs de la phénologie :

La date du maximum, relativement à la moyenne dans l'entité. Les dates de début et de fin de la saison sont estimées en lissant le LAI moyen par entité par la fonction *spline*. Les premier et dernier maxima de courbure correspondent respectivement aux dates de début et de fin ; la valeur du maximum est déterminée sur le LAI lissé (moyenne glissante sur 3 points).

Pour chaque entité homogène, des indicateurs annuels de l'apport en eau et de la végétation sont calculés sur la période 2000-2010. Les anomalies lors de chaque saison des pluies sont calculées comme étant l'écart entre la climatologie sur les 11 ans et l'évolution annuelle de chaque entité (en moyenne sur l'entité).

2. Comparaison des produits pour l'apport en eau sur le Ferlo

En moyenne les 3 produits pour l'apport en eau (3B42, RFE, SM) décrivent de façon similaire le gradient SE/NO de pluie sur la période étudiée et sa variabilité temporelle (Figure 2). Toutefois, l'amplitude des pluies de 3B42 est plus grande que celle de RFE, confirmant les résultats de Pierre *et al.* (2011). Associée au plus fort cumul dans le SE, la carte d'écart type (non montrée) indique une variabilité temporelle plus forte au SE, qui est probablement liée à des événements locaux, d'intensité faible, mais fréquents. Ces événements semblent mieux détectés avec RFE que 3B42, grâce à sa meilleure résolution spatiale (10 km au lieu de 25 km) et de l'ajustement aux conditions de la région ouest africaine avec les données locales.

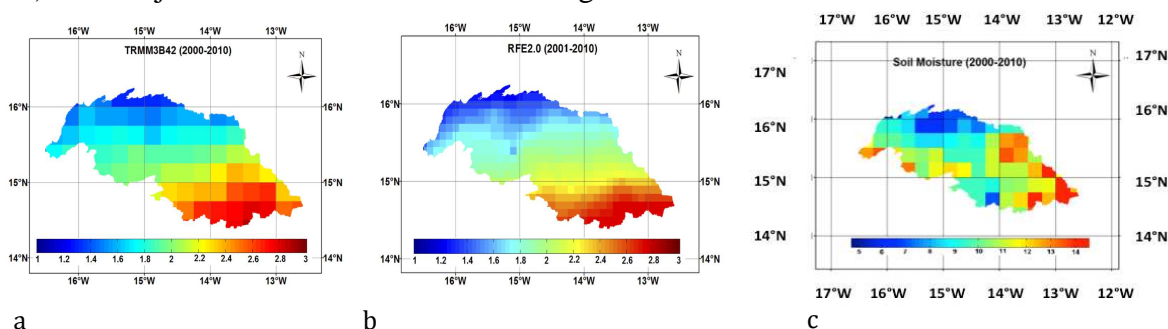


Figure 2. Climatologie de la pluie sur le bassin versant du Ferlo sur la période 2000-2010 avec TRMM3B42 (a) ; RFE2.0 (b) ; climatologie de l'humidité du sol (SM) (c)

3. Relations entre les indicateurs saisonniers pluie-humidité-végétation

La réponse du cycle annuel de croissance par rapport à la variabilité de l'apport en eau est obtenue avec des corrélations entre des indicateurs annuels. La significativité de ces relations linéaires est évaluée en utilisant le test de Student avec un seuil de significativité $\alpha = 5\%$. Les indicateurs choisis sont les dates de début de la saison des pluies, celle de la végétation, ainsi que la date du maximum de croissance de la végétation, le cumul de pluie (ou la moyenne de l'humidité du sol) durant la phase de croissance, le nombre de pauses de pluie (ou anomalies négatives), l'amplitude des anomalies correspondantes, la durée de la plus longue pause. Ces divers indicateurs sont corrélés avec la valeur du LAI au maximum du cycle phénologique.

