

TENDANCES, RUPTURES ET VARIABILITÉ HYDROCLIMATIQUES DANS L'ÉTAT DU PARANA - BRÉSIL

NASCIMENTO Jr. L. ⁽¹⁾, SANT'ANNA NETO, J. L. ⁽²⁾, DUBREUIL, V. ⁽³⁾

(1) Groupe de recherche GAIA et étudiant de Doctorat en Géographie de l'UNESP, Rue José Levy Guedes, 585, Presidente Prudente, Brasil [juniohr@gmail.com]

(2) Département de Géographie - UNESP, Rue Roberto Simonsen, 305, Presidente Prudente, Brasil. [jlsn57@uol.com.br]

(3) Laboratoire CosTel, Université Rennes 2, Rennes, France, [vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr]

Résumé – L'objectif de ce travail est d'analyser la variabilité hydroclimatique de l'Etat du Parana – Brésil. Nous avons utilisé les données des stations pluviométriques de l'Institut des Eaux du Paraná, pour les rivières Tibagi, Ivaí, Piquiri et Iguacu pour la période de 1947 à 2011. Les données de débit ont été soumises à des tests de tendances (Mann-Kendall), d'homogénéité (test de rupture de Pettitt) et de régression linéaire. Des tendances positives significatives ont été observées pour toutes les rivières étudiées. Cette augmentation du débit, en prenant en compte la valeur de α de 10% pour le Tibagi ($p=0,033$), 26% pour l'Ivaí (valeur $p=0,000$) 8% pour le Piquiri (valeur $p=0,03$) et 7% pour l'Iguacu (valeur $p=0,002$). Ceci montre l'augmentation importante des débits dans le temps liée aux tendances des précipitations dans l'état pendant les trente dernières années. En revanche, les ruptures statistiques observées pour les rivières Tibagi, Iguacu et Ivaí, (respectivement en 1969, 1970 et 1968) n'ont pas été identifiées dans les séries pluviométriques. Ceci signifie que l'évolution des régimes hydrologiques dépend également d'autres facteurs que les précipitations, notamment l'aménagement hydroélectrique des rivières et l'évolution des modes d'utilisation des terres des bassins hydrographiques.

Mots-clés : Changements hydroclimatiques, climat tropical, débit des fleuves, État du Paraná.

Abstract – Trends, changes and hydroclimate variability in Paraná State - Brazil. The objective is to analyse the hydroclimatic variability in Parana State - Brazil. We used data from flows stations of Waters Paraná Institute from 1947 to 2011, for four rivers: Tibagi, Ivaí, Piquiri Iguacu. The flows data were subjected to trend tests (Mann Kendall), homogeneity (change test - Pettitt) and linear regression. Significant positive trends were observed in all four rivers. This increased flow account the value 10% to Tibagi ($p = 0.033$), 26% to Ivaí (p value = 0.000) 8% to Piquiri (p value = 0.03) and 7% to Iguazu river (p -value = 0.002). This observation shows the significant increase in rates over time related to trends in rainfall over the state in the last thirty years. Statistical changes were observed in Tibagi, Iguacu and Ivaí with de data temporal point in 1969, 1970 and 1968 respectively. Withal they are not linked with rainfall changes observed in the state. The analysis made it possible to identify changes in rates of different signs, when they are subjected to the changes test. A possible hypothetical explanation is it shows a part of hydroclimatic complexity, that cannot be associated with rainfall dynamics in the region.

Keywords: Hydrologic changes, tropical climate, river flows, Paraná State.

Introduction

Les conditions hydrologiques sont une variable importante pour la compréhension des effets des précipitations sur les milieux et les écosystèmes fluviaux (Xavier et Silva, 2010). Habituellement représentées par des données d'écoulement des rivières, ces conditions résultent du contexte de l'occupation des bassins versants, intégrant les précipitations et la dynamique climatique (Xavier et Silva, 2010 ; Prowse et Beltaos, 2002).

Dans le cas des rivières de l'État du Paraná (figure 1), elles s'étendent dans le domaine des climats tropicaux, et leurs sources sont situées dans des régions avec des altitudes élevées avec une forte pluviosité. Entre leur cours moyen et l'aval, les rivières Tibagi et Ivaí se tropicalisent, le Rio Piquiri montrant un climat de transition caractéristique, tandis que le Rio Iguacu reste entièrement sous régime subtropical. Pour les quatre bassins versants, les précipitations diminuent de l'amont vers l'aval, en direction du nord pour le Tibagi (embouchure du Rio Paranapanema), et vers le nord-ouest et la confluence avec le Parana pour les autres (Maack, 1981).

