



DESAFIOS NA ESTIMATIVA DO CICLO HIDROLÓGICO TERRESTRE POR SENSORIAMENTO REMOTO

Rodrigo C. D. Paiva & Anderson Ruhoff

Resumo – Os recentes avanços no processo de observação do sistema terrestre por sensoriamento remoto das últimas décadas permitiu observar o sistema climático e hidrológico terrestre de maneira contínua e detalhada, principalmente em áreas com limitação de dados observados. Essa evolução tecnológica ocorrida após o final de década de 1990 permitiu estimar, a partir de múltiplas plataformas, os processos de precipitação, evapotranspiração, umidade do solo, variações no armazenamento de água, propriedades das águas superficiais e altimetria de corpos hídricos em diferentes escalas espaciais e temporais com relativa acurácia. Nesse contexto, o objetivo do artigo consistiu em elaborar uma revisão teórica sobre os princípios físicos envolvidos nas estimativas de cada uma das componentes, as potencialidades da utilização desses produtos para monitoramento do ciclo hidrológico terrestre e os principais desafios que ainda permeiam cientificamente essas estimativas. Os principais resultados indicam um grande potencial para uso de dados de sensoriamento remoto, entretanto incertezas relacionadas aos produtos e algoritmos ainda devem ser objetos de pesquisa da comunidade hidrológica internacional.

Palavras-Chave – Sensoriamento Remoto, Hidrologia,

CHALLENGES AND OPPORTUNITIES TO ESTIMATE THE TERRESTRIAL WATER CYCLE USING REMOTE SENSING DATA

Abstract – Recent advances in the Earth observing system based on remote sensing data in the last decades granted to estimate and monitor the terrestrial climate hydrological system and the hydrological cycle in a continuous and detailed way, mainly in areas with scarce observed data. This technological and synergistic progress in the last 20 years after the decade of 1990's allowed the estimation of precipitation, evapotranspiration, soil moisture, water storage, surface water properties and surface waters altimetry at different spatial and temporal scales with relative accuracy. In this context, the objective of the article was to technically review the physical principles and algorithms involved in the estimations of each of the hydrological components, the potential use of remote sensing products for monitoring the terrestrial water cycle and the main challenges to scientifically advance in this field of knowledge. Our results indicate a great potential to estimate and monitor the terrestrial water cycle using remote sensing data, however product-related uncertainties and algorithms deserve more scientific research from the international hydrological community.

Keywords – Remote sensing, Hydrology.

¹ Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

* Autor Correspondente: rodrigo.paiva@ufgrs.br

INTRODUÇÃO

A ciência hidrológica se desenvolveu desde a sua genese na condição de escassez de dados e observações hidrológicas. Estudos hidrológicos visando dimensionamentos de obras hidráulicas, gestão de recursos hídricos ou previsão hidrológica, entre outros, só foram possíveis através do desenvolvimento de métodos adequados para contornar tal condição. É uma das principais tarefas do hidrólogo sempre foi estimar variáveis hidrológicas, e.g. vazão, em locais não monitorados, mesmo que com as grandes incertezas e erros das estimativas.

Este cenário está se alterando rapidamente através do grande crescimento de novos tipos de sensores para observação hidrológica, com destaque para o sensoriamento remoto. Nas últimas décadas, diversos satélites foram lançados e técnicas desenvolvidas com foco no monitoramento de variáveis hidrológicas, como precipitação, umidade do solo, níveis d'água, armazenamento de água e evapotranspiração (Lettenmaier et al., 2015). De forma que, através do uso adequado dessas novas informações, surge uma nova condição de não existir locais realmente não monitorados.

Estas novas oportunidades vêm acompanhadas de grandes desafios, uma vez que ainda existe muito a fazer para avaliar o potencial dessas novas observações e desenvolver os métodos mais apropriados para seu uso.

Este trabalho apresenta uma revisão de novos avanços no sensoriamento remoto aplicado a hidrologia, detalhando o monitoramento de diferentes variáveis hidrológicas, seus princípios físicos e aplicações.

