INTEGRAÇÃO DE MODELOS DE CLIMA EM MODELOS HIDROLÓGICOS: UMA META-ANÁLISE DE ESTUDOS NO BRASIL

Pablo Borges de Amorim [1] & Pedro Luiz Borges Chaffe[2]*

Resumo – Os estudos de impacto hidrológico na escala regional têm crescido substancialmente nas duas últimas duas décadas, porém pouco se sabe sobre estes no território brasileiro. O objetivo deste estudo é identificar como a comunidade científica brasileira vem tratando o tema "integração de modelos de clima em modelos hidrológicos" bem como avaliar sua consistência com o atual estado-da-arte. O estudo fez uma meta-análise da literatura disponível considerando três fatores principais: i) a quantidade e qualidade das publicações, ii) o interesse quanto à região hidrográfica, setor socioeconômico e objetivo do estudo e, iii) a abordagem aplicada de acordo com a modelagem de clima, de regionalização e hidrológica. O estudo mostra que o tema, considerado de alta relevância científica, vem crescendo nesta última década. Ao mesmo tempo, existem limitações substanciais quanto à base de dados e ao número de estudos na mesma região. O estudo também discute os desafios e sugere oportunidades para o desenvolvimento do tema na comunidade cientifica brasileira.

Palavras-Chave – modelos de clima, modelos hidrológicos, revisão

INTEGRATING CLIMATE MODELLING INTO HYDROLOGICAL MODELLING: A META-ANALYSIS OF STUDIES IN BRAZIL

Abstract – Hydrological impact studies on the regional scale have grown substantially in the last two decades; however, little is known about them in the Brazilian territory. The aim of this study is to identify how the Brazilian scientific community has been dealing with the theme "integration of climate models into hydrological models" and to evaluate its consistency with the current state-of-the-art. We did a meta-analysis considering three main factors of the available literature that analyzes: i) the quantity and quality of the publications, ii) the interest concerning to the hydrographic region, socioeconomic sector and objective of the study, and iii) the applied approach according to the modelling of climate, regionalization and hydrology. The study shows that the topic, considered of high scientific relevance, has been growing in the last decade. At the same time, there are substantial limitations to the database and to the number of studies in the same region. The study also discusses the challenges and suggests opportunities for the development of the theme among the Brazilian scientific community

Keywords – Climate models, hydrological models, review

[1] Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Bolsista PNPD/CAPES, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA). borgesdeamorim.pablo@gmail.com
[2] Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS). pedro.chaffe@ufsc.br

1. INTRODUÇÃO

A mudança do clima global é inequívoca, porém seus impactos na escala regional ainda são pouco conhecidos e é exatamente no nível regional e local que ações de adaptação são necessárias. Várias abordagens têm surgido como meio de prover informações sobre mudanças climáticas na escala necessária para as tomadas de decisão. Uma abordagem comum é o "caminho baseado em cenários", ou *scenario-based pathway* ou *top-down*. O método envolve uma sequência de etapas de análise e quantificação de incertezas nos processos de modelagem que vão da escala global até a local (i.e., cenários de emissões -> modelagem de clima -> regionalização -> modelagem de impacto -> medidas de adaptação). Embora muitos estudos argumentem que a abordagem *top-down* sozinha não fornece diretrizes para tomadas de decisão, a mesma é fundamental para se compreender a complexidade e as interações do sistema hidro-climatológico (Mimura *et al*. 2014). O número de estudos de impacto hidrológico na escala regional cresceu substancialmente nas duas últimas duas décadas (Hewitson *et al.* 2014), porém pouco se sabe sobre estes no território brasileiro. O objetivo deste trabalho é identificar como a comunidade científica vem tratando o tema "integração de modelos de clima em modelos hidrológicos" no Brasil bem como avaliar sua consistência com o atual estado-da-arte. O propósito é gerar informações úteis para identificar as lacunas e limitações, entender desafios e gerar oportunidades para o crescimento do tema no Brasil. O XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos é uma excelente oportunidade para trazer o tema para um diálogo aberto entre a comunidade científica brasileira. Além disso, espera-se fornecer diretrizes para o estabelecimento de estratégias coordenadas entre as instituições de interesse afim de alavancar a temática no Brasil, equalizar com os padrões internacionais e tornar-se referência na América Latina. O estudo é baseado em uma meta-análise da literatura disponível.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Busca por artigos