En raison de sa position au sud du Brésil, la variabilité hydroclimatique est essentiellement liée aux précipitations. Cette dynamique est déterminée par l'intensité des hautes pressions subtropicales atlantiques, par les masses d'air polaire froid et sec qui viennent du sud, par les masses d'air chaud et humide venues de l'Amazonie et de l'océan Atlantique et par les masses d'air chaud et sec produites à l'intérieur du continent sud-américain (Nascimento Junior *et al.*, 2014). L'ensemble de ces systèmes dynamiques interagissent avec les facteurs statiques –

notamment les volumes de reliefs et bassins - et expliquent les forts contrastes régionaux dans la distribution spatiale des précipitations dans l'État (Maack, 1981 ; Mendonça et Danni-Oliveira, 2000 ; Nascimento Junior *et al.*, 2014).

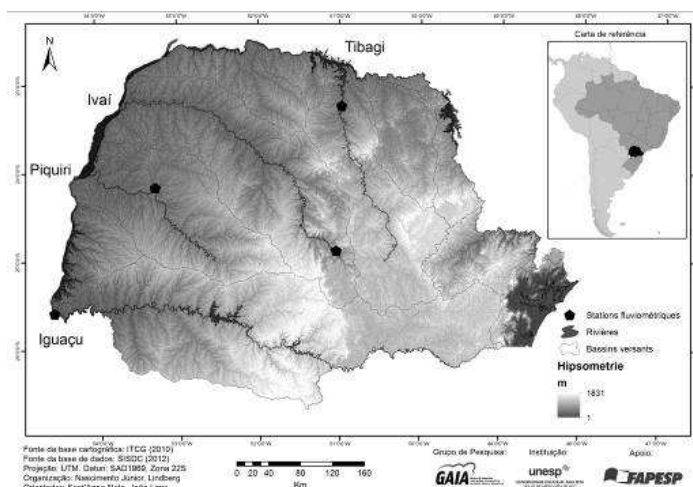


Figure 1. Les rivières de l'État du Paraná et les stations fluviométriques utilisées.

Mendonça et Danni-Oliveira (2000), França (2002), Destefani (2005), Azevedo (2006), Nery *et al.* (2006) et Correa (2013) ont trouvé des relations entre les anomalies de débits et l'apparition d'El Niño et de La Niña, lors des années extrêmes. En outre, des études sur les régimes des rivières (périodes des crues et des étiages) ont mis en évidence le lien avec les activités humaines, montrant principalement l'impact historique des processus d'occupation et de l'utilisation des terres et plus généralement les modifications de végétation et des climats régionaux dans les bassins versants (Xavier et Silva, 2010; Bruijnzeel, 2004).

Dans ce contexte, Debortoli *et al.* (2012) et Tozato *et al.* (2013) ont proposé les tests de Pettitt, Mann-Kendall et les régressions linéaires, pour mettre en évidence statistiquement les éventuels changements dans les débits hydrologiques. Ces tests permettent ainsi de détecter les ruptures dans les séries de mesures, l'importance et la significativité des tendances climatiques à l'augmentation ou à la diminution des débits dans le temps.

Ainsi, l'objectif de cette étude est de décrire statistiquement la variabilité des débits des rivières Tibagi, Ivaí, Piquiri et Iguaçu dans l'État du Paraná - Brésil pour la période 1947-2011, afin d'analyser les ruptures et les tendances de ces comportements hydrologiques.

1. Données et méthodes

Les données utilisées correspondent aux débits mensuels des rivières (m^3/s) mesurés par les stations du réseau de l'Institut des eaux du Paraná de 1947 à 2011 pour les rivières Tibagi, Ivaí et Iguaçu, et de 1964 à 2011 pour la Piquiri (figure 1 et tableau 1). En raison de l'absence de longues séries historiques ou la présence de trop nombreuses lacunes dans les séries, les données des autres postes de mesure de la région n'ont pas été retenues.

Tableau 1. Postes hydrologiques utilisés.

