

PERDAS EM TRÂNSITO EM REGIÕES SEMIÁRIDAS E ÁRIDAS: ANÁLISE DE DADOS DE MÚLTIPLOS TIPOS E MODELAGEM HIDROLÓGICA SEMIDISTRIBUÍDA

Alexandre C. Costa^{1} & Axel Bronstert² & José C. de Araújo³ & Saskia Foerster⁴*

Resumo – Perdas em trânsito são fundamentais para o planejamento e o gerenciamento dos recursos naturais em ambientes semiáridos e áridos, pois elas reduzem não somente o volume do deflúvio superficial, mas também as vazões de pico, são a maior fonte de recarga subterrânea e dão suporte aos ecossistemas de zonas ribeirinhas. Nesta pesquisa, as perdas em trânsito em um trecho de 30 km do Rio Jaguaribe, Ceará, Brasil, foram analisadas a partir de dados de vazão de rio, lençol subterrâneo e imagens multi-temporais da extensão superficial do deflúvio no rio. Também, foi desenvolvido um novo modelo capaz de simular a propagação de escoamentos em rios e suas perdas em trânsito sobre diferentes controles climáticos e hidro-geológicos, que são geralmente encontrados em regiões semiáridas e áridas. Com vistas à previsão de longo-prazo do deflúvio superficial e das perdas em trânsito, o modelo simulou com sucesso o volume total do evento deflúvio e o pico da vazão para os dois estudos de caso: o trecho acima do Rio Jaguaribe e um trecho de 1,5 km do rio principal da Bacia Experimental de Walnut Gulch, Arizona, EUA. Além disso, foram avaliadas as incertezas da nova modelagem em termos de estrutura e parâmetros.

Palavras-Chave – Perdas em trânsito; Análise e modelagem hidrológica; Sensoriamento remoto multitemporal.

CHANNEL TRANSMISSION LOSSES IN DRYLAND RIVERS: MULTIPLE TYPE DATA ANALYSIS AND SEMI-DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODELLING

Abstract – Channel transmission losses are a key factor for water and environmental planning and management in dryland environments, since they reduce not only surface flow volume, but also peak discharges, support riparian vegetation, and are a major source of potential groundwater recharge. In this research, the channel transmission losses in a 30-km reach of the Jaguaribe River, Ceará, Brazil, were evaluated based on streamflow discharge series, groundwater level series and multi-temporal satellite images from the surface water cover of the river flow. Also, a new hydrological model was developed in order to simulate streamflow propagation and its channel transmission losses under different climate and hydro-geologic controls, which are typically found in dryland regions of the Earth. Considering a perspective of water planning and management in arid and semi-arid environments, the model was able to predict reliably the streamflow volume and peak for both case studies: the aforementioned reach of the Jaguaribe River and a 1.5-km reach of the main river of the Walnut Gulch Experimental Catchment, Arizona, USA. Moreover, modelling uncertainties were evaluated regarding to model structure and parameters.

Keywords – Channel transmission losses; Hydrological modelling and analysis; Multi-temporal remote sensing.

¹ Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Av. Rui Barbosa 1246, CEP: 60744-040, Fortaleza, Brasil, cunhacos@gmail.com.

² University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Str. 24/25, 14476 Potsdam, Germany, axelbron@uni-potsdam.de.

³ Universidade Federal do Ceará, Bl. 804 – Campus do Pici, CEP: 60455-970, Fortaleza, Brasil, jcaraujo@ufc.br.

⁴ Helmholtz Centre Potsdam, German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany, foerster@gfz-potsdam.de.

* Autor Correspondente.

INTRODUÇÃO

Rios em regiões semiáridas e áridas podem ser classificados em a) rios alogênicos, em que suas principais fontes ocorrem em áreas úmidas à montante e que normalmente sustentam escoamento perene infiltrando parcialmente no sistema aluvionar ao longo do rio, e b) rios endogênicos, em que suas principais fontes ocorrem inteiramente em ambientes semiáridos ou áridos e que normalmente apresentam escoamento efêmero (sem escoamento de base) ou intermitente [Bull e Kirkby (2002)].