Le début de la croissance suit logiquement le début de la pluie saisonnière, avec un délai de deux semaines dans le SE et 3 semaines dans le NO. Selon les années, ce début de saison est plus ou moins précoce. On n'observe cependant pas d'impact de l'avance/retard par rapport à la moyenne sur la date du maximum de végétation ni sa valeur.

Concernant le cumul des précipitations (ou la moyenne SM) sur la période de croissance (juin à septembre), les résultats obtenus avec les trois produits sont comparables, avec des corrélations élevées et significatives ($r = 0.57$ (TRMM) ; $r = 0.56$ (RFE) ; $r = 0.48$ (SM)). L'impact du déficit en eau dû aux pauses de pluie sur le maximum de LAI se traduit par des corrélations significatives (Figure 3), dès que l'anomalie (SM) dure 3 jours. Cependant en séparant les entités Lithosols et autres sols, on observe des comportements différents par rapport aux indicateurs de pluie. Sur des entités de sol ferrugineux et rouge-brun, le maximum de LAI est influencé par les pauses de pluie (et plus encore par les anomalies de SM), que ce soit le nombre de pauses, leur amplitude ou seulement la pause la plus longue, alors que les entités Lithosols ne présentent pas de réponse significative à cet indicateur, ni d'ailleurs aux autres.

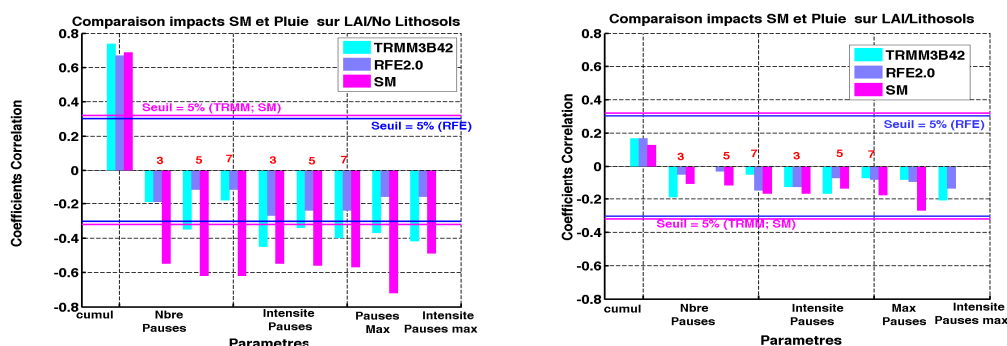


Figure 3. Coefficients de corrélation entre les paramètres pluie et le maximum de LAI (normalisé): cumul de pluie ou moyenne SM; nombre de pauses de durée supérieure ou égale à 3, 5 ou 7 jours ; l'amplitude cumulée de l'anomalie négative par rapport à la climatologie ; et la durée de la plus pause la plus longue. Le seuil de significativité du test de Student, $p < 0.05$, est indiqué.

4. Variations intra saisonnières

Au-delà de ces relations entre indicateurs moyens calculés chaque année, les relations entre anomalies intra-saisonnières de pluie / humidité des sols et LAI sont étudiées. Les données d'anomalies pour chaque saison des pluies sont rassemblées pour constituer des séries chronologiques sur 11 ans, puis corrélées, pour rechercher le décalage temporel pour lequel la corrélation est maximale. Comme la pluie ne présente pas une distribution gaussienne, les tests de significativité classiques ne peuvent être appliqués. La significativité des corrélations obtenues est évaluée en utilisant un test de Monte Carlo (à 90 %). Pour cela, l'ordre des données de pluie par saison est permuté aléatoirement 1000 fois, avant de corrélérer la série temporelle résultante avec la série chronologique de LAI.