Station	Rivière	Commune	Latitude	Longitude	Altitude	Surface (km ²)
Jataizinho	Tibagi	Jataizinho	23° 15' 00" S	50° 58' 56" O	340	21955
Rio dos Patos	Ivaí	Prudentópolis	25° 12' 19" S	50° 56' 34" O	690	1086
Balsa do Goioerê	Piquiri	Mariluz	23° 55' 00" S	53° 07' 59" O	320	2424
Salto Cataratas	Iguaçu	Foz do Iguaçu	25° 40' 59" S	54° 25' 59" O	152	67317

Source: Instituto das Águas do Paraná. Réal. Nascimento Júnior, L.

Les valeurs de débit ont été regroupées à l'échelle annuelle, au moyen des indices standardisés et décrits sous forme de graphiques en *boxplot*. La variabilité hydrologique a été représentée par la technique de normalisation (indice standardisé), obtenue par la formule :

$$Z(i) = (P(i) - P_m)/D_p$$

où : $Z(i)$ est la variable normalisée (débits annuels); $P(i)$ la valeur moyenne annuelle de la variable dans la série historique ; P_m est la valeur moyenne de la variable dans la période, D_p est l'Écart-type (Meisner, 1976).

Pour évaluer les changements et les tendances de la variabilité hydrologique, nous avons appliqué les tests de rupture de Pettitt (1979), et les tests de tendances de Mann-Kendall et de régression linéaire comme proposés et utilisés par Gossens et Berger (1986), Moraes *et al.* (1995), Back (2001), Libiseller et Grimvall (2002), Debortoli *et al.* (2012) et Tozato *et al.* (2013).

Tous les tests et graphiques ont été réalisés avec le logiciel Microsoft Excel[®], et les procédures statistiques avec XLStat[®]. Les paramètres retenus pour les calculs étaient les suivants: hypothèse alternative $\neq 0$; niveau de signification de 5%; nombre de simulations de 10 000, avec une durée maximale de 180 secondes.

2. Résultats

Les valeurs moyennes absolues de débits maxima et minima du tableau 2, montrent l'ampleur de la variabilité hydrologique des rivières étudiées. Les débits les plus importants sont observés dans la rivière Iguaçú. Le coefficient de variation est plus élevé dans la rivière Tibagi, suivie des rivières Iguaçú, Ivaí et Piquiri.

Tableau 1. Valeurs absolues des débits annuels moyens (m³/s) des rivières pour la période 1947 à 2011.

Descriptif statistique	Tibagi	Ivaí	Piquiri	Iguaçú
Débit minimum	99,85	7,51	21,72	683,03
Débit maximum	912,94	57,09	97,01	4405,32
Amplitude	813,09	49,57	75,29	3722,30
1° Quartile	281,50	17,25	37,49	1270,73
Médiane	356,64	25,59	43,95	1652,57
3° Quartile	454,71	31,59	50,34	2054,73
Moyenne	381,76	25,74	45,69	1737,08
Coefficient de variation	0,398	0,393	0,309	0,383

Période de 1964 à 2011 (Piquiri). Réal. Nascimento Júnior, L.

Les statistiques descriptives des valeurs annuelles (figure 2), confirment que les plus grandes amplitudes et la plus grande variabilité ont été observées pour la rivière Tibagi, avec un coefficient de variation de 0,398. La plus faible variabilité est enregistrée à la station de jaugeage de la rivière Piquiri (0,309).

La variabilité hydrologique des quatre rivières est importante au début de la série (figure 3). Elle se distingue par deux grands événements négatifs espacés de 20 ans (mis en évidence par les flèches en noir), en 1949 et 1968. Des événements avec des valeurs de débits standardisés négatives se sont produits aussi en 1959, 1978, 1985, 1991 et 2006, indiquant une variation inférieure à 10 ans.

Les occurrences de ces événements de débits extrêmes peuvent être associées à la périodicité de l'ENSO (El Niño Southern Oscillation) (Trenberth, 1997) : plusieurs auteurs ont ainsi montré les relations entre les fortes pluies et les débits élevés lors des épisodes d'El Niño et inversement pour les événements La Niña : Mendonça et Danni-Oliveira (2000) et França

(2002) pour le Tibagi ; Destefani (2005) et Baldo (2006) pour l'Ivaí ; Azevedo (2006) et Nery *et al.* (2006) pour l'Iguaçu ; et Correa (2013) pour la Piquiri.