As perdas em trânsito do rio para o sistema subterrâneo podem ocorrer tanto em rios alogênicos como em rios endogênicos, em canais com extensivos aluviões [Renard *et al.* (1970)] ou com leitos controlados por rochas fraturadas [Hughes (2008)]. Elas ocorrem também em rios hidraulicamente conectados ou desconectados com o lençol subterrâneo [Sophocleous (2002)]. Rios, que somente recarrega água subterrânea são chamados rios influentes, enquanto que aqueles que recebem contribuição de fluxo subterrâneo são chamados de rios efluentes [Ivkovic (2009)]. Uma revisão dos processos hidrológicos envolvidos nas perdas em trânsito pode ser encontrada, por exemplo, em Costa *et al.* (2012a; 2013a)

Perdas em trânsito são uma peça chave para o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos e naturais em ambientes semiáridos e áridos, pois elas reduzem não somente o volume do deflúvio superficial, mas também as vazões de pico, são a maior fonte de recarga subterrânea e dão suporte aos ecossistemas de zonas ribeirinhas. Além disso, a conectividade hidrológica superficial entre bacias hidrográficas e redes de drenagem somente ocorre se o deflúvio propagado pelos canais superar as perdas em trânsito [Bracken e Croke (2007)]. Conseqüentemente, deflúvio superficial, transporte de sedimentos e morfologia de rios dependem das perdas em trânsito [Shannon *et al.* (2002)].

FRONTEIRAS CIENTÍFICAS E OBJETIVOS

A escassez de dados hidrológicos, especialmente de dados simultâneos de vazão de rio e nível do lençol subterrâneo, em ambientes semiáridos e áridos restringe o entendimento e a regionalização do funcionamento das perdas em trânsito. Além disso, estudos anteriores não apresentaram nenhuma informação sobre a dinâmica espacial do rio entre as estações fluviométricas analisadas, o que produz inevitavelmente grandes incertezas em torno da análise de perdas em trânsito em grandes rios.

Vários modelos foram desenvolvidos para a simulação conjunta da propagação de escoamentos em rios e suas perdas em trânsito. Entretanto, a grande maioria dos modelos é específica para as condições de estudo (e.g. rios efêmeros, rios intermitentes conectados ao lençol subterrâneo ou rios intermitentes desconectados ao lençol subterrâneo), possuindo, então, pouca capacidade de transferência para regiões não monitoradas e de simulação de sistemas hidrológicos complexos que envolvem perdas em trânsito com diferentes aspectos dominantes. Além disso, análise de incertezas da modelagem ainda não foi apropriadamente levada em conta nos estudos sobre perdas em trânsito.

Os objetivos desta pesquisa foram a) analisar as perdas em trânsito em um grande rio do semiárido do Nordeste Brasileiro (NEB) a partir de dados de múltiplos tipos (vazão de rio, nível da água subterrânea e imagens multitemporais da extensão superficial do deflúvio no rio); b) desenvolver um novo modelo capaz de simular a propagação de escoamentos em rios e suas perdas em trânsito sobre diferentes controles climáticos e hidrogeológicos, que são geralmente encontrados em regiões semiáridas e áridas, e c) avaliar as incertezas da nova modelagem em termos de estrutura e parâmetros.

ANÁLISE DAS PERDAS EM TRÂNSITO A PARTIR DE DADOS DE MÚLTIPLOS TIPOS

Um trecho de 60 km do Rio Jaguaribe (Fig. 1), localizado no semiárido do NEB, foi escolhido para o estudo. As estações fluviométricas a montante (N1 e N2) controlam juntas 20.000 km², enquanto que a área de drenagem entre elas e a estação fluviométrica a jusante (N3) é aproximadamente de 1.000 km². Os hidrogramas de entrada no trecho podem ser naturais (chuva-deflúvio a montante das estações N1 e N2) ou artificiais, que são providas de liberações de reservatórios superficiais a montante.