Les anomalies positives (excès de pluie) et négatives (déficits) sont séparées pour évaluer le temps de réponse de la végétation. Le décalage moyen est de 2 semaines pour la réponse aux anomalies positives, et deux à trois semaines pour les anomalies négatives (Figure 4). On observe un léger décalage entre les corrélations obtenues avec les trois produits pluie/humidité pour les anomalies positives, et un écart d'une semaine entre la réponse aux anomalies de pluie/SM pour les négatives. La corrélation, réalisée dans les mêmes conditions entre pluie et SM confirme que les anomalies négatives d'humidité du sol sont légèrement en retard par rapport à celles de précipitations, ce qui montrerait l'effet du stockage de l'eau dans la couche superficielle du sol. Les corrélations confirment de plus la non réponse (ou réponse tardive dans le cas d'anomalie négative en SM) sur les Lithosols (Figure 4, ex SAAL1).

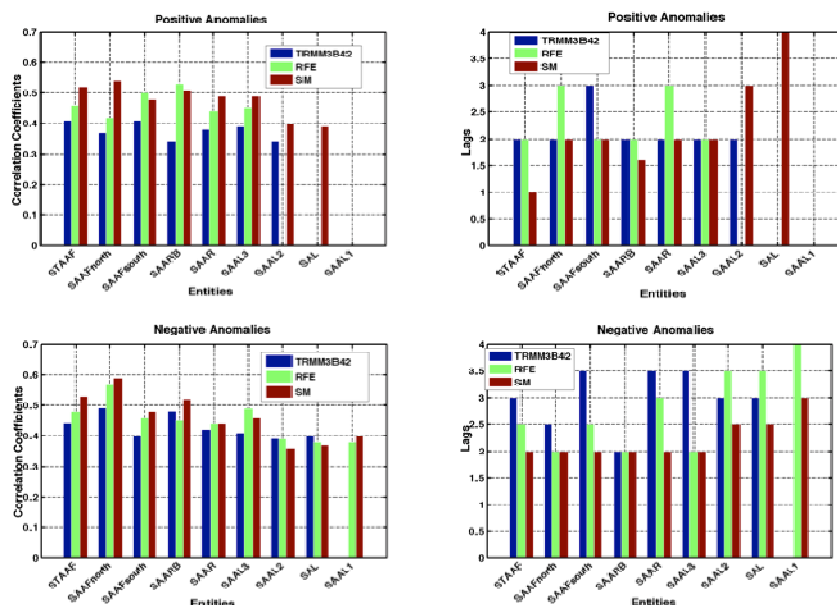


Figure 4. Comparaison des coefficients de corrélations (seul les coefficients significatifs au test de Monte Carlo à 90 %) et décalages entre les anomalies de pluie (TRMM3B42 ; RFE2.0), SM et LAI sur la période 2000-2010 sur toutes les entités homogènes dans le bassin versant du Ferlo.

Discussion et conclusions

Nous avons montré la faisabilité d'utilisation des données satellite de pluie et d'humidité du sol pour évaluer la réponse moyenne et temporelle aux anomalies de ressources en eau durant la période de croissance de la végétation à l'échelle de sous-régions végétatives et pédologiques (qualifiées d'entités homogènes) du Ferlo.

L'humidité superficielle du sol apparaît comme un indicateur efficace de l'eau disponible pour la végétation à l'échelle intra saisonnière. Son atout est d'être un produit reliant plus directement la mesure satellite aux propriétés de la surface que les produits de pluie cumulée. Les indicateurs issus de SM sont aussi bien ou mieux corrélés avec les variations de LAI que ceux issus des produits de pluie (ce malgré la meilleure résolution spatiale dans le cas de RFE).

La dynamique de la végétation dépend fortement du type de sol avec des corrélations fortes et significatives sur des sols ferrugineux tropicaux et faible ou non significatives sur les lithosols. Les lithosols sont en effet des sols à roche dure, impliquant une infiltration très lente et gardant plus longtemps l'humidité en surface. Les Ferrugineux sont plus perméables et pénétrants, expliquant que les anomalies aient un impact rapide sur la végétation herbacée, ne puisant pas l'eau en profondeur. Les « non lithosols » sont de plus situés majoritairement dans la moitié nord du Ferlo, région dans laquelle les herbacées sont dominantes, alors que sur les

lithosols (au sud), les arbres et arbustes sont plus denses (LAI non nuls en saison sèche) et peuvent avoir un cycle différent (perte de feuilles durant la saison des pluies), expliquant l'absence de corrélation avec les anomalies de pluie.

