

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

UM MAPA DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS BRASILEIRAS A PARTIR DE SENSORIAMENTO REMOTO E MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Ayan Santos Fleischmann¹; Vinícius Alencar Siqueira²; João Paulo Fialho Brêda³; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva⁴; Anderson Luis Ruhoff⁵; Rafael Barbedo Fontana⁶; Adalberto Meller⁷; Alexandre de Amorim Teixeira⁸; Alexandre Abdalla Araujo⁹; Marcus Fuckner¹⁰; Saulo Aires de Souza¹¹; Fernando Mainardi Fan¹²; Fabrice Papa¹³; Etienne Fluet-Chouinard¹⁴ & Walter Collischonn¹⁵

RESUMO

O mapeamento de águas superficiais (rios, áreas úmidas e lagos naturais e artificiais) em escala nacional é fundamental para otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos. No Brasil, áreas úmidas estão presentes em regiões como a Amazônia Central e o Pantanal, mas também em pequenos rios ao longo do território nacional, em veredas e vegetações ripárias, ou mesmo em áreas distantes destes rios. Grandes lagos artificiais também estão presentes, associados em sua maioria à geração de energia elétrica. Assim, apresentamos aqui um mapa para o Brasil da extensão de águas superficiais, em resolução espacial de 90 m. O produto contém informações de três classes: 1) rios, 2) áreas úmidas/lagos naturais e 3) lagos artificiais, e é oriundo da combinação de bases de dados pré-existentes, baseadas em sensores ópticos, radar e micro-ondas passivo, bem como modelagem hidrodinâmica de grande escala. Como resultado, estimou-se um total de 725.000 km² de áreas úmidas e lagos naturais em todo o Brasil, 48.954 km² de rios e 46.490 km² de lagos artificiais, sendo que a primeira classe corresponde a 8% do território nacional. Também foram estimados valores de área por unidade federativa, com o estado do Amazonas possuindo a maior extensão de áreas úmidas (198.068 km²). Salienta-se algumas incertezas do produto, incluindo a incapacidade de mapear pequenos rios e áreas úmidas (como veredas) inferiores à resolução (90 m), que serão objeto de desenvolvimentos futuros. Entende-se que o produto desenvolvido tem enorme potencial para melhorar a compreensão dos recursos hídricos brasileiros e facilitar a gestão destes recursos.

Palavras-Chave – Áreas úmidas, áreas inundáveis, massas d'água

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)/UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil, ayan.fleischmann@gmail.com;

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)/UFRGS, vinisiquera@gmail.com;

3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)/UFRGS, joaopaulolfb@gmail.com;

4) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)/UFRGS, rodrigo.paiva@ufrgs.br;

5) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)/UFRGS, andersonruhoff@gmail.com;

6) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)/UFRGS, rbarbedofontana@gmail.com;

7) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), adalberto.meller@ana.gov.br;

8) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), alexandre.amorim@ana.gov.br;

9) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Alexandre.Araujo@ana.gov.br;

10) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), marcus.fuckner@ana.gov.br;

11) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), saulo.souza@ana.gov.br;

12) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)/UFRGS, fernando.fan@ufrgs.br;

13) Institut de Recherche pour le Développement (IRD), fabrice.papa@ird.fr;

14) Stanford University, etienne.fluet@gmail.com;

15) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)/UFRGS, collischonn@iph.ufrgs.br;