SENSORIAMENTO REMOTO DO CICLO HIDROLÓGICO E APLICAÇÕES

Precipitação

A precipitação global vem sendo monitorada via satélites a mais de 3 décadas, com maior impulso após o lançamento das missões TRMM em 1997 (*Tropical Rainfall Measurement Mission*) e GPM (*Global Precipitation Measurement Mission*) por agências espaciais como a NASA. Os satélites de órbita polar utilizam sensores microondas passivo ou radar, onde é possível inferir com relativa precisão as propriedades das nuvens e taxas de precipitação através de modelos de transferência radioativa, com tempos de revisita de ~2x ao dia e resolução espacial de 5 a 16 km. Satélites geoestacionários tipicamente monitoram a temperatura do topo das nuvens através de bandas do visível e infravermelho, fornecendo estimativas menos precisas de precipitação mas com resoluções espaço temporais de 15 min e <5 km. A fusão de dados de uma constelação com vários satélites e dados de pluviômetros permitem estimativas ótimas de campos de precipitação, com bases de dados com resolução de 10 a 25 km e 30 min a 3 h. As potenciais aplicações hidrológicas vão desde monitoramento de eventos extremos e desastres em tempo real, caracterização detalhada de regime pluviométrico, simulação hidrológica, etc. Maiores detalhes são encontrados na revisão de Kidd e Huffman (2011). A **Figura 1** apresenta um exemplo de monitoramento de evento extremo ocorrido no sul do Brasil em 2015 através do produto IMERGE da missão GPM.

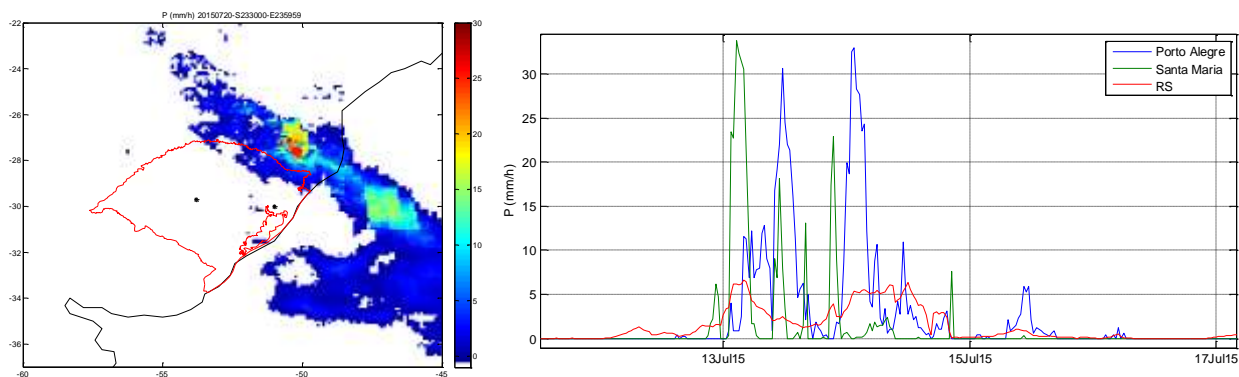


Figura 1 – Monitoramento espacial e temporal da precipitação por sensoriamento remoto a partir de dados da missão GPM (*Global Precipitation Mission*) no Estado do Rio Grande do Sul, em eventos extremos ocorridos durante o mês de Julho/2015.

Balço de energia e evapotranspiração

Considerando a evapotranspiração (ET) como a segunda maior componente do ciclo hidrológico terrestre, após a precipitação, esta desempenha um papel fundamental no sistema climático e hidrológico terrestre e nas respostas desses sistemas às mudanças climáticas globais. As estimativas por sensoriamento remoto desempenham um papel fundamental no processo de ET, principalmente em função das limitações de escala das observações por torre de fluxo turbulentos (Nagler, 2011; Tang *et al.*, 2009). As principais metodologias de base física para estimativas de ET por sensoriamento remoto podem ser divididas em modelos residuais de balanço de energia (que utilizam imagens termais e para derivar a diferença de temperatura entre a superfície e atmosfera) e em modelos baseados em equações, como Penman-Monteith e Priestly-Taylor (que utilizam principalmente índices de vegetação para representar os processos de evapotranspiração do solo e transpiração das plantas). De acordo com a escala da aplicação, dados meteorológicos auxiliares também são utilizados, oriundos de estações meteorológicas ou de reanálise.