L'analyse des différents indicateurs décrivant les spécificités de chaque saison en ressource en eau et LAI suggère qu'un nombre restreint de paramètres (cumul sur juin-septembre), nombre de pauses ou durée de la plus longue, ou anomalie correspondante, pourraient permettre de caractériser la « qualité » de la saison de mousson, bien sûr en tenant compte de plusieurs autres facteurs tels que la distribution spatiale des mares et l'occupation humaine.

Pour consolider ces résultats, une validation est en préparation avec des LAI simulés obtenus avec le modèle STEP (Sahelian Transpiration Evaporation Production model), forcé avec les données de pluie satellite et des champs météorologiques analysés (CEPMMT).

Références bibliographiques

- Akpo L. E., Gaston A., Grouzis M., 1995: Structure spécifique d'une végétation sahélienne. Cas de Wiidu Thiengoli (Ferlo, Sénégal). *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle*, Paris 17, 39-52
- Camberlin P., Martiny N., Philippon N., Richard Y., 2007: Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sensing of Environment*, **106**, 199-216.
- Cissé S., Eymard L., Pinsard F. Ndione J. A., Gaye A. T., 2012: Analyse des relations entre la variabilité de la pluviométrie et la dynamique de la végétation : cas du Ferlo (Sénégal). *Actes Colloque de l'AIC (Grenoble)*, 183-188.
- Dorigo W. A., Wagner W., Hohensinn R., Hahn S. Paulik C., Xaver A., Gruber A., Drusch M., Mecklenburg S., van Oevelen P., Robock A., Jackson T., 2011: The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrologic and Earth System Sciences*, **15**, 1675-1698.
- Huffman G. J., Adler R. F., Bolvin D. T., Gu G., Nelkin E. J., Bowman K. P., Hong Y., Stocker E. F., Wolff D. B., 2007: The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, **8**, 38-55.
- Nicholson S. E., Davenport M. L., Malo A. R., 1990: A Comparison of the Vegetation Response to Rainfall in the Sahel and East Africa, using Normalized Difference Vegetation Index from NOAA AVHRR. *Climatic Change*, **17**, 209-241.
- Odekunle T. O., 2005: Determining rainy season onset and retreat over Nigeria from precipitation amount and number of rainy days. *Theoretical and Applied Climatology*, **83**, 193-201.
- Parinussa R. M., De Jeu R. A. M., Wagner W. W., Dorigo W. A., Fang F., Teng W., Liu Y. Y., 2013 : Soil Moisture. Special Supplement to the *Bulletin of the American Meteorological Society*, **94**, S24-25.
- Pierre C., Bergametti G., Marticorena B., Mougou E., Lebel T., Ali A., 2011: Pluriannual comparisons of satellite-based rainfall products over the Sahelian belt for seasonal vegetation modelling. *Journal of Geophysical Research* 116, D18201, doi: 10.1029/2011JD016115.
- Rambal S., Cornet A., 1982: Simulation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une phytocénose sahélienne du Sénégal. *Acta OEcologica/OEcologiaPlantarum*, **3**, 381-397.
- Roca R., Champon P., Jobard I., Kirstetter P. E., Gosset M., Bergès J. C., 2010: Comparing Satellite and Surface Rainfall Products over West Africa at Meteorologically Relevant Scales during the AMMA Campaign Using Error Estimates. *American Meteorological Society*, **49**, 715-731.
- Ruhoff A. L., Paz A. R., Aragao L. E. O. C., Mu Q., Malhi Y., Collischonn W., Rocha H. R., Running S. W., 2013: Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. *Hydrological Sciences Journal*, **58** (8), 1-19.
- Xie P., Arkin P. A., 1996: Analysis of Global Monthly Precipitation Using Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numeric al Model Prediction, *J. Climate*, **9**, 840-858.