INTRODUÇÃO

O Brasil abriga alguns dos mais importantes sistemas hídricos do planeta, incluindo áreas úmidas de relevância internacional (sítios Ramsar) e regiões como a Bacia Amazônica e o Pantanal, uma das mais extensas planícies inundáveis do planeta. Nestes sistemas naturais, os ecossistemas estão adaptados ao regime de inundação (Junk et al., 1989). Por outro lado, grande parte da população brasileira vive nas margens de rios, estando muitas vezes sob risco de inundações. Além de rios, lagos naturais e áreas úmidas, importantes lagos artificiais (ou massas d'água artificiais) estão também presentes no território nacional. Assim, o conhecimento da distribuição espacial de águas superficiais brasileiras (rio, áreas úmidas e lagos naturais e artificiais) é fundamental para promover um melhor gerenciamento dos recursos hídricos nacionais (como estimativas utilizadas pelas Contas Econômicas Ambientais da Água; ANA, 2018), bem como para subsidiar indicadores dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), por exemplo o objetivo 6.6.1 – “Alteração dos ecossistemas aquáticos ao longo do tempo”, e o gerenciamento de áreas de risco a inundação.

O mapeamento de águas superficiais tem sido realizado principalmente com sensoriamento remoto através de sensores ópticos (e.g., Landsat e MODIS; Pekel et al., 2016). Enquanto estes sensores são capazes de observar áreas de água aberta com resolução espacial e temporal satisfatórios, eles são incapazes de monitorar áreas com vegetação inundada, especialmente florestas inundadas que são frequentes nas margens de rios (e.g., veredas e matas ciliares) ou em grandes áreas úmidas como na Amazônia, e com grande variabilidade sazonal. Portanto, outras ferramentas são necessárias para complementar os sensores ópticos, dentre as quais se destaca imagens de radar (Hess et al., 2015) e micro-ondas passivo (Papa et al., 2010), além de modelagem matemática hidrológica-hidrodinâmica (Paiva et al., 2013) e processamento em modelos digitais de elevação (Rennó et al., 2008). A integração de diferentes abordagens é um caminho interessante para a obtenção de mapeamentos cada vez mais acurados.

Neste contexto, este trabalho apresenta um mapeamento das águas superficiais brasileiras (rio, áreas úmidas e lagos naturais e artificiais), em resolução espacial de 90 m, através da integração de dados de múltiplas fontes. Para tanto, foram utilizados alguns dos principais produtos disponíveis hoje para mapeamento de áreas inundáveis em grande escala, os quais refletem o estado de arte desta disciplina. Salienta-se que o produto desenvolvido é um mapa estático que representa a máxima extensão das águas superficiais brasileiras, isto é, não foram produzidos diferentes mapas temporais capazes de representar a dinâmica de extensão de inundação.

METODOLOGIA

O mapa das águas superficiais brasileiras foi elaborado a partir da integração de diversos produtos previamente disponíveis. Devido à complexidade das áreas úmidas da bacia amazônica, e à existência prévia de um produto específico para esta região (Hess et al., 2015), optou-se por utilizar esse produto em detrimento dos demais, que foram utilizados para o restante do território nacional. Os produtos foram convertidos para máscaras de água / áreas úmidas binárias (0 e 1) em formato *raster* para padronizar as operações de geoprocessamento. Como cada produto possui uma resolução espacial diferente, optou-se por converter todos os produtos para uma resolução de 90 m, e realizar a combinação dos dados a partir de uma operação de soma simples dos mapas. As etapas de processamento são resumidas no fluxograma apresentado na Figura 1. Na Tabela 1, são apresentados os produtos e bases de dados utilizados.

O produto de Pekel et al. (2016) foi reamostrado de sua resolução original de 30 m para 90 m, enquanto os produtos de Fluet-Chouinard et al. (2015) e Siqueira et al. (2018) foram reamostrados de 500 m para 90 m. Para tanto, utilizou-se a ferramenta “Resample” do Software QGIS 3.10.8.

Figura 1 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do mapa de Águas Superficiais Brasileiras. Os produtos utilizados para mapeamento dos rios, lagos artificiais, e áreas úmidas / lagos naturais são apresentados nas cores azul, verde, e laranja, respectivamente.