A ciência do processo de ET apresentou consideráveis avanços nas últimas décadas, desde processos que ocorrem em microescala (*e.g.*: folha ou dossel) até a escala global, permitindo estimar a variabilidade espacial e temporal da ET a partir de dados de multi-sensores. Entretanto, muitos desafios ainda necessitam de soluções científicas que permitam a conversão de imagens instantâneas de sensoriamento remoto (usualmente obtidas a partir de satélites polares, durante uma ou duas vezes ao dia) para intervalos diários ou sazonais (a partir da fusão com imagens de satélites de alta resolução temporal). Considerando a necessidade de informações multi-espectrais e termais de superfície, outro desafio consiste na obtenção dessas informações, principalmente temperatura e dados de radiação, durante dias com cobertura de nuvens. As soluções atuais sugerem a utilização de dados complementares de micro-ondas para estimativas da temperatura de superfície e incorporação em modelos de balanço de energia (Holmes *et al.*, 2017).

Os principais desafios para estimativas de ET por sensoriamento remoto incluem melhorias: (i) aumento da acurácia das estimativas em diferentes condições de uso da terra e condições climáticas; (ii) aumento da resolução espacial, para detectar variações principalmente em superfícies heterogêneas; (iii) aumento da resolução temporal, a partir da combinação de imagens multi-sensor com técnicas de *downscaling*; (iv) ampliação da domínio espacial dos modelos, correspondendo a um aumento da área de abrangência; e (v) monitoramento de longo prazo, para detectar a resposta da vegetação e dos processos hidrológicos às mudanças climáticas (Fisher *et al.*, 2017). Nesse contexto, propõem-se a utilização de imagens termais da superfície para capturar em alta resolução espacial as dinâmicas associadas a superfícies heterogêneas que controlam o particionamento energético. Para grandes áreas, a utilização de produtos baseados em radiação,

principal variável de controle da ET, torna-se uma solução quando associado a dados de vegetação e dados meteorológicos de reanálise (Fisher et al., 2017).

A **Figura 2** apresenta um exemplo de estimativa de ET em áreas de agricultura irrigada na região centro-oeste do Brasil a partir de imagens LANDSAT com a utilização de modelos de balanço de energia (SEBAL/METRIC).

