

**HIDROLOGÍA** de la **AMAZONÍA**  
VISTA desde el **ESPACIO**  
AVANCES CIENTÍFICOS Y DESAFÍOS FUTUROS

**ORGANIZADORES**

**ALICE** Fassoni-Andrade – **AYAN** Fleischmann – **FABRICE** Papa  
**RODRIGO** Paiva – **SLY** Wongchuig – **JOHN** Melack



# HIDROLOGÍA de la AMAZONÍA VISTA desde el ESPACIO

AVANCES CIENTÍFICOS Y DESAFÍOS FUTUROS



Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Hidrología de la Amazonia vista desde el espacio  
[livro eletrônico] : avances científicos y  
desafíos futuros / [coordinación Sly Wongchuig ,  
Ayan Fleischmann, Alice Fassoni-Andrade ;  
tradução Gabriela Petit]. -- 1. ed. --  
Porto Alegre, RS : ABRHidro, 2025.  
PDF

Título original: Hidrologia da Amazônia vista do  
espaço: avanços científicos e desafios futuros.  
Bibliografia.  
ISBN 978-85-88686-51-9

1. Amazônia 2. Amazônia - Aspectos ambientais  
3. Hidrologia 4. Sensoriamento remoto I. Wongchuig,  
Sly. II. Fleischmann, Ayan. III. Fassoni-Andrade.,  
Alice. IV.

25-259126

CDD-574.52642

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Hidrologia florestal : Planejamento : Ecologia  
574.52642

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

---

**Fotografia de tapa:** Parque Nacional de Anavilhanas, Amazonas. La imagen no puede ser reproducida de ninguna forma. **Autor:** ©SebastiãoSalgado.

**Fotos de las páginas 8, 9, 16 y 17:** Thiago Laranjeira.

**Coordinación:** Sly Wongchuig, Ayan Fleischmann, Alice Fassoni-Andrade.

**Traducción:** Gabriela Petit / BR Services.

Traducción realizada con el apoyo de la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento - Brasil (ANA).

**Revisión:** Sly Wongchuig, Gianella Botetano, Jhan-Carlo Espinoza, Raúl Espinoza Villar.

**Proyecto gráfico, tapa y diagramación:** Rebeca Medeiros de Andrade Eugênio - BRAVA DESIGN.

---



# Autores

**Alice César  
Fassoni-Andrade**

Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.

**Ayan Santos  
Fleischmann**

Instituto de Desenvolvimento  
Sustentável Mamirauá, Tefé, AM, Brasil.

**Fabrice Papa**

Laboratoire d'Etudes en Géophysique et  
Océanographie Spatiales (LEGOS),  
Université Toulouse, IRD, CNRS, CNES,  
UPS, Toulouse, France.

**Rodrigo Paiva**

Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.

**Sly Wongchuig**

Laboratoire d'Etudes en Géophysique et  
Océanographie Spatiales (LEGOS),  
Université Toulouse, IRD, CNRS,  
CNES, UPS, Toulouse, France.

**John Melack**

Earth Research Institute, University of  
California, Santa Barbara.

- Adriana Aparecida Moreira** Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.
- Adrien Paris** Hydro Matters, 1 chemin de la Pousaraque, 31460 Le Faget, France.
- Anderson Ruhoff** Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.
- Claudio Barbosa** Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos (LabISA), Coordenação de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil.
- Daniel Andrade Maciel** Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos (LabISA), Coordenação de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil.
- Evlyn Novo** Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos (LabISA), Coordenação de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil.
- Fabien Durand** Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), Université Toulouse, IRD, CNRS, CNES, UPS, Toulouse, France.
- Frédéric Frappart** INRAE, UMR1391 ISPA, Université de Bordeaux, F-33140 Villenave d'Ornon, France.

<b>Filipe Aires</b>	Laboratoire d'Études du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères, Observatoire de Paris, UMR 8112, Paris, France.
<b>Gabriel Medeiros Abrahão</b>	Potsdam Institute for Climate Impact Research, Member of the Leibniz Association, Potsdam, Germany.
<b>Jefferson Ferreira-Ferreira</b>	World Resources Institute Brasil, São Paulo, Brasil
<b>Jhan Carlo Espinoza</b>	Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, G-INP, IGE (UMR 5001), Grenoble, France.
<b>Leonardo Laipelt</b>	Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.
<b>Marcos Heil Costa</b>	Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, Brasil.
<b>Raul Espinoza-Villar</b>	Departamento de Ordenamiento Territorial y Construcción, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Av. La Molina s/n Lima 12, Perú.
<b>Stéphane Calmant</b>	Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), Université Toulouse, IRD, CNRS, CNES, UPS, Toulouse, France.
<b>Victor Pellet</b>	Laboratoire d'Études du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères, Observatoire de Paris, UMR 8112, Paris, France.