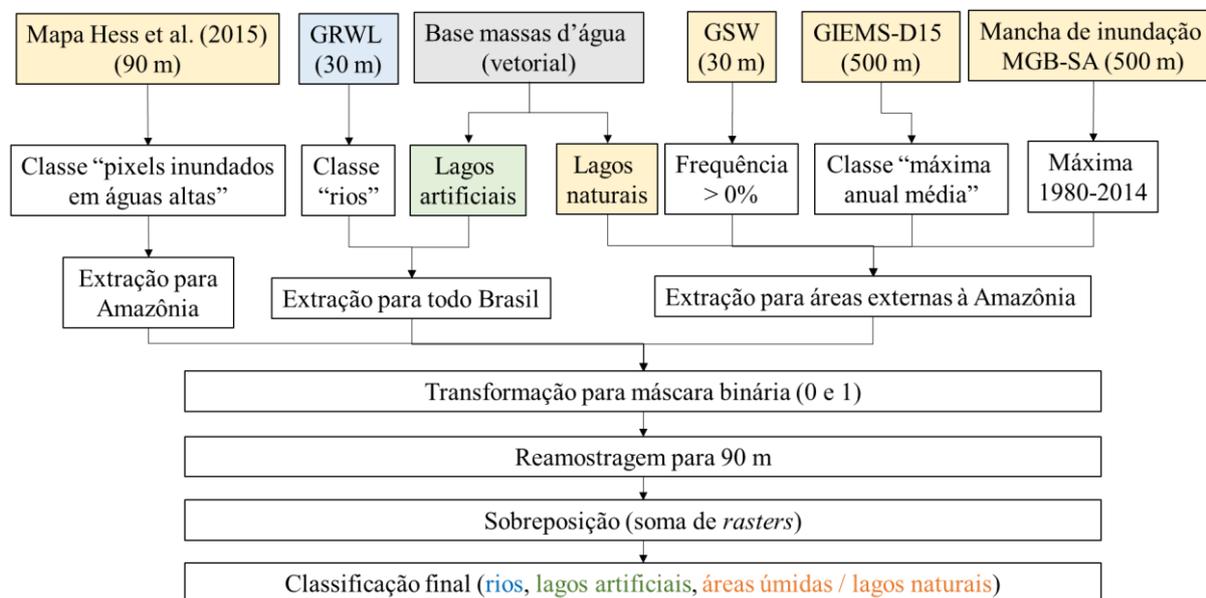


Tabela 1 – Descrição das bases de dados utilizadas para definir as classes de águas superficiais.

Produto / base de dados	Referência	Resolução espacial	Observação
Rios			
"Global River Widths from Landsat" (GRWL)	Allen & Pavelsky (2018)	30 m	Foi selecionada apenas a classe denominada "rivers"
Lagos artificiais			
Massas d'água do Brasil, classe de lagos artificiais	ANA (2020)	-	Dados vetoriais convertidos para Raster
Áreas úmidas e lagos naturais			
Classificação de imagens SAR (Radar de Abertura Sintética) do satélite JERS-1	Hess et al. (2015)	90 m	Somente para Amazônia; Apenas a classe "pixels inundados no período de águas altas" foi selecionada
GIEMS-D15, desenvolvido a partir da combinação de dados de micro-ondas passivo (Papa et al. 2015) e outros mapeamentos de áreas úmidas globais	Fluet-Chouinard et al. (2015)	500 m	Dentre as classificações disponíveis, optou-se por utilizar a máxima inundação anual média ao invés da máxima inundação de longo-termo para minimizar a inclusão de áreas úmidas espúrias
"Global Surface Water" (GSW), desenvolvido a partir de classificação de imagens Landsat no período de 1984 a 2020	Pekel et al. (2016)	30 m	Foi utilizado um limiar de frequência de áreas inundadas acima de 0%, isto é, incluindo pixels que em algum momento foram inundados
Massas d'água do Brasil, classe de lagos naturais	ANA (2020)	-	Dados vetoriais convertidos para Raster

Máxima inundação estimada pelo modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB para toda a América do Sul

Siqueira et al.
(2018)