Ao todo, foram analisados: o balanço hídrico de 40 eventos de deflúvio nesse trecho entre 2001 e 2010, dados simultâneos de deflúvio superficial e do aquífero para a estação chuvosa e seca em 2010, imagens multitemporais da extensão superficial do deflúvio no rio (Fig. 2) a partir de uma constelação de satélites óticos chamados RapidEye [RAPIDEYE (2010)], e dados das condições hidrogeológicas locais (mapa hidrogeológico e estratigrafia de poços).

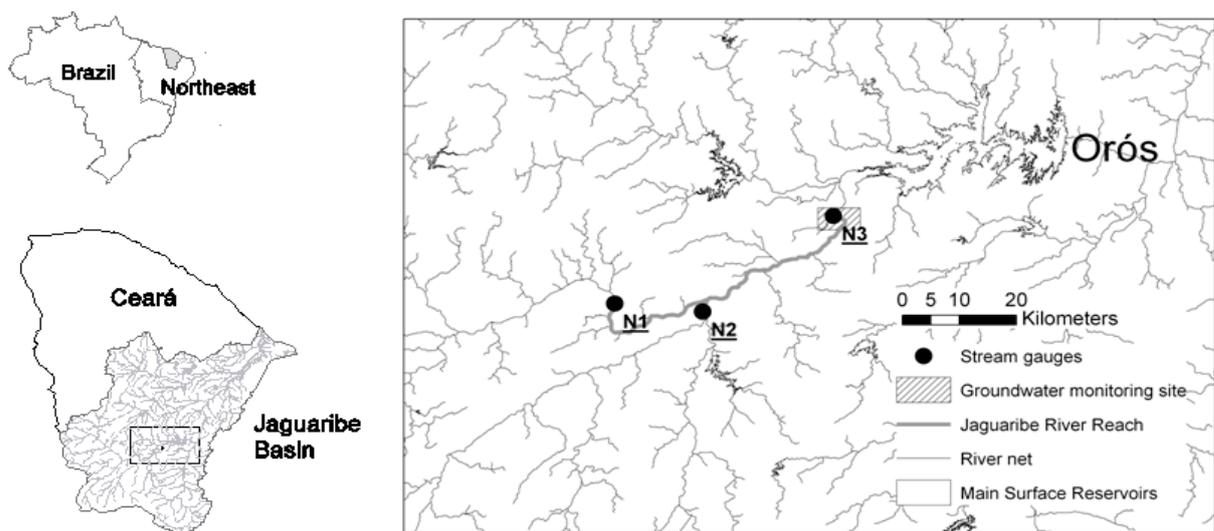


Figura 1 – Localização do trecho do Rio Jaguaribe em estudo [de Costa *et al.* (2013a)].

As perdas em trânsito ocorrem em 30 km do trecho, que é dominado por aluviões com aquíferos não confinados. Durante a estação seca, hidrogramas naturais ou artificiais de entrada (N1+N2) com volumes totais menores $9,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ não chegaram no exutório do trecho (N3) (17 dos 40 eventos). Sete eventos deflúvio com volumes de entrada entre 20 e $1.460 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, chegaram ao exutório, mas perdendo em média 30% do volume inicial e 37% da vazão de pico. Além disso, foi encontrado que quanto maior foi o deflúvio de entrada, maior foram as perdas em trânsito, tendo

uma relação linear ($r^2 = 0,88$) em um gráfico log-log. No total, 27 dos 40 eventos apresentaram perdas em trânsito totais ou parciais durante os 10 anos de análise, somando um total de $880 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