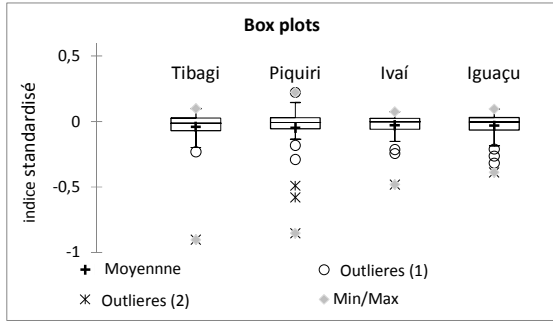


Figure 2. Description des débits standardisé des rivières du Parana pour la période 1947 à 2011 (Tibagi, Ivaí et Iguaçu) et 1964 à 2011 (Piquiri).

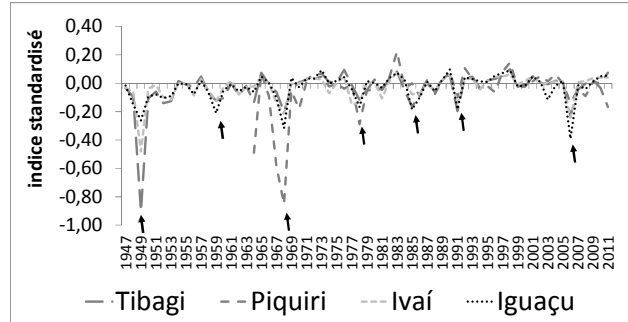


Figure 3. Variabilité des débits annuels standardisés des rivières du Parana pour la période 1947 à 2011 (Tibagi, Ivaí e Iguaçu) et 1964 à 2011 (Piquiri).

Les tests de ruptures montrent que les débits de la rivière Piquiri ne présentent pas de résultats statistiquement significatifs (figure 4). En revanche, pour les rivières Tibagi, Iguaçu et Ivaí les dates de ruptures sont respectivement en 1969, 1970 et 1968. Après ces périodes, les rythmes hydrologiques des trois rivières sont restés assez stables.

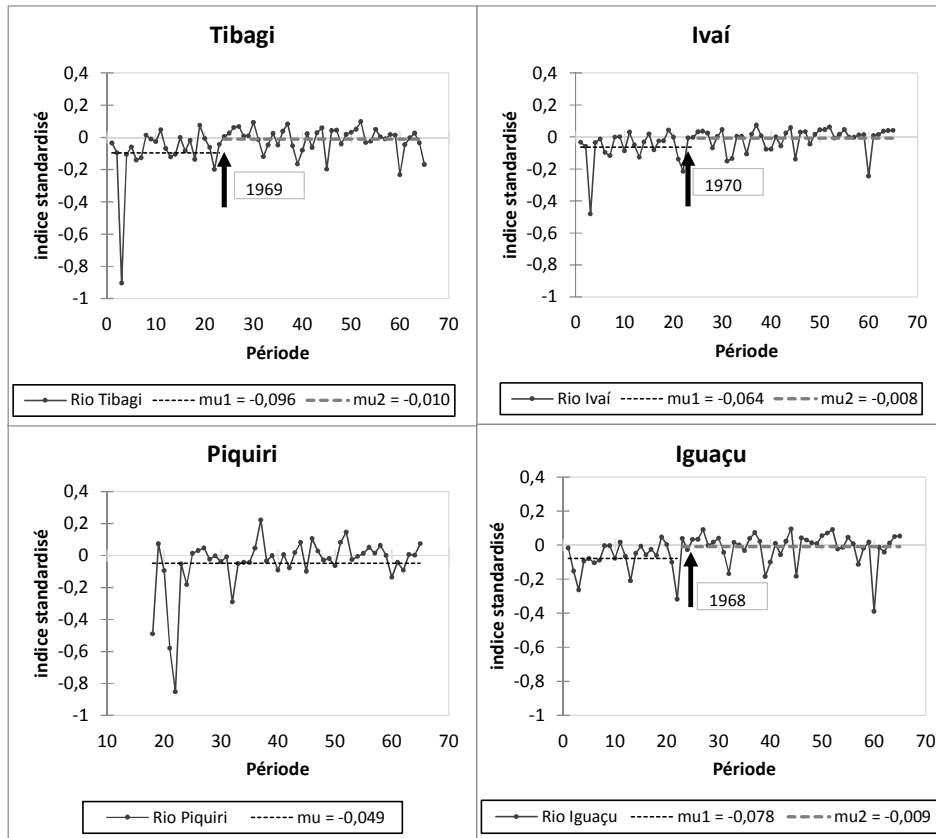


Figure 4. Variabilité et pont de rupture des débits des rivières Tibagi, Ivaí, Piquiri et Iguaçu.