500 m

O período de simulação utilizado para estimativa da máxima área inundável foi de 01/01/1980 a 31/12/2014

Como resultado, foi obtido um mapa (“*raster*”) das águas superficiais brasileiras com resolução espacial de 90 m contendo três classes, associadas aos seguintes valores do arquivo “*raster*”: 1) lagos artificiais; 2) rios; e 3) áreas úmidas e lagos naturais. Para um dado pixel, é dada prioridade para a classe (1), e depois (2). Deste modo, um pixel de águas superficiais dentro de um reservatório artificial é categorizado na classe 1, e um pixel em um rio fora de um reservatório é considerado como classe 2. A classe “rios” se refere à área superficial de rios e riachos que tenham sido mapeados pelo produto GRWL, com resolução espacial original de 30 m, mas cuja capacidade de detecção tende a mapear com acurácia satisfatória apenas os rios com largura superior a 90 m. Entende-se como lago artificial na base de massas d’água todo corpo de acumulação de água resultante da ação antrópica. Por fim, os lagos naturais e as áreas úmidas foram considerados como pertencentes a uma mesma classe devido à complexidade conceitual para diferenciar áreas úmidas de lagos naturais – em algumas classificações, lagos são classificados como áreas úmidas, como na definição da Convenção de Ramsar. Além disso, salienta-se que áreas úmidas podem envolver áreas artificiais, como as bordas de lagos de reservatórios.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta o produto desenvolvido de águas superficiais brasileiras com resolução espacial de 90 m. A integração de dados realizada foi capaz de representar satisfatoriamente os diversos tipos de águas superficiais que ocorrem no país, desde as grandes áreas úmidas da bacia amazônica (e.g., várzea do rio Amazonas, áreas interfluviais do rio Negro, savanas de Roraima) à Ilha do Bananal, na transição entre Amazônia e Cerrado, e ao Pantanal, nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Também foram representadas as planícies de inundação de grandes rios distribuídos por todo território brasileiro. A Figura 3 apresenta detalhes para quatro regiões no Brasil - Médio Rio Paraná, Amazônia Central, Alto Rio Uruguai e Médio Rio São Francisco, exemplificando a distinção entre as classes rios, lagos artificiais e áreas úmidas/lagos naturais.

As Figuras 4 e 5 apresentam a área total, por unidade federativa brasileira (estados e Distrito Federal), das classes áreas úmidas/lagos naturais (Figura 4), rios (Figura 5) e lagos artificiais (Figura 4). A Tabela 1 sintetiza os valores apresentados. A área total de áreas úmidas e lagos naturais no Brasil foi de cerca de 725.000 km² (~8 % de todo o território nacional), o que representa quase três vezes o tamanho do estado de São Paulo. O total de área de rios e lagos artificiais foi de, respectivamente, 48.954 km² e 46.490 km².

O estado com mais áreas úmidas e lagos é o Amazonas, com cerca de 198.000 km², seguido por Pará, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Em proporção de área, os estados do Mato Grosso do Sul e Rio de Janeiro apresentaram as maiores frações de seu território como áreas úmidas/lagos, com cerca de 17% e 16%, respectivamente. No caso do Rio de Janeiro, importantes áreas úmidas ocorrem na região litorânea, como também é o caso de outros estados como o Rio Grande do Sul e o Maranhão.

A área total de áreas úmidas e lagos é maior que a de lagos artificiais e rios para todas unidades federativas exceto o Distrito Federal (DF), o que tende a refletir uma incapacidade do produto desenvolvido em representar as pequenas áreas úmidas ripárias (veredas) que ocorrem no DF, devido à metodologia adotada. Além disso, a área de rios é maior que a área de lagos artificiais em poucas unidades federativas, como Amazonas e Pará. Em alguns estados do Nordeste, a presença massiva de

pequenos reservatórios como açudes no Semiárido, além de grandes reservatórios de hidrelétricas como Sobradinho, faz com que a área total de lagos artificiais seja relativamente próxima à de áreas úmidas/lagos naturais. Na Paraíba, por exemplo, estes valores são de 1.844 km² (áreas úmidas/lagos naturais) e 703 km² (lagos artificiais).