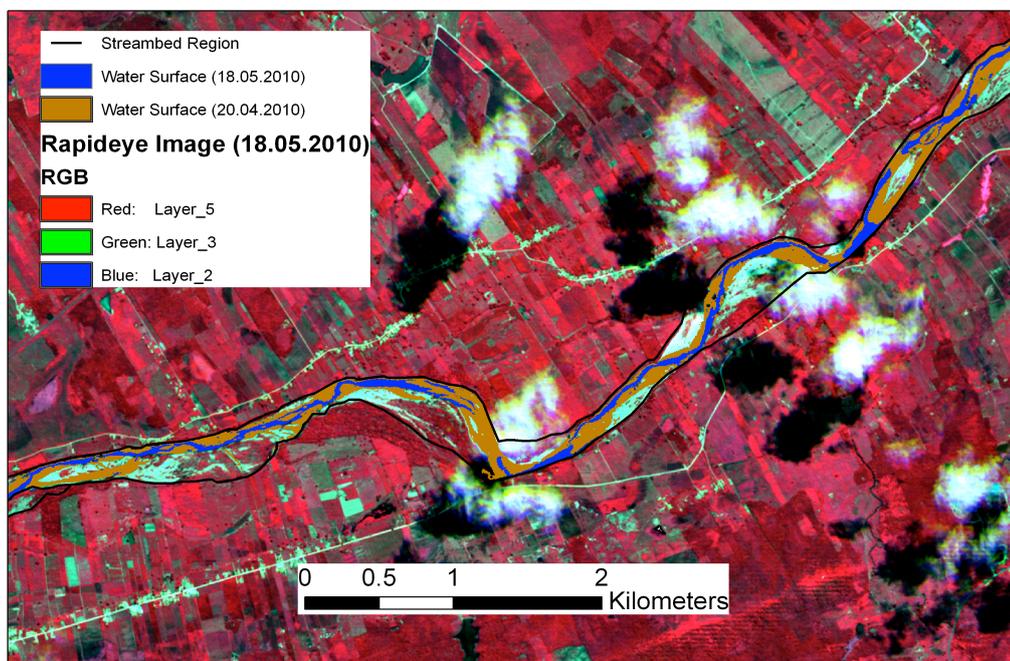


Figura 2 – Detalhes da água superficial dentro do trecho em estudo com imagens coletadas um dia após o pico da estação chuvosa (20.04) e durante a recessão do hidrograma (18.05) em 2010. Composição da cor da imagem: Vermelho= NIR, Verde= vermelho e Azul= verde [de Costa *et al.* (2013a)].

Os dados auxiliares de água subterrânea e sensoriamento remoto indicaram que as perdas em trânsito infiltraram somente pelo leito e taludes do rio, e não pela planície de inundação, em 24 dos 27 eventos que apresentaram perdas em trânsito, e que a água uma vez infiltrada pôde retornar ao canal do rio como escoamento de base, quando o nível da água subterrânea foi maior que o nível do rio.

Os processos envolvidos das perdas em trânsito podem ser idealizados da seguinte forma: durante as estações secas e começo das estações chuvosas, não é esperado escoamento no rio antes do evento de deflúvio (Fig. 3a) e a infiltração do rio no aluvião é predominantemente vertical (Fig. 3b). Na metade e no final das estações chuvosas, o escoamento no rio sustenta escoamento de base, que ocorre antes e depois dos eventos deflúvio (Fig. 3c), e a infiltração lateral é o mecanismo dominante das perdas em trânsito (Fig. 3d). Assim, o trecho em estudo do Rio Jaguaribe (hidraulicamente conectado com o aquífero) muda de um rio influente na estação seca e no começo da estação chuvosa para um rio influente/efluente (predominantemente influente) na metade e no final das estações chuvosas.

Além disso, a estimativa das perdas em trânsito por volumes de água do rio, usando a extensão da água superficial obtida por sensoriamento remoto e informação das seções do rio, indicou resultados similares com aqueles baseados no balanço hídrico entre as estações fluviométricas. Então, a estimativa por sensoriamento remoto e topografia do rio pode fornecer informações quantitativas da ordem de grandeza das perdas em trânsito em rios não monitorados.