En général, les dates de ruptures obtenues sur les débits avec le test de Pettitt ne correspondent pas aux dates de ruptures de la pluviométrie (qui sont principalement en 1992 et 1993 comme l'a montré Nascimento Júnior (2013)).

En effet, Nascimento Júnior (2013) a observé les tendances et les ruptures de précipitations et de nombre de jours de pluie dans l'État du Paraná. Il a montré que la principale période de transition des valeurs pluviométriques sont les années 1990-2003, avec un record pour l'année 1992.

L'analyse des débits identifie donc des signes de changements de débits (ruptures) différents des précipitations, ce qui montre la complexité hydroclimatique de la région, qui ne doit pas être associée uniquement à la dynamique des précipitations mais aussi à d'autres facteurs.

Les débits montrent également une augmentation dans le temps. Ainsi, les tests de Mann-Kendall présentent une tendance positive significative ($p\text{-value} \leq 0,05$) pour toutes les rivières. Cette augmentation du débit, en prenant en compte la valeur de α est de 10% pour le Tibagi ($p=0,033$), 26% pour l'Ivaí (valeur $p=0,000$), 8% pour la Piquiri ($p=0,03$) et 7% pour l'Iguaçu (valeur $p=0,002$).

Contrairement aux résultats sur les dates de ruptures, les résultats des tendances montrent cette fois que l'évolution des débits est davantage liée à la pluviométrie. En effet, lors des trente dernières années, les précipitations dans l'Etat du Parana ont augmenté lentement et progressivement, avec une intensification dans le temps et dans l'espace des précipitations, et une réduction du nombre de jours de pluie (Nascimento Júnior, 2013). Il semble donc que l'on puisse établir un parallèle entre la tendance à l'accroissement général des débits et les conditions pluviométriques, confirmant ainsi les résultats de Silva et Guetter (2003).

La synthèse de ces résultats est présentée dans le tableau 3, qui montre à l'échelle régionale de l'État de Paraná une accélération du cycle hydrologique, marquée par une augmentation des débits moyens annuels et des dates de ruptures précoces en début de période. La rivière Ivaí a connu l'augmentation du débit moyen annuel la plus importante.

Tableau 3. Synthèse des résultats des débits des rivières étudiées pour la période 1947 à 2011.

Débits annuel des rivières (m ³ /s)	Test de Pettitt		Teste de Mann-Kendall Tendance**	Régression Linéaire Valeur α (%)
	Rupture**	Date		
Tibagi	Positive	1969	Positive	10
Ivaí	Positive	1970	Positive	26
Piquiri*	Non significatif	Non significatif	Positive	8
Iguaçu	Positive	1968	Positive	7
Moyenne	Positive	1970	Positive	10

*Période de 1964 à 2011. **Significativité à $p\text{-value} \leq 0,05$. Réal. Nascimento Júnior, L.

Conclusion

L'analyse des séries chronologiques et les tests statistiques réalisés permettent d'identifier des comportements en partie similaires pour les stations retenues et contribuent à la compréhension des changements de comportements hydrologiques dans l'Etat du Parana.

À l'échelle régionale, les rivières principales de l'État du Paraná ont montré une accélération du cycle hydrologique en partie liée aux tendances pluviométriques : d'une part, l'augmentation des débits moyens annuels semble liée à l'augmentation des pluies en volume et en intensité, d'autre part, les événements de débits extrêmes correspondent aux forts (faibles) épisodes pluvieux liés aux épisodes El Niño (La Niña).

En revanche, les dates de ruptures détectées avec le test de Pettitt montrent une réponse plus complexe, car elles ne coïncident pas avec les dates de ruptures des précipitations. Une hypothèse possible pour expliquer cette différence est que ces dates de ruptures soient davantage liées aux autres facteurs de fonctionnement des bassins versants et notamment aux changements dans les modes d'utilisation des terres, de l'occupation du sol et la mise en oeuvre de centrales hydroélectriques.

Ainsi, d'autres analyses doivent être développées à d'autres échelles de temps (mensuelle, saisonnière, principalement) pour valider ou non ces hypothèses.