Figura 2 – Mapa das águas superficiais do Brasil elaborado neste estudo. Os sítios Ramsar (áreas úmidas de relevância internacional) do Brasil estão também indicados, bem como grandes regiões de áreas úmidas e alguns dos grandes lagos artificiais do país.

Águas superficiais do Brasil

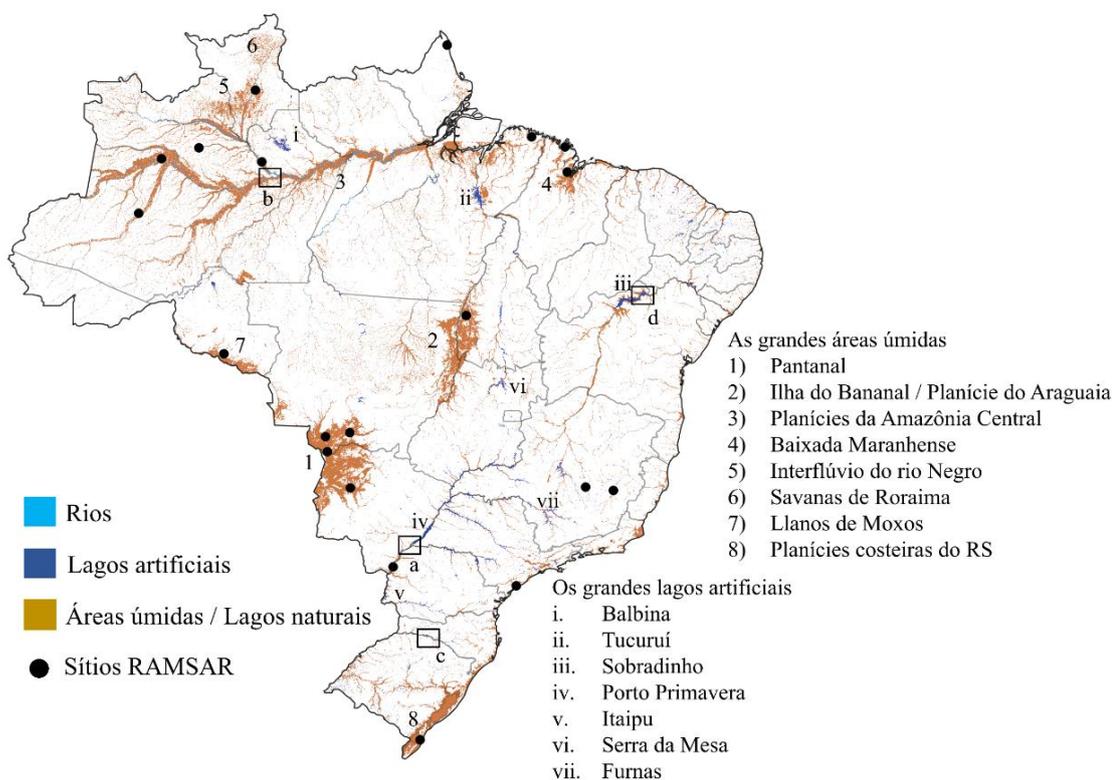


Figura 3 – Detalhes para quatro regiões no Brasil: (a) Médio Rio Paraná, (b) Amazônia Central, (c) Alto Rio Uruguai e (d) Médio Rio São Francisco. Em marrom são apresentadas as áreas úmidas e lagos, em azul escuro os reservatórios, e em azul claro os rios.