Realizou-se uma busca abrangente da literatura, com o objetivo de identificar documentos revisados por pares (*peer reviewed*) e relatórios relevantes (literatura cinza) que integram as saídas de modelos de clima com modelagem hidrológica em estudos de caso no território brasileiro. A busca por artigos foi efetuada em maio de 2017 na plataforma *Scopus*. A mesma foi escolhida por ser uma das mais eficazes e abrangentes ferramenta de busca de literatura (Harzing e Alakangas, 2016). Foram incluídos trabalhos escritos em inglês e português. Não foram consideradas publicações como dissertações de doutorado, capítulos de livros e trabalhos de conferências. As funções Booleanas disponíveis no sistema foram aplicadas para encontrar documentos elegíveis. Combinou-se as seguintes palavras-chave no campo de "título/resumo/palavras-chave": "climate model" OR gcm OR aogcm OR oagcm OR "climate change" AND hydrologic OR hydrology OR hydrological OR hydraulic OR "rainfall-runoff" AND Brazil. Inicialmente a busca rendeu 83 documentos, porém apenas 32 foram considerados relevantes para o propósito do estudo. A tabela 1 descreve a lista dos documentos científicos selecionados. O conjunto é composto de um relatório (literatura cinza) e 31 artigos publicados em periódico com *peer review* sendo 5 destes de origem nacional.

Tabela 1 – Descrição dos documentos científicos utilizados na meta-análise. Devido à limitação de tamanho, estes artigos não incluídos na lista de referências. Os periódicos internacionais estão destacados em itálico.

Autor(es)	Periódico ou relatório
Marengo et al. (1994)	*Climate Dynamics*

Güntner (2002)	*PIK Report*
Tucci et al. (2003)	*Water Resources Research*
Araújo et al. (2004)	*Water International*
Coelho et al. (2006)	*Meteorological Applications*
Krol e Bronstert (2007)	*Environmental Modelling & Software*
Block et al. (2009)	*Journal of the American Water Resources Association*
Cook et al. (2010)	*Earth System Dynamics*
Montenegro e Ragab (2010)	*Hydrological Processes*
Gondim et al. (2011)	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
Gosling et al. (2011)	*Hydrology and Earth System Sciences*
Nóbrega et al. (2011)	*Hydrology and Earth System Sciences*
Sosa et al. (2011)	*Meteorological Applications*
Kwon et al. (2012)	*Hydrological Processes*
Braga et al. (2013)	*Journal of Hydrology*
Kruk et al. (2013)	*Journal of Hydrologic Engineering*
Perazzoli et al. (2013)	*Hydrological Sciences Journal*
Pinheiro et al. (2013)	*International Journal of Climatology*
Melo et al. (2014)	*Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*
Pereira et al. (2014)	*Hydrology Research*
Popescu et al. (2014)	*International Journal of River Basin Management*
Ho et al. (2015)	*Hydrological Sciences Journal*
Oliveira et al. (2015a)	*Hydrology and Earth System Sciences*
Oliveira et al. (2015b)	Revista Brasileira de Meteorologia
Iensen et al. (2015)	*Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*
Viola et al. (2015)	*International Journal of Climatology*
Alvarenga et al. (2016)	Ciência e Agrotecnologia
Silveira et al. (2016)	*Hydrology and Earth System Sciences*
Lamparter et al. (2016)	*Regional Environmental Change*
Tejadas et al. (2016)	Revista Brasileira de Meteorologia
Fernandes et al. (2017)	Revista Brasileira de Recursos Hídricos
Silveira et al. (2017)	*Journal of Water and Climate Change*

2.2. Caracterização da Meta-análise

A caracterização da meta-analise está diretamente relacionada com o intuito do estudo. Neste caso, o objetivo é identificar como a comunidade científica vem tratando o tema "integração de modelos de clima em modelos hidrológicos no Brasil" com o propósito de gerar informação para o aprimoramento do mesmo na comunidade científica brasileira. Desta forma, a caracterização da meta-análise considerou oito aspectos divididos em três grupos (Figura 1). O ano da publicação e o conceito Qualis-CAPES descrevem o grupo "quantidade e qualidade das publicações". O segundo grupo condiz ao interesse, o qual é dividido em região hidrográfica, setor socioeconômico e objetivo do estudo. O terceiro grupo trata da abordagem aplicada, a qual considera: a quantidade e a versão dos modelos de clima (*General Circulation Models* - GCM), a aplicação de técnicas de regionalização (*Regional Climate Model* – RCM, *Empirical Statistical Downscaling* - ESD, e *Bias Correction* - BC),

bem como o quantidade e tipos de modelos hidrológicos (*Hydrological Model* – HM). Propõe-se também uma síntese considerando as conclusões mais relevantes do conjunto de documentos, tanto quanto aos impactos quanto aos métodos aplicados.