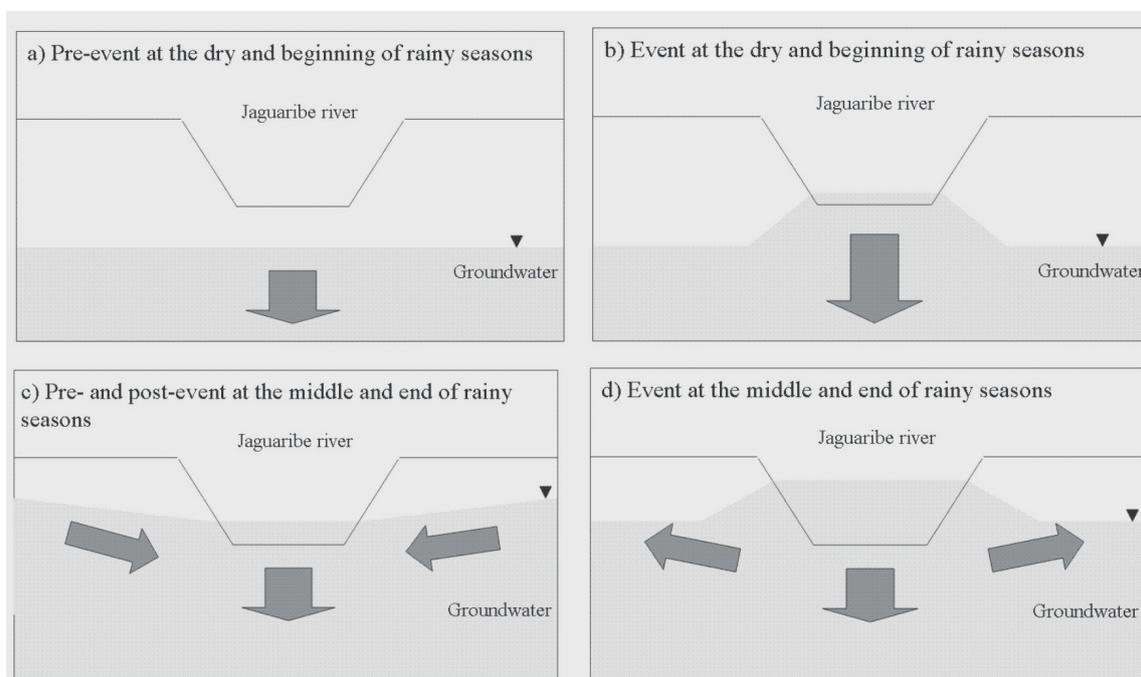


Figura 3 – Descrição conceitual das perdas em trânsito no trecho do Rio Jaguaribe em estudo de acordo com as estações do ano [de Costa *et al.* (2013a)].

MODELAGEM HIDROLÓGICA SEMIDISTRIBUÍDA DAS PERDAS EM TRÂNSITO

Nesta pesquisa, foi desenvolvido um modelo hidrológico semidistribuído (Fig. 4), usando formulações convenientes para regiões semiáridas e áridas, que são caracterizadas pela escassez de dados geoambientais e hidrológicos. O modelo considera os principais processos envolvidos nas perdas em trânsito, são eles: a) propagação do deflúvio em rios naturais; b) infiltração na zona não saturada e estratificada abaixo do leito do rio para diferentes níveis de deflúvio; c) redistribuição da água na zona não saturada; d) interação lateral do sistema (rio-)aquífero; e e) fluxo de água subterrânea, paralelo ao curso do rio, em aquíferos não confinados. Ele é aplicável tanto em rios influentes, que são hidráulicamente desconectados com o fluxo subterrâneo (tipo 1) como em rios influentes/efluentes conectados com o mesmo (tipo 2).