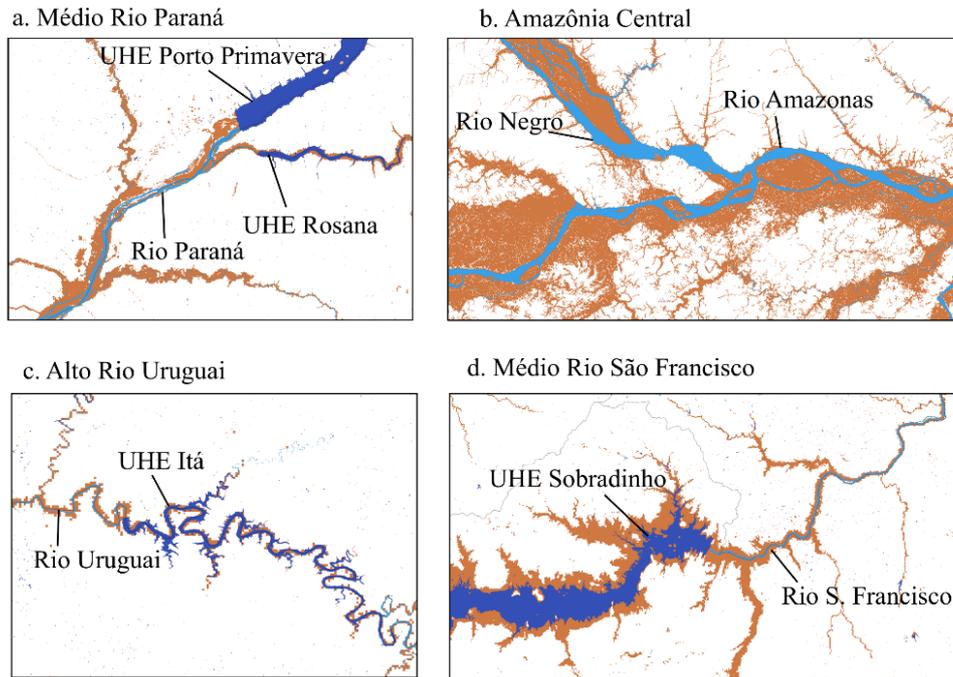


Figura 4 – Estimativa, por unidade federativa do Brasil, de área total da classe áreas úmidas e lagos naturais.

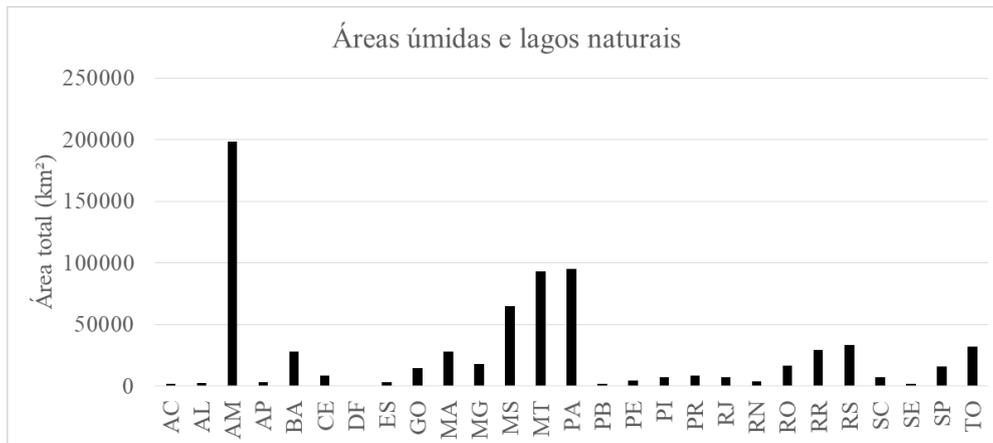
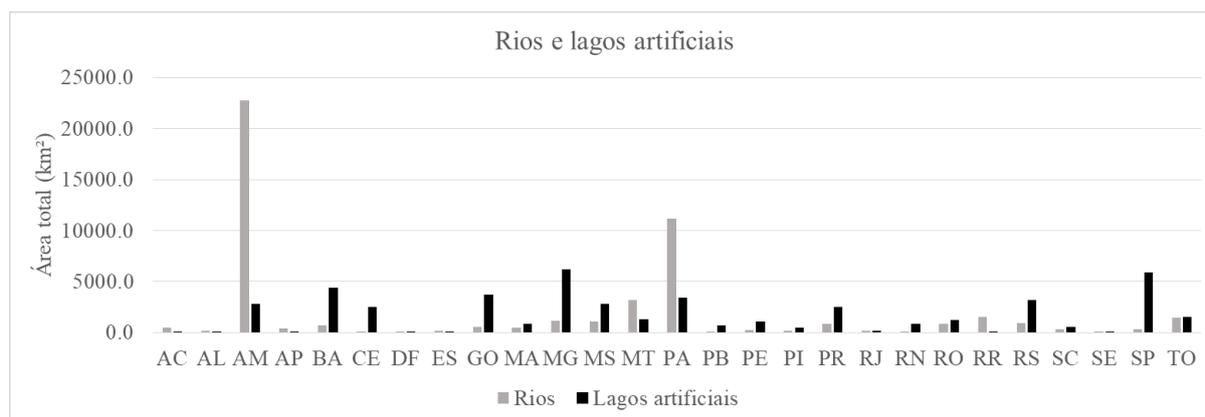