# Presentación

La idea de recopilar los estudios relacionados con el ciclo hidrológico de la cuenca amazónica y con la teledetección surgió en 2020 por un grupo de futuros doctores y profesores del *Instituto de Pesquisas Hidráulicas* (Instituto de Investigaciones Hidráulicas) (IPH - UFRGS). Cada uno era especialista en un área y no parecía complicado escribir un artículo de revisión. Cuando la idea salió del papel, otros investigadores y colegas, principalmente de IRD e INPE, ya se habían involucrado con entusiasmo. Así, durante la pandemia de COVID-19, fue tomando forma un artículo científico. Cada grupo escribió un capítulo y al menos un autor de otro grupo revisó el manuscrito. Fue un gran desafío escribir el artículo manteniendo una estructura uniforme en los capítulos, pero el resultado es enriquecedor: una colectánea que muestra la importancia que ha tenido el desarrollo de la teledetección en la hidrología de la Amazonía y lo que se ha descubierto sobre esta al verla desde el espacio. Optamos por no hacer una revisión sistemática, por lo que el lector puede sentir la falta de algunos trabajos.

Tras la publicación del artículo *Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Future Challenges* en la revista *Review of Geophysics* (Fassoni-Andrade et al., 2021b) y de su publicación en formato libro en portugués en 2023, nos entusiasma traducirlo también al español y ponerlo a disposición de la comunidad hispanohablante. Nuevamente, optamos por la traducción sin añadir nuevas referencias. El lector también va a observar que nos referimos a la misión SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) como una misión futura, a pesar de que el satélite fue lanzado el 16 de diciembre de 2022, pues los datos de esta misión solo estuvieron disponibles para la comunidad científica a fines de 2023.

Le agradecemos a la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento - Brasil (ANA), Hydro Matters y Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) por hacer que este libro fuera posible al patrocinar su traducción y diagramación. La exposición "Amazonía" del fotógrafo Sebastião Salgado en 2022, en Brasil, también fue ideal para encontrar la Fotografía de tapa del libro. Generosamente, el fotógrafo cedió el uso de la foto sin costo. También agradecemos a otros investigadores e instituciones por haber ofrecido fotos y datos para este libro: Thiago Laranjeiras, Mark Trigg, Conrado Rudorff e IDSM.

El artículo se escribió cuando varios ríos de la cuenca amazónica pasaron por una de las mayores crecidas ya registradas (2021) y además cuando la deforestación y los incendios aumentaron. En cambio, el libro está siendo publicado mientras nuevamente una sequía muy fuerte afecta grandes partes de la cuenca. Estas preocupaciones resaltan nuestra principal conclusión después de la recopilación de los estudios: muchas técnicas de teledetección ya han sido desarrolladas. Ahora es urgente avanzar en la aplicación de esas técnicas para entender los cambios ambientales y auxiliar a los tomadores de decisiones.

Esperamos que este libro entusiasme y motive a los estudiantes a investigar la cuenca amazónica y el ciclo del agua por medio de la teledetección. También contamos con que este libro contribuya para la conservación de la sociobiodiversidad y desarrollo sostenible de la Amazonía.

Que tenga una buena lectura,

Alice Fassoni-Andrade, Ayan Fleischmann,  
Fabrice Papa, Rodrigo Paiva, Sly Wongchuig, John Melack.





# Prefacio

He quedado muy agradecida con la invitación para escribir el prefacio de este libro organizado y escrito por ilustres jóvenes investigadores, que si no lo son literalmente, lo son metafóricamente porque todos los que aceptaron este desafío tienen corazón y energía de estudiantes.

El libro *Hidrología de la Amazonía vista desde el espacio: avances científicos y desafíos futuros*, comenzó a ser elaborado en 2020 por parte de los organizadores, cuando recién comenzaba la pandemia, desafiándonos a preparar una revisión de la literatura en nuestros diferentes campos de investigación para evaluar la contribución de la teledetección por satélite en el avance del conocimiento sobre el ciclo del agua en la Amazonía durante las últimas décadas. Tras un gran esfuerzo conjunto, la revisión fue publicada en *Reviews of Geophysics*, en 2021: *Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges*.