Bibliographie

- Back A. J., 2001 : Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Pesquisa agropecuária brasileira*, **36**(5), 717-726.
- Baldo M. C., 2006 : *Variabilidade pluviométrica e a dinâmica atmosférica na bacia hidrográfica do Rio Ivaí – PR*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 153 p.
- Bruijnzeel L.A., 2004 : Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture Ecosystems and Environment*, (1)**104**, 185-228.
- Correa M. G. G., 2013 : *Distribuição espacial e variabilidade da precipitação pluviométrica na Bacia do Rio Piquiri – PR*. Tese de Doutorado (Geografia física). Universidade de São Paulo. São Paulo, 102 p.
- Debortoli N., Dubreuil V., Henke C., Rodrigues Filho S., 2012 : Tendances et ruptures des séries pluviométriques dans la région méridionale de l'Amazonie brésilienne. In : *Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Grenoble, **25**, 201-206.
- Destefani E. V., 2005 : *Regime Hidrológico do Rio Ivaí – PR*. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 94 f.
- França V. de., 2002 : O rio Tibagi no contexto hidrogeográfico paranaense. In: Medri, M. E; Bianchini, E. Shibatta, O; Pimental, J. A. *A bacia do rio Tibagi*. Medri. Londrina, **1**, 45-42.
- Goossens C., Berger A., 1986 : Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. *Annales Geophysicae*. **4**, 385-400.
- Libiseller C Grimvall A., 2002 : Performance of partial Mann-Kendall tests in the presence of covariates. *Environmetrics*, **13**, 71-84.
- Maack R., 1981 : *Geografia física do Estado do Paraná*. José Olympio. Rio de Janeiro. **2**, 350 p.
- Meisner B. N., 1976 : A study of Hawaiian and Line Island rainfall, Honolulu. Department of Meteorology. University of Hawaii, *UHMET*, **1**. 83 p.
- Mendonça F., Danni-Oliveira I. M., 2000 : Tipologia climática – Gênese, características e tendência. Stipp, N. A. F. (Org) *Macrozoneamento da bacia hidrográfica do rio Tibagi/PR*. Editora UEL. Londrina, **1**. 21-62.
- Morais J. M., Pellegrino G., Ballester M. V., Martineli I. A., Victoria R. L., 1995 : Estudo preliminar da evolução temporal dos componentes do ciclo hidrológico da bacia do Rio Piracicaba. In: *II Simpósio Brasileiro de recursos hídricos. XI Simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua oficial portuguesa*. Recife. *Anais*. **01**, 27-32.
- Nascimento Júnior L., 2013 : *As chuvas no Paraná: variabilidade, teleconexões e impactos de eventos extremos*. Mestrado em Geografia. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 162 p.
- Nascimento Júnior L., Sant'Anna Neto J. L., Dubreuil V., 2013 : La sécheresse dans l'État du Parana (Brésil): observation et suivi par télédétection. In: *Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Dijon (France), **27**, p. 60-66.
- Nery J. T., Vargas W. M., Martins M.L., 2006 : Influência do fenômeno El Niño na vazão da bacia do Rio Iguçu, PR. In: *XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Florianópolis: Edusc, **1**. p. 01-12.
- Pettitt A. N., 1979 : A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, **28**, 126-135.
- Prowse T. D. E., Beltaos S., 2002 : Climatic control of river-ice hydrology: a review. *Hydrological processes*. **16**, 805-822.
- Sant'Anna Neto J. L., 2001 : Por uma geografia do clima: Antecedentes históricos; paradigmas contemporâneos e uma nova razão para um novo conhecimento. *Terra Livre*. **17**, 49-62.
- Silva M. E. S., Guetter A. K., 2003 : Mudanças climáticas regionais observadas no estado do Paraná. *Terra Livre*. São Paulo. **19**, 111-126.
- Trenberth K. E., 1997 : The definition of El Niño. *Bulletin American of Meteorology Society*, **78**, 2771-2777.
- Tozato H., Dubreuil V., Mello-Théry N. A., 2013 : Tendências e rupturas climato-hidrológicas no sitio Ramsar PARNA Pantanal (MT, Brasil). *Revista brasileira de climatologia*, **9**, 164-184.
- Xavier T. de M. B. S., Silva M. E. S., 2010 : *Estatística aplicada à climatologia*. Apostila para mini curso II do IX Simpósio de Brasileiro de Climatologia Geográfica. Fortaleza. **1**. 76 p.