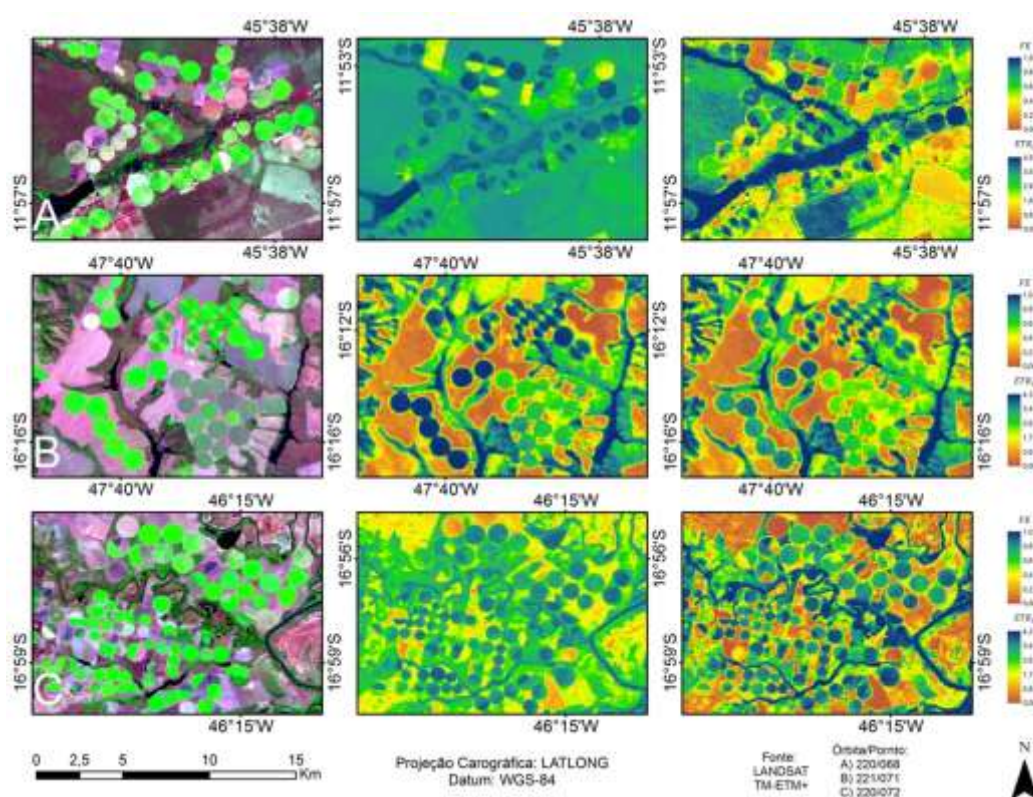


Figura 2 – Variabilidade espacial do processo de ET na região Centro-Oeste do Brasil: (A) Bahia, (B) Goiás/Brasília e (C) Minas Gerais. A coluna 1 apresenta imagens LANDSAT, a coluna 2 apresenta a fração evaporativa e a coluna 3 apresenta a estimativa da ET diária. Cortesia: Anderson Rodrigues Peter.

Umidade do Solo

Diferentes métodos podem ser utilizados para o sensoriamento da umidade do solo, sendo o mais direto o monitoramento da emissão da superfície monitorada por radiômetros na faixa do microondas na banda L (21 cm). A emissão está diretamente relacionada a constante dielétrica do solo, que é sensível a umidade do solo, sendo possível estimar a umidade do solo nas camadas mais superficiais. As missões SMAP e SMOS (Kerr et al., 2012) lançaram satélites recentemente, fornecendo produtos de umidade do solo com resoluções espaciais de dezenas de km a cada 3 dias.

Gravimetria e armazenamento total d'água

A missão GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) foi lançada em 2002 fornecendo estimativas de variações espaço temporais no campo gravitacional da terra. Estudos demonstraram que estas informações sobre os continentes podem ser usadas para derivar estimativas mensais de anomalias no armazenamento de água com acurácia de 1.5 cm e resolução espacial de centenas de quilômetros [Ramillien et al., 2008]. Estas estimativas incluem todos os compartimentos hidrológicos continentais, como águas superficiais de rios, reservatórios, varzeas, umidade do solo e águas subterrâneas. As aplicações potenciais dessas informações dados incluem estudo de processos hidrológicos e inventário de estoques de água em diferentes compartimentos

hidrológicos, detecção de depleção de aquíferos, calibração e validação de modelos hidrológicos, monitoramento de eventos extremos como secas, estudos de balanço hídrico, etc. A Figura 3 apresenta o balanço hídrico da bacia do São Francisco utilizando dados GRACE, precipitação do satélite TRMM e evapotranspiração estimada pelo MODIS, onde se observa um adequado fechamento. A Figura 3b apresenta uma série temporal de armazenamento d'água do GRACE no em São Paulo e Minas Gerais, ficando claro o período anômalo da seca de 2014 e com recuperação nos anos recentes.