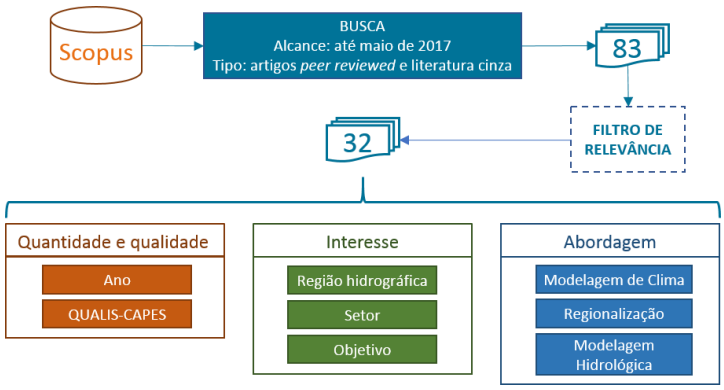

Figura 1 – Fluxograma da caracterização da meta-análise

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização quanto à quantidade e qualidade das publicações

O conceito Qualis dos periódicos é referente a "CLASSIFICAÇÃO DE PERIÓDICOS 2015" da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e foi obtido no *website* http://qualis.capes.gov.br/. Marengo *et al.* (1994) foi o primeiro artigo sobre o assunto no. A aquela época o tema era bastante novo e os estudos constituíam basicamente de avaliações de modelagem acoplada entre atmosfera e hidrosfera na escala global. Quase uma década mais tarde, o relatório de Güntner (2002) basicamente dá início aos estudos de impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos no Brasil. A partir de 2010, houve um crescimento na quantidade de publicações por ano, mostrando um maior interesse no assunto nesta última década (Figura 2). O ano de 2015 foi o mais produtivo apresentando cinco publicações sendo três delas conceito A1, considerado o mais elevado pela CAPES. Em geral, a maioria dos artigos (quinze) apresentam o conceito A1, sugerindo que o assunto é de alta relevância científica.

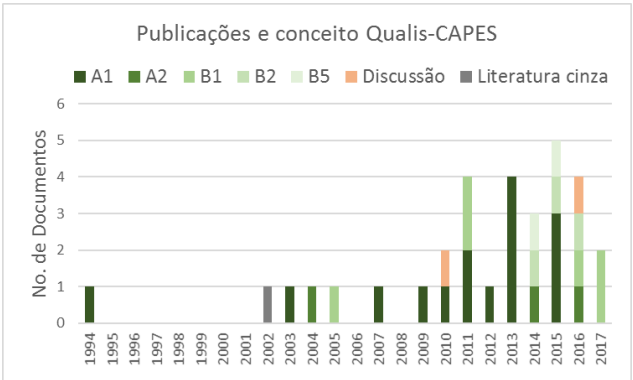

Figura 2 – Número de documentos por ano e respectivo conceito Qualis-CAPES 2015.

3.2. Caracterização quanto ao interesse

Algumas regiões hidrográficas brasileiras, bem como certos setores, apresentam maior vulnerabilidade às possíveis mudanças do clima do que outros. Este fato é refletido na quantidade de