O modelo foi avaliado para um trecho do Rio Jaguaribe (TRJ) (ver seção anterior), que é predominantemente do tipo 2, e para um pequeno trecho de 1,5 km do rio principal da Bacia Experimental de Walnut Gulch (BEWG), Arizona, EUA, que é um rio do tipo 1 [ver Costa *et al.* (2012)]. Com vistas à previsão de longo-prazo do deflúvio superficial e das perdas em trânsito para efeitos de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, o modelo simulou com sucesso o volume total do evento deflúvio e o pico da vazão para ambos os casos, considerando apenas uma parametrização inicial, ou seja, sem calibração. Por exemplo, o erro absoluto médio (EAM) para o volume total e a vazão de pico das estações chuvosas de 2005, 2009 e 2010 foi de 4% e 13%, respectivamente, para o TRJ.

Uma avaliação de hipóteses sobre os processos dominantes das perdas em trânsito no TRJ foi fundamental para a redução das incertezas relacionadas à estrutura do modelo e para o

aperfeiçoamento da previsão da vazão no rio. O EAM do volume total do evento deflúvio foi de a) 41%, quando se desconsiderou as perdas em trânsito (apenas propagação do deflúvio) (“FW”); b) 10%, quando se considerou as trocas laterais entre rio e aquífero (LD) (“FW+LD”); e c) 4%, quando se considerou também o fluxo subterrâneo (GW) (“FW+LD+GW”). Assim, LD e GW são necessários para a previsão da vazão no rio, sendo o primeiro mais relevante que o segundo processo. Um exemplo desta análise pode ser vista na Fig. 5, que apresenta a simulação do deflúvio na estação fluviométrica N3 (ver Fig. 1) em 2010 a partir do hidrograma de entrada (N2+N1).

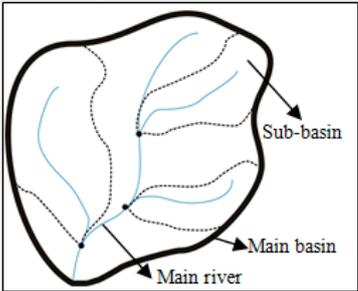
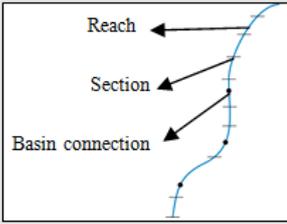
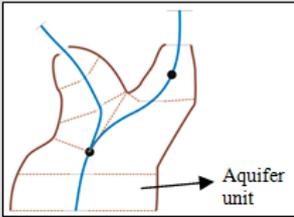
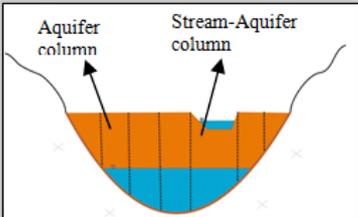
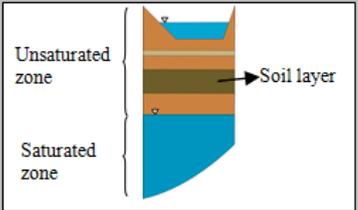
Component	Spatial evolution/ Process	Sub-model
1 Basin system: 	Distribution of streamflow generated from sub-basins into the main river	In-basin streamflow distribution
2 River system: 	 Streamflow in natural rivers	Flood wave routing
3 Aquifer system: 	 Groundwater flow, parallel to the river course, in unconfined aquifers, which takes place beyond the basins' limits	Groundwater flow model
4 Aquifer unit: 	 Lateral (stream-)aquifer interaction, including the development of a groundwater mound	Lateral (stream-)aquifer dynamics model
5 Stream-aquifer column: 	 Unsaturated seepage under in-channel variable ponding depth through a stratified alluvium and vertical subsurface water redistribution beneath the stream	Unsaturated stream infiltration and vertical soil water redistribution models

Figura 4 – Componentes espaciais da estrutura do modelo, que conecta os submodelos dos processos governantes envolvidos nas perdas em trânsito [de Costa *et al.* (2012a)].