Figura 5 – Estimativa, por unidade federativa do Brasil, de área total das classes rios e lagos artificiais.



Por fim, salienta-se algumas limitações do produto aqui apresentado. Por um lado, a resolução adotada (90 m) é adequada para diversos estudos necessários para o gerenciamento de recursos hídricos brasileiros, incluindo quantificação de extensão de áreas úmidas, lagos e rios brasileiros no contexto das Contas Econômicas Ambientais da Água, e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, que seguem metodologias padronizadas internacionalmente. No entanto, esta resolução de 90 m, bem como as características dos produtos utilizados para a integração de dados, fazem com que pequenos rios (i.e., larguras menores que 90 m) tendam a ser subestimados, e assim a área total de rios apresentada para o Brasil (48.954 km²) é um valor inferior ao real. Pesquisas futuras deverão ser desenvolvidas para melhor estimar a área total de rios brasileiros. Em uma escala de detalhe, os produtos utilizados tenderam a superestimar as áreas úmidas existentes em algumas áreas urbanas, por não serem capazes de diferenciar satisfatoriamente áreas antropizadas de áreas naturais, o que será melhorado em versões futuras deste produto. Finalmente, salienta-se que todos produtos de sensoriamento remoto e modelagem hidrodinâmica estão sujeitos a diversas incertezas (e.g., algoritmo de classificação utilizado e resolução radiométrica do sensor, no caso de sensoriamento remoto, e incertezas na estrutura do modelo, e dados de entrada e calibração, no caso dos modelos hidrodinâmicos). Assim, em uma etapa posterior será importante melhor quantificar a incerteza de cada produto utilizado a partir de validação com fontes de dados independentes. Para o estudo aqui proposto, entende-se que foram utilizados alguns dos principais produtos disponíveis na atualidade para mapeamento de áreas inundáveis em grande escala, e que estes refletem o estado de arte desta disciplina.

Tabela 2 – Distribuição de áreas de áreas úmidas e lagos naturais, rios e lagos artificiais por unidades federativas do Brasil, e fração da área de cada unidade coberta por áreas úmidas.