estudos. A Figura 3 mostra que a maioria dos estudos (quinze artigos) estão focados em bacias na região hidrográfica do Paraná. Nesta região, o maior interesse é o setor hidroelétrico (sete artigos), seguido de abastecimento de água (quatro artigos). A segunda região de maior interesse é a do Atlântico Nordeste Oriental. A região que engloba o semiárido brasileiro, não por acaso tem como maior relevância o abastecimento de água (oito artigos). Conhecida mundialmente por sua disponibilidade hídrica e pela biodiversidade, a região do Amazonas é o foco de trabalhos científicos quando o assunto é mudanças climáticas. No entanto, a busca mostra poucos trabalhos sobre recursos hídricos na região e, mesmo assim, os mesmos tem um viés para conservação da biodiversidade (dois artigos). A região hidrográfica do Tocantins-Araguaia possui grande vocação para a agricultura irrigada (ANA 2009), porém encontrou-se apenas estudos do setor hidroelétrico (dois artigos) e de abastecimento (um artigo). Mesmo com o elevado contingente populacional e importância econômica, o Atlântico Sudeste apresenta um número muito baixo de estudos (dois). A região possui sérios problemas em suprir a demanda hídrica (MMA, 2006) e nenhum estudo sobre assunto foi encontrado. Também conhecida por desastres associados a enchentes (CEPED UFSC, 2013), a região apresenta apenas um estudo sobre o tema. Aliás, o setor de redução de rico de desastres, o qual está diretamente associado às mudanças climáticas, apresenta apenas dois estudos. Abordando o Brasil de forma geral, dois estudos foram encontrados sendo estes relacionados ao setor hidroelétrico. Ainda, quando o foco é águas subterrâneas, encontrou-se apenas um estudo, número muito baixo para um setor de alta relevância para segurança hídrica nacional (BRASIL, 1997). Quanto ao objetivo (não ilustrado), vinte documentos estão associados a estudos de impacto das mudanças climáticas, nove condizem a avaliação de métodos e três têm como foco o desenvolvimento de modelos. As diferenças parecem coerentes uma vez que a maioria dos estudos tendem a abordar a aplicação de métodos consolidados em diferentes locais e circunstâncias. Quase um terço dos estudos avaliam os métodos, investigação primordial para os estudos de impacto. O baixo número de estudos focados no desenvolvimento de métodos poder estar associado a limitações técnicas e financeiras nacionais. Estes estudos são normalmente mais sofisticados, o que faz com que demandem recursos humanos mais capacitados e infraestrutura mais adequada, e.g., supercomputadores (Shukla *et al.*, 2010).

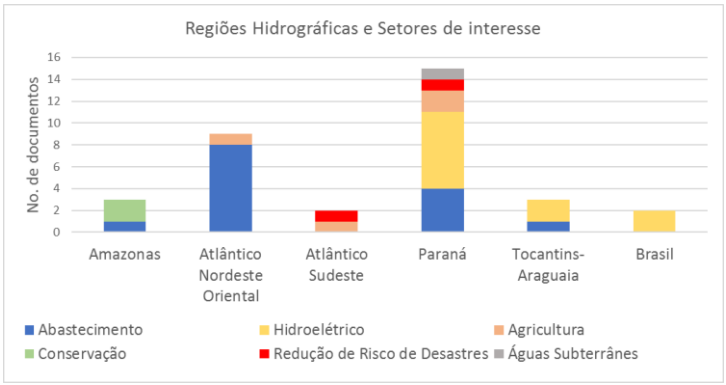

Figura 3 – Número de documentos por região hidrográfica e setor socioeconômico de interesse.

3.3. Caracterização quanto à abordagem aplicada

3.3.1. Modelagem de clima e regionalização

Diversas versões de GCMs e métodos de regionalização estão disponíveis. A seleção do(s) modelo(s) ou método(s) mais apropriado(s) depende do intuito do estudo de impacto e das características físicas do local de interesse. No entanto, em estudos de impacto, a abordagem mais

recomendada é a *muli-model ensemble* (MME). O MME baseia-se na afirmação de que nenhum modelo tem um desempenho melhor do que outro. A aplicação de um MME não só se beneficia de uma possível compensação de erros e da quantificação de incertezas, mas também de sua maior consistência e confiabilidade. Esta condição é válida tanto para os GCMs, quanto para as técnicas de regionalização e modelagem hidrológica (Maraun et al., 2010). No Brasil, quase um terço dos estudos adotam apenas um único GCM (Figura 4). Embora a maioria dos estudos considerem algum tipo de regionalização, o número limitado de GCMs reflete numa baixa confiabilidade das conclusões. Ao mesmo tempo em que estudos com um número maior de GCMs são mais robustos, os mesmos demandam recurso humano especializado e, no caso dos RCMs, maior capacidade computacional. Os resultados da Figura 4 refletem esta realidade. Quanto maior a quantidade de GCMs, menor é o número de estudos que aplicam RCM. Devido à baixa demanda por recurso humano especializado e capacidade computacional, o BC é o mais utilizado para grandes conjuntos de GCMs. Em alguns casos, técnicas de correção de viés também são aplicadas às saídas de RCM. Esta abordagem aparece em cinco documentos. Nenhum estudo que integra ou compara as duas famílias de *downscaling* (RCM com ESD) ou técnicas empíricas (ESD com BC) foi encontrado. Os resultados sugerem a existência de uma lacuna na aquisição de dados de GCMs bem como limitações computacionais para rodar RCMs. Além disso, notou-se que as definições das técnicas de regionalização são frequentemente confundidas. Também há diferenças significativas quanto a terminologia utilizada entre climatologistas e hidrólogos. Sendo assim, faz-se necessário estabelecer um léxico, ou glossário, entre a comunidade científica brasileira para uniformizar o entendimento dos conceitos, da classificação e dos termos utilizados no que diz respeito à integração de modelos de clima em modelos hidrológicos.