Estação Pedras de Maria da Cruz - Bacia do rio São Francisco

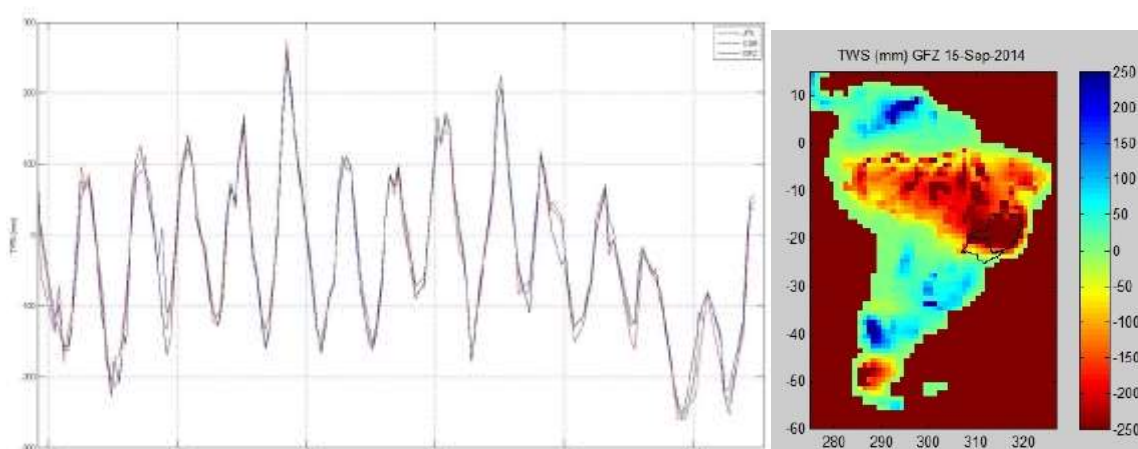
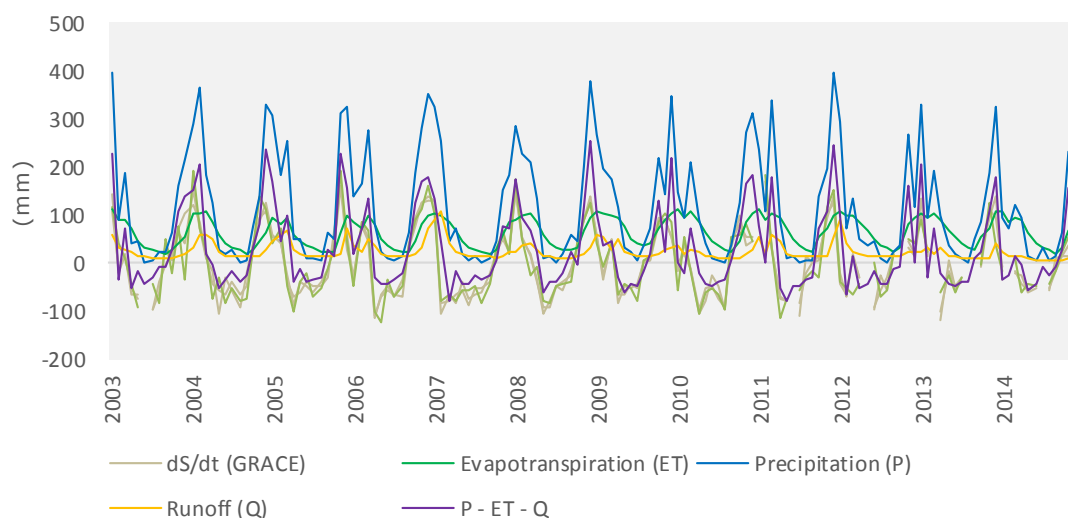


Figura 3 – Balanço hídrico na bacia do São Francisco com dados do GRACE, precipitação do TRMM, evapotranspiração do MODIS e vazão in situ. Análise da seca de 2014 no sudeste do Brasil com dados GRACE.

Águas superficiais

O monitoramento espacial de corpos d'água continentais como rios, lagos e varzeas e inundação via têm se ampliado fortemente nos últimos anos através do desenvolvimento de novos satélites com sensores altímetros e imageadores.