Estado	Áreas úmidas e lagos naturais (km ²)	Rios (km ²)	Lagos artificiais (km ²)	Fração da Área da UF por Áreas úmidas e lagos naturais
AC	1464	425.5	6	1%
AL	2219	122.8	101	8%
AM	198068	22772.8	2815	13%
AP	3341	372.2	94	2%
BA	28169	706.4	4388	5%
CE	8389	33.9	2516	6%
DF	33	0.4	64	1%
ES	2739	150.7	73	6%
GO	14522	554.3	3721	4%

MA	28203	430.0	802	9%
MG	17545	1138.6	6163	3%
MS	64468	1032.0	2796	17%
MT	93138	3145.6	1299	10%
PA	94738	11153.2	3412	8%
PB	1844	13.2	703	3%
PE	4127	243.4	1035	4%
PI	7247	183.0	478	3%
PR	8421	859.0	2515	4%
RJ	7403	155.8	158	16%
RN	3695	21.4	857	7%
RO	16431	808.6	1251	7%
RR	29201	1535.8	65	13%
RS	33571	949.9	3146	11%
SC	7289	280.4	565	7%
SE	1644	66.4	58	8%
SP	15738	331.4	5901	6%
TO	31837	1467.6	1508	11%
Brasil	725483	48954	46490	8%

CONCLUSÃO

Neste estudo, foi apresentado o desenvolvimento de um mapa estático das águas superficiais brasileiras com 90 m de resolução espacial. O produto foi categorizado em três classes: 1) lagos artificiais, 2) rios, e 3) áreas úmidas e lagos naturais. A quantificação das áreas para diferentes unidades federativas do Brasil mostrou grandes extensões da classe áreas úmidas/lagos naturais na região amazônica (estados do Amazonas e Pará) e Pantanal, e também uma importante fração desta classe em estados como Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul, onde há muitas áreas litorâneas periodicamente inundáveis. O produto desenvolvido é um mapa estático, e desenvolvimentos futuros permitirão um mapeamento dinâmico das águas superficiais brasileiras, captando a sazonalidade desse processo, bem como a melhora de aspectos como a representação de pequenos rios e áreas úmidas (e.g., veredas e matas ciliares), que não foram capturados pela metodologia aqui empregada. Ainda assim, salienta-se que este produto tem um grande potencial para auxiliar a gestão e o planejamento de recursos hídricos e de ecossistemas aquáticos no país no contexto de identificação e quantificação de áreas inundáveis.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA) (2018). *Contas econômicas ambientais da água no Brasil 2013-2015*. Disponível em < https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-spr/contas_economicas.pdf>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA) (2020). *Base de referência de massas d'água do Brasil*. Disponível em < <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/7d054e5a-8cc9-403c-9f1a-085fd933610c>>.
- PAIVA, R. et al (2013). "Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin". *Water Resources Research* 49, pp. 1226–1243.

JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E (1989). “*The flood pulse concept in river-floodplain-systems*”. Can. J. Fish. Aquat. Sci. doi:10.1016/j.matchemphys.2012.10.032

PEKEL, J.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A. S (2016). “*High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes*”. Nature 540, pp. 418–422.

HESS, L. L. *et al.* (2015) “*Wetlands of the Lowland Amazon Basin : Extent , Vegetative Cover , and Dual-season Inundated Area as Mapped with JERS-1 Synthetic Aperture Radar*”. Wetlands 35(4), pp. 745–756.

PAPA, F. *et al.* (2010). “*Interannual variability of surface water extent at the global scale*”, 1993 – 2004. Journal of Geophysical Research 115, pp. 1–17.

FLUET-CHOUINARD, E., LEHNER, B., REBELO, L. M., PAPA, F. & HAMILTON, S. K. (2015) “*Development of a global inundation map at high spatial resolution from topographic downscaling of coarse-scale remote sensing data*”. Remote Sens. Environ. 158, pp. 348–361.

RENNÓ, C. D. *et al.* (2008). “*HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia*”. Remote Sensing of Environment 112(9), pp. 3469-3481.

SIQUEIRA, V. A. *et al.* (2018). “*Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America*”. Hydrol. Earth Syst. Sci. 22, pp.4815–4842.

ALLEN, G. H. & PAVELSKY, T. M. (2018) “*Global extent of rivers and streams*”. Science 80(361), pp. 585–588.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem à ANA pelo financiamento através do projeto “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional”, bem como ao CNPq (processo 141161/2017-5).