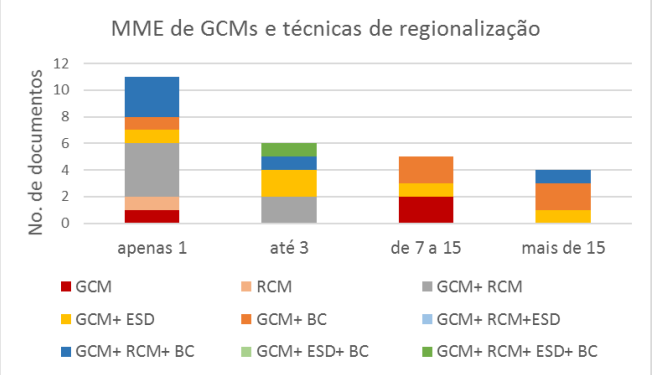

Figura 4 – Número de documentos por quantidade de GCMs e tipo(s) de técnica(s) de regionalização aplicada(s).

Quanto à tipologia (figura 5), o RCM mais aplicado foi o Eta do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). O mesmo tem sido frequentemente utilizado devido à intensa colaboração do CPTEC com outros grupos de pesquisa. Para os ESDs, o mais adotado foi o STAR, ou mais recentemente *STatistical Analogue Resampling Scheme* (STARS). Desenvolvido pelo *Potsdam Institute for Climate Research* (PIK), o modelo foi adotado em dois estudos com autores do mesmo instituto e em outro documento com autores de um instituto também da Alemanha. Dos BCs, os métodos mais aplicados foram o DCF e o *Quantile Mapping* (QM). A maioria dos estudos de impacto hidrológico aplicam o DCF. O mesmo pode fornece rapidamente um amplo conjunto de projeções regionalizadas, porém a simplicidade do método implica em uma série de limitações, e.g., a negligência de mudanças na variabilidade temporal. Já o QM, é mais sofisticado e tem demonstrado um considerável valor agregado às projeções regionais (Maraun *et al.* 2010).

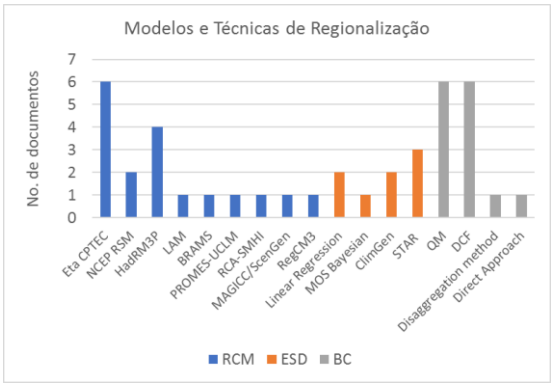

Figura 5 – Número de documentos por modelos e técnicas de regionalização aplicadas.

3.3.2. Modelagem hidrológica

Diversos modelos hidrológicos estão disponíveis abertamente para uso. No caso dos estudos no Brasil que consideram os impactos das mudanças climáticas (Figura 6), o modelo hidrológico mais aplicado foi o *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP). Três dos seis estudos utilizaram o SMAP para fins de abastecimento de água na região hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental. O Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH), foi aplicado em quatro estudos. Todos na região hidrográfica do Paraná sendo três sobre o setor hidroelétrico. Embora seja bastante popular, o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) foi utilizado em apenas três estudos. É importante destacar o trabalho de Pereira *et al.* (2014) que visa implementar um sistema hidrológico-atmosférico acoplado de duas vias (*two-way coupling* ou *inline*) para modelagem em escala regional.