Os altímetros a radar ou laser (e.g. ENVISAT, JASON, ICESAT, ICESAT2, Altika, SENTINEL) emitem um pulso de energia a nadir e através do tempo até a recepção do eco é possível calcular a distância e o nível d'água de corpos d'água continentais e oceanos. A distância entre traços do satélite é da ordem de 20 km a 200 km e a repetição temporal de 10 a 90 dias, sendo possível captar

níveis d'água de corpos d'água de dezenas de metros de largura com acurácia de dezenas de centímetros. Bases de dados como o Hydroweb-LEGOS apresentam séries temporais de níveis d'água de milhares de estações virtuais. As aplicações dessas informações altimétricas incluem monitoramento em locais de difícil acesso, caracterização de sistemas relevantes, estimativa de vazões em locais não monitorados, validação, calibração ou assimilação de dados em modelos hidrológicos (Figura 4). A figura 4 apresenta os traços dos satélites altimétricos JASON, ENVISAT e ICESAT2, com tempos de revisita de 10, 35 a 91 dias, respectivamente, e exemplo de assimilação de dados do ENVISAT no modelo hidrológico MGB-IPH.

Sensores imageadores monitoram a cobertura terrestre desde a década de 70 com o lançamento do Landsat. Tais satélites têm o potencial de identificar a extensão de corpos d'água e recentemente novas missões têm produzido observações sistemáticas com resolução espacial de de 10 a 250 m e temporal de diária a trimestral. Sensores na faixa do visível e infravermelho (e.g. Landsat, MODIS, Sentinel) possuem maior frequência temporal e espacial e podem ser utilizados facilmente para identificar corpos d'água abertos. Os satélites com radares de abertura sintética (e.g. JERS-1, Alos Palsar, futuro NASA/NISAR) operando no microondas na banda L possuem a vantagem de penetrar as nuvens e a vegetação, observando a extensão d'água em quaisquer condições de tempo e cobertura vegetal (e.g. Figura 4). Através da combinação de altimetria e imagens, é possível caracterizar corpos d'água, estimar larguras de rios, volumes de lagos e reservatórios e vazões, calibrar e verificar modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, etc.