Pero ¿qué hay de los incontables alumnos de los países amazónicos que no dominan inglés? ¿Serían una vez más impedidos de acceder al banquete del conocimiento? Por último, la lengua es la patria, la patria y la fraternidad que todos queremos, porque al inicio era el verbo y el verbo crea realidades cuando se asimila anímicamente.

En 2022, los organizadores vinieron nuevamente determinados a traducir el artículo. El texto en portugués es más orgánico y de fácil asimilación para los que no están familiarizados con la ciencia y los métodos de teledetección, ni con los diferentes enfoques en los que pueden ser usados para el estudio y monitoreo del ciclo del agua en la Amazonía. El libro tiene ahora 228 páginas, 13 capítulos, 8 tablas y 14 figuras en los que se presentan de forma fundamentada y crítica las principales contribuciones de la tecnología de teledetección para la cuantificación de los componentes fundamentales del ciclo del agua, la descripción de las condiciones de contorno de diferentes modelos y de la forma en la que el modelado hidrológico y el

desarrollo de productos de teledetección se han retroalimentado y contribuido para el avance mutuo.

El libro termina con un capítulo de síntesis de avances científicos y futuros desafíos, organizado en tópicos que ponen énfasis en la relevancia de la Amazonía como un laboratorio para la teledetección aplicado a la comprensión del ciclo del agua. Lo que fue aprendido y desarrollado en la Amazonía puede contribuir para que el conocimiento científico y metodológico alcanzado se aplique en otras grandes cuencas tropicales del planeta, insertando a estos jóvenes en las redes globales de investigación.

Quisiera, en nombre de los organizadores, felicitar a todos los que han dedicado tiempo y esfuerzo para que este libro venga al público. Estoy segura de que despertará el interés de alumnos de graduación que se motivarán a seguir una carrera científica. Estos nuevos científicos podrán beneficiarse de la gran ventana de oportunidades que el siglo XXI ha traído para la investigación de aguas continentales, con el desarrollo de sensores cada vez más específicos para cubrir las lagunas tecnológicas que limitaban su aplicación, excepto en grandes cuencas.

Mientras leía el libro, recordé las imágenes del NOAA que, con la cobertura de nubes de la superficie terrestre, se transmitían por vía telefónica e impresa en un equipamiento que después se volvió conocido como FAX en la segunda mitad del siglo XX. Era un universo totalmente analógico aún. Trabajaría con un sistema de procesamiento de imágenes digitales recién en 1976. Era el único de América Latina en procesar imágenes digitales del Landsat-1 y los alumnos del postgrado tenían que programar horarios en la madrugada para poder usar el sistema Image-100. Me sentí feliz por haber conseguido acompañar tamaño avance tecnológico. Y me sentí triste al pensar que el subproducto de ese avance no significó seguridad alimentaria e hídrica, no evitó los cambios climáticos ni los desastres naturales que asotan el planeta y nos alertan sobre el riesgo de extinción del mundo como lo conocemos hoy. Pero no perdí las esperanzas, porque me acordé de quién fui al iniciar el máster y sé que, aunque ya no tenga el vigor para participar en esta nueva era de descubrimientos, dejo la escena sabiendo que hay jóvenes que van a ampliar las aplicaciones de la teledetección por satélite para comprender los cambios del planeta, proponer medidas de mitigación y monitorear su regeneración hasta que vuelva a ser la Tierra que derrama leche y miel.

**Dra. Evlyn Novo**

*Investigadora del Instituto Nacional de  
Investigaciones Espaciales (INPE)*

# Prefacio



En este libro de revisión, los autores destacan el uso en el que se pueden aprovechar los datos de teledetección para facilitar el entendimiento del ciclo del agua en la Amazonía y sus implicaciones y así también poder entender el comportamiento de las cuencas de todo el mundo. Los datos de teledetección ayudaron a comprender múltiples aspectos de la hidrología de la región. Aunque el uso de datos fluviales ya hubiera permitido la identificación de sequías e inundaciones desde el inicio de los años 1900, el uso satelital ayudó a identificar las tendencias recientes de las precipitaciones y otros componentes del ciclo del agua. Por ejemplo, la misión GRACE ha sido utilizada en la evaluación del almacenamiento total de agua y aguas subterráneas, muy útil en los estudios de sequías e inundaciones en la Amazonía. Los autores se refieren a la cuenca amazónica como un laboratorio de teledetección, caracterizado por fuertes señales hidrológicas en la precipitación, evapotranspiración, cambios en el almacenamiento del agua y la escorrentía. La cuenca es el ambiente ideal para el desarrollo de técnicas remotas y sus aplicaciones para ayudar en nuestro entendimiento de los procesos hidrológicos.