A análise de sensibilidade dos parâmetros mostrou que as formulações aplicadas para descrever os processos na zona não saturada abaixo do leito rio (altamente não lineares com resolução numérica elaborada), que são dominantes para o estudo de caso da BEWG, são muito mais sensíveis à variabilidade dos parâmetros que aquelas aplicadas para os processos na zona saturada (matematicamente simples balanços hídricos entre unidades de aquífero, incluindo efeitos de remanso), que são dominantes para o estudo de caso do TRJ.

Aplicando-se uma simulação de Monte Carlo com base na variação dos parâmetros mais sensíveis para cada um dos casos em estudo, obteve-se que: a) para o TRJ, as incertezas relacionadas à estrutura do modelo devido ao conhecimento limitado das interações do sistema saturado subsuperficial (i.e. acoplamento do fluxo subterrâneo com o deflúvio no rio; possível escoamento subterrâneo paralelo ao curso do rio) foram mais relevantes que aquelas relacionadas à variabilidade dos parâmetros desse sistema subsuperficial; b) a não linearidade envolvida nos processos da zona não saturada em rios desconectados com o fluxo subterrâneo (BEWG) contém muito mais incertezas na modelagem que sistemas controlados por escoamento saturado subsuperficial (TRJ). Dessa forma, o grau de aridez de uma região pode ser um indicador da incerteza potencial da modelagem e a subsequente predicabilidade alcançável de um, sistema rio-aquífero.

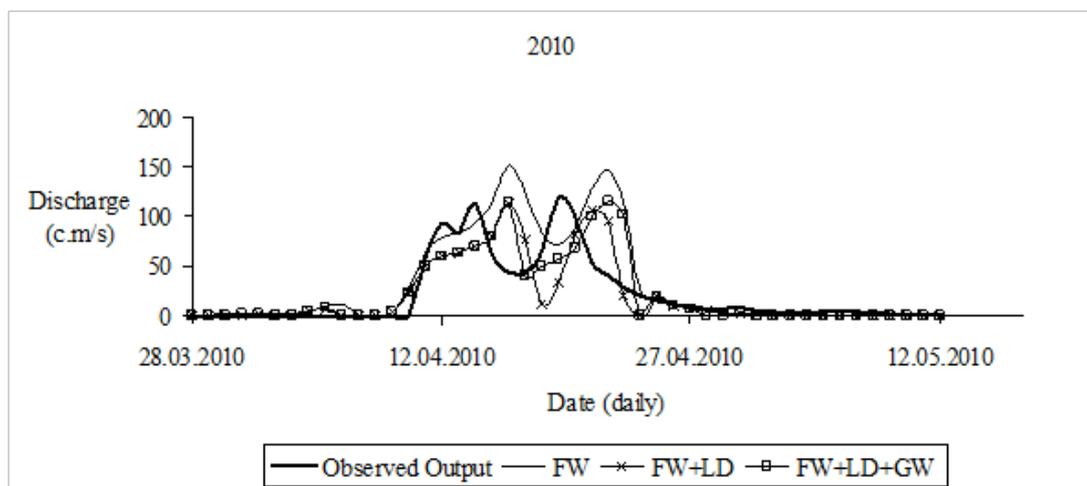


Figura 5 – Simulação do deflúvio na estação fluviométrica N3 em 2010 a partir do hidrograma de entrada (N2+N1), em que “FW” representa apenas a propagação do deflúvio, “FW+LD” o primeiro mais as trocas laterais entre rio e aquífero, e “FW+LD+GW” o segundo mais o fluxo subterrâneo paralelo ao curso do rio [de Costa *et al.* (2012a)].