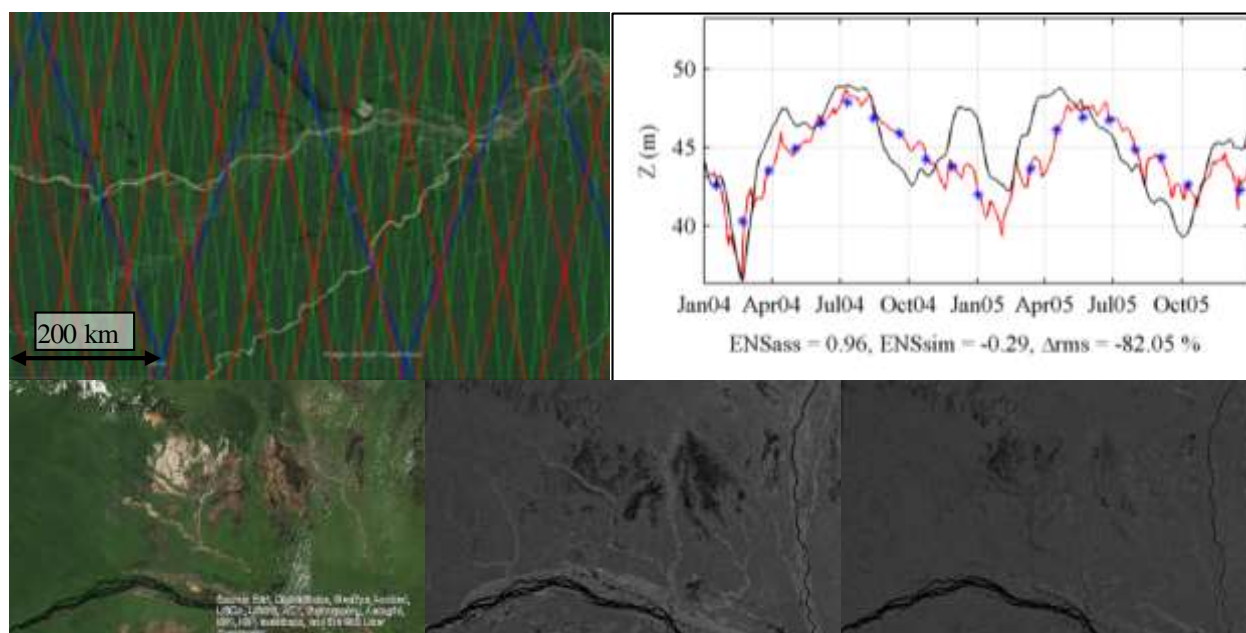


Figura 4 – Traços sobre a Amazônica central dos satélites altimétricos JASON (Azul), ENVISAT (Vermelho) e ICESAT (Verde). Assimilação de dados de altimetria do ENVISAT no modelo hidroóico MGB, com níveis d'água simulados (preto), observados (azul) e simulados após assimilação (vermelho). Imagem de satélite em composição colorida do Google Earth na região dos rios Negro e Branco e imagens SAR do satélite AlosPalsar nos períodos de águas altas e baixas mostrando corpos d'água (preto) e zonas alagadas sobre a vegetação (cinza claro).

Por fim, a missão Surface Water and Ocean Topography – SWOT (Biancamaria et al., 2016) esta desenvolvendo um satellite a ser lançado em 2022, com Radar de Abertura Sintética (SAR) em modo de interferometria para fornecer pela primeira vez observações de águas superficiais em alta resoluções espacial e temporal (rios maiores que 50 m, 2-3x a cada 22 dias), incluindo níveis d'água, mascara de água, declividade e vazões em rios.

Qualidade da água

As propriedades óticas de águas superficiais como reflectância são dependentes de duas propriedades. A reflectância em diferentes faixas do espectro eletromagnético podem ser utilizadas como proxy da concentração de sedimentos (vermelho e infravermelho), de fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida. Em águas misturadas, modelos de mistura espectral podem ser utilizados para separar esses diferentes componentes. Observações na faixa do infravermelho podem ser utilizadas para monitorar a temperatura superficial da água. Satélites com o Landsat, MODIS e agora o Sentinel 2 fornecem imagens nessas bandas com resoluções espaço-temporais de 30 m e 16 dias, 250 m e diário e 10 m a cada 5 dias, respectivamente. Tais observações podem ser utilizadas para monitoramento da qualidade da água de rios e reservatórios, identificação de fontes poluidoras, estudo da dinâmica de hidrossistemas específicos, etc. A figura 5 apresenta estudo acerca da dinâmica espaço-temporal de sedimentos na Amazônia através do sensor MODIS. Observa-se a maior concentração de sedimentos dos rios Solimões e Madeira em relação ao Negro, o encontro das águas, a concentração em lagos da várzea de inundação e o regime sazonal da concentração de sedimentos nesses rios.

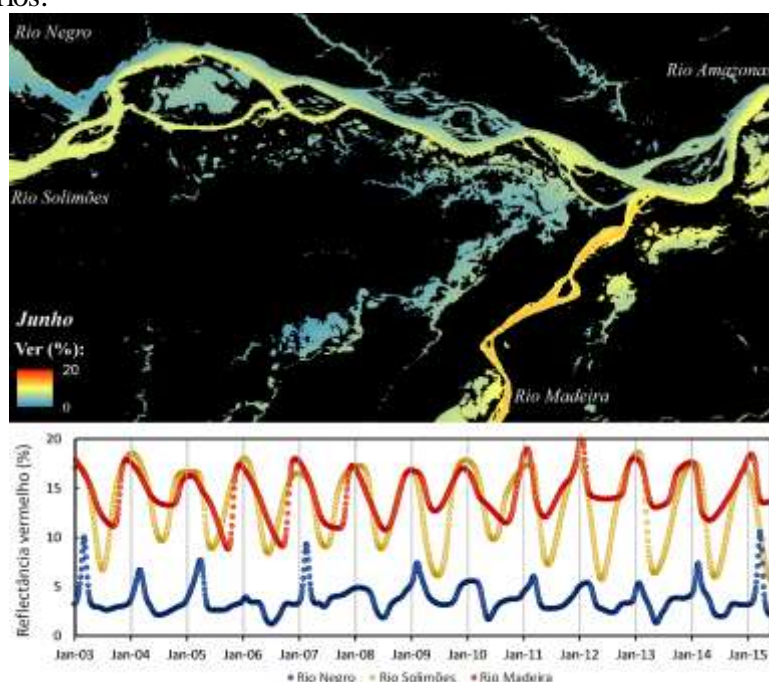


Figura 5 – Reflectância no vermelho do sensor MODIS como proxy da concentração de sedimentos na Amazônia central, mostrando o encontro entre os rios Solimões, Negro e Madeira e dinâmica espaço-temporal. Cortesia: Alice Fassoni.