El mapeo de inundaciones a gran escala y la caracterización de la dinámica de los sedimentos también han sido beneficiados en gran medida con las técnicas de teledetección. Un aspecto importante de este libro es el crecimiento de la colaboración entre comunidades científicas con diferentes intereses y perspectivas sobre el ciclo hidrológico de la Amazonía usando datos de superficie y derivados de satélite sobre el ciclo hidrológico de la Amazonía. Conjuntos de datos como CMAP, CPC, CHIRPS, GPCP, CMORPH, ERA-5, MERRA-2, PERSIANN, SM2RAIN, GSMaP, MOD16, SEBS, GLEAM, Hydroweb, G-REALM, DAHITI, GRRATS, e Hidrosat, entre otros, que se derivan de misiones de satélite que proporcionan estimaciones de precipitación, evapotranspiración y de la calidad del agua superficial y del agua. Muchas han sido utilizadas en estudios sobre la variabilidad climática y el ciclo del agua en la región amazónica.

Particularmente, ha habido una gran contribución para la comprensión de la dinámica de las precipitaciones. Debido a su gran alcance, los regímenes de precipitación en la cuenca amazónica difieren de una región a otra en términos de comportamiento estacional, dependiendo de los patrones de circulación que hacen que los regímenes de precipitación sean altamente variables en el espacio. Una serie de estudios han sido realizados para analizar la variabilidad y las tendencias pluviométricas en toda la región. Sin embargo, esos resultados se basan en pluviómetros que muchas veces muestran falta de homogeneidad y cobertura espacio-temporal incompleta. Muchas veces las estaciones pluviométricas están en ciudades situadas cerca de los principales afluentes. Varias bases de datos de precipitación en grilla y de reanálisis están disponibles en las últimas décadas y se basan en los datos que observan la precipitación por medio de productos de teledetección. Estos productos proporcionan estimaciones a partir de diferentes técnicas y sensores y han permitido identificar las características pluviométricas en grandes regiones de la Amazonía, donde los pluviómetros son muy dispersos. Los productos de teledetección para identificar la variabilidad de los ciclos hidrológicos y de CO<sub>2</sub>, junto con la implementación de torres de flujo, han permitido mejores estudios sobre el carbono, la variabilidad hidrológica y el balance hídrico.

Por último, los autores también discuten lagunas de conocimiento y oportunidades de investigación sobre las aguas de la Amazonía y plantean cómo continuar con los avances científicos para una gestión más sostenible de los recursos hídricos. Nuevas misiones espaciales y productos derivados de las mismas serán útiles para futuros estudios sobre el ciclo del agua en la Amazonía, particularmente con miedo de que la cuenca amazónica alcance un *tipping point* que pueda llevar al colapso de la selva y a un peligroso cambio climático regional y global.

**Dr. Jose A. Marengo**

*Coordinador General de Investigación y Desarrollo,  
Centro Nacional de Monitoreo y Alerta de  
Desastres Naturales (Cemaden)*

# Prefacio

# 03



La teledetección del ciclo del agua en la Amazonía ha transformado nuestro entendimiento de la cuenca a lo largo de los últimos treinta años. Como resultado de los esfuerzos de varios investigadores, grupos e instituciones, tenemos ahora una visión profunda y rica de cómo funciona esta cuenca que no se puede comparar con ninguno de los otros grandes sistemas fluviales del mundo. Ahora podemos mapear precipitaciones, evapotranspiración, niveles del agua de ríos y llanuras de inundación, almacenamiento y humedad del suelo en detalles y de maneras que no son posibles solamente a partir de observaciones in situ. Más que eso, la cuenca hidrográfica ha funcionado como un laboratorio natural para el desarrollo de nuevas técnicas de teledetección y modelado que pasaron a tener impacto global. Por ejemplo, la cuenca amazónica ha servido como campo de prueba para estudios pioneros que han demostrado de qué modo la elevación de la superficie del agua puede ser medida usando altímetros de radar, y posteriormente estas técnicas han sido usadas globalmente para entender una cantidad innumerable de sistemas de ríos, lagos y