PERSPECTIVAS

Pesquisa vem sendo realizada para a quantificação (mais detalhada) do bombeamento ao longo do curso do Rio Jaguaribe entre as estações N1+N2 e N3 (ver Fig. 1) para uma simulação contínua do sistema rio-aquífero durante as estações chuvosas e secas (sem chuvas). O primeiro produto desta pesquisa foi o mapeamento das principais classes da cobertura do solo nesta região [Costa *et al.* (2013b)]. Também, o presente modelo de perdas em trânsito está sendo acoplado com um modelo chuva-deflúvio semidistribuído para simulação de sistemas hidrológicos complexos em regiões semiáridas e áridas. É esperado que este acoplamento permita a avaliação não somente da

disponibilidade hídrica superficial no NEB, mas também dos reservatórios subterrâneos e suas interações com as águas superficiais. Para maiores detalhes sobre os trabalhos apresentados neste artigo e a lista completa de agradecimentos, por favor, consultar Costa *et al.* (2012a,b), Costa e Bronstert (2012) e Costa *et al.* (2013a).

AGRADECIMENTOS

O primeiro Autor agradece ao CNPq pela bolsa de doutorado integral no exterior.

REFERÊNCIAS

- BRACKEN, L.; CROKE, J. (2007) The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes* 21, pp. 1749–1763.
- BULL, L.J.; KIRKBY, M.J. (2002) Dryland river characteristics and concepts. In *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*. Org. por Bull, L.J. e Kirkby, M.J., John Wiley & Sons, Chichester, England.
- COSTA, A.C.; BRONSTERT, A.; DE ARAÚJO, J.C. (2012a) A channel transmission losses model for different dryland rivers. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, pp. 1111–1135.
- COSTA, A.C.; FOERSTER, S.; BRONSTERT, A.; DE ARAÚJO, J.C. (2012b) Morphological controls of floods in a large dryland river in Brazil. In *Anais do 4. RapidEye Science Archive (RESA) - Vom Algorithmus zum Produkt*, Neustrelitz, 2012, pp. 113–119.
- COSTA, A.C.; BRONSTERT, A. (2012) Modellierung von Durchflussverlusten in Flüssen trockener Landschaften. In *Anais do Tag der Hydrologie*, Freiburg, 2012, 31, pp. 237–242.
- COSTA, A.C.; FOERSTER, S.; DE ARAÚJO, J.C.; BRONSTERT, A. (2013a) Analysis of channel transmission losses in a dryland river reach in north-eastern Brazil using streamflow series, groundwater level series and multi-temporal satellite data. *Hydrological Processes* 27, pp. 1046–1060.
- COSTA, A.C.; FOERSTER, S.; BRONSTERT, A.; DE ARAÚJO, J.C. (2013b) Bi-temporal land cover classification for the hydrological understanding of a large dryland river in Brazilian Semiarid. In *Anais do 5. RapidEye Science Archive (RESA) - Von den Grundlagen bis zum Service*, Neustrelitz, 2013, pp. 113–119.
- HUGHES, D.A. (2008) Modelling semi-arid and arid hydrology and water resources: the southern Africa experience. In *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. Org. por Wheater, H.; Sorooshian, S. e Sharma, K.D., Cambridge Press, New York, USA.
- IVKOVIC, K.M. (2009) A top-down approach to characterise aquifer-river interaction processes. *Journal of Hydrology* 365, pp. 145–155.
- RAPIDEYE AG (2010) *Rapideye Standard Image Product Specifications*. Rapideye AG, Germany, version 3.0, 54 p.
- RENARD, K.G. (1970) *The hydrology of semiarid rangeland watersheds*. Rep. ARS-41-162, Agric. Res. Serv., US Dep. of Agric., Washington, D.C..
- SHANNON, J.; RICHARDSON, R.; THORNES, J. (2002) Modelling Event-based Fluxes in Ephemeral Streams. In *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*. Org. por Bull, L.J. e Kirkby, M.J., John Wiley & Sons, Chichester, England.
- SOPHOCLEOUS, M. (2002) Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal* 10, pp. 52–67.