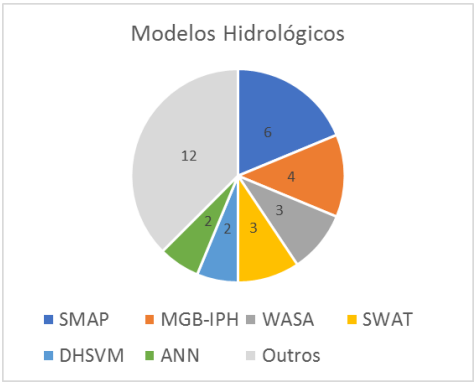

Figura 6 – Divisão do tipo de modelo hidrológico aplicado

4. CONCLUSÃO

A abordagem adotada para meta-análise de literatura mostrou-se bastante útil em identificar aspectos fundamentais sobre a integração de modelos de clima em modelos hidrológicos no Brasil. Com 32 documentos, o estudo mostra que houve um maior interesse sobre o assunto na última década e que a relevância científica do mesmo é elevada. A maioria dos estudos concentram-se na região hidrográfica do Paraná e focam no setor hidrelétrico e de abastecimento de água. A segunda região de maior interesse é a do Atlântico Nordeste Oriental, a qual, não por acaso, tem o abastecimento de água como setor de maior relevância. O setor de redução de rico de desastres e de águas subterrâneas tiveram baixa consideração. Dois terços dos documentos estão associados a estudos de impacto das mudanças climáticas, nove condizem a avaliação de métodos e três tem como foco o desenvolvimento de modelos. Embora estudos com um número maior de modelos (clima, regionalização, hidrológico)

seja recomendável, poucos adotaram esta abordagem. Limitações quanto a metodologia sugere a existência de dificuldades na aquisição de dados de GCMs bem como limitações computacionais e de recurso humano especializado para aplicar modelos de regionalização. Uma maneira para preencher esta lacuna seria a criação de um serviço especializado e de uma plataforma aberta que disponibilize as saídas de todos os GCMs. Uma plataforma amigável, com produtos, suporte técnico e recomendações de uso dos dados voltadas para estudos hidrológicos. Através de suas atividades regionais, o *World Climate Research Programme* (WCRP) prevê orientação e suporte a este tipo de inciativa, podendo esta ser uma oportunidade para a implementação de ações coordenadas no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Nacional de Pós Doutorado da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (PNPD/CAPES) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental-UFSC pela bolsa do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

ANA (2009). Plano estratégico de recursos hídricos da bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia: relatório-síntese. ANA-Agência Nacional de Águas, Brasília-DF, 256 p.

BRASIL (1997). Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei 9.433.

CEPED UFSC, 2013. Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume Brasil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED UFSC), Florianópolis-SC, 126 p.

GÜNTNER, A. (2002). Large-scale hydrological modelling in the semi-arid north-east of Brazil (No. 77). Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, Alemanha, 152 p.

HARZING, A.-W.; ALAKANGAS, S. (2016). Google Scholar, Scopus and the Web of Science: a longitudinal and cross-disciplinary comparison. *Scientometrics* 106, pp. 787–804.

HEWITSON, B.C. et al. (2014) Regional context. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Org. BARROS, V.R. et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1133-1197

MARAUN, D. et al. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Rev. Geophys.* 48.

MARENGO, J.A., et al. (1994). Calculations of river-runoff in the GISS GGM: impact of a new land-surface parameterization and runoff routing model on the hydrology of the Amazon River. *Clim. Dyn*. 10, pp. 349–361.

MMA (2006) Caderno da Região Hidrográfica Atlântico Sudeste. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), Brasília-DF, 140 p.

MIMURA, N. et al. (2014). Adaptation planning and implementation. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Org. FIELD, C.B. et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 869-898

PEREIRA, F.F.; de MORAES, M.A.E.; UVO, C.B. (2014). Implementation of a two-way coupled atmospheric-hydrological system for environmental modeling at regional scale. *Hydrol. Res.* 45, pp. 504-514.

SHUKLA, J. et al. (2010). Toward a New Generation of World Climate Research and Computing Facilities. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 91, pp. 1407–1412.