CONCLUSÃO

Os avanços tecnológicos e científicos das últimas décadas na área de sensoriamento remoto permitiram avanços consideráveis na estimativa das principais componentes do ciclo hidrológico terrestre em diferentes escalas espaciais e temporais e com diferentes acurácias. Segundo Lettenmeyer et al. (2015), a utilização de dados de sensoriamento remoto em ciências hidrológicas é um dos campos proeminentes nas próximas décadas, que permitirá a utilização de dados remotos em áreas e intervalos de tempo cada vez menores. A disponibilidade de grandes bases de dados em escala global e de longo período também permite analisar as variações espaciais e temporais (tendências), bem como entender as respostas do sistema climático e hidrológico terrestre frente às mudanças climáticas globais. Segundo Tang et al. (2009), entre os

principais desafios destacam-se as incertezas relacionadas a: (i) algoritmos para estimativas das componentes do ciclo hidrológico (melhorando a base física de representação dos processos), (ii) desenvolvimento tecnológico de sensores (e.g.: para estimativas de umidades do solo, micro-ondas necessitam atravessar o dossel e penetrar no solo para gerar observações consistentes de umidade na coluna do solo), (iii) parametrizações da superfície para utilização em algoritmos (considerando que essas observações para parametrizações são derivadas de pequenos conjuntos de dados), e (iv) elaboração de metodologias para integrar séries temporais de dados de sensoriamento remoto oriundo de diferentes sistemas sensores. Além dos desafios, a necessidade de validar os dados estimados e assimilar essas informações em modelos hidrológicos é fundamental para o avanço científico dos processos hidrológicos.

REFERÊNCIAS

- Biancamaria, S., Lettenmaier, D.P. & Pavelsky, T.M. 2016 The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology Surv. Geophys (2016) 37: 307. doi:10.1007/s10712-015-9346-y
- FISCHER J.B. *et al.* (2017). The future of evapotranspiration: global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultura management and water resources. *Water Resources Research*, v.53, pp.2618-2626.
- HOLMES, T. R.; HAIN, C.; CROW, W. T.; ANDERSON, M. C.; AND KUSTAS, W. P. (2017) Microwave implementation of two-source energy balance approach for estimating evapotranspiration. *Hydrology and Earth System Sciences*. In discussion.
- Kerr, Y., Waldteufel, P., Wigneron, J.-P., Martinuzzi, J.-M., Font, J., and Berger, M. 2012. Soil moisture retrieval from space: The soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission. *IEEE T. Geosci. Remote Sens.*, 39, 1729-1736.
- KIDD, C.; HUFFMANG, (2011). Review of Global precipitation measurement. *Meteorological Applications*, v. 18, pp.: 334-353.
- LETTENMEYER, D. *et al.* (2015) Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. *Water Resources Research*, v. 51(9), pp. 7309-7342.
- NAGLER, P. (2011). The role of remote sensing observations and models in hydrology: the science of evapotranspiration. *Hydrological Processes*, v. 25, 3977-3978.
- Ramillien, G., J. S. Famiglietti, and J. Wahr (2008), Detection of continental hydrology and glaciology signals from GRACE: A review, *Surv. Geophys.*, 29(4/5), 361 - 374, doi:10.1007/s10712-008-9048-9.
- Tang QH, Gao HL, Lu H, Lettenmaier DP (2009) Remote sensing: hydrology. *Prog Phys Geog* 33:490-509. doi:10.1177/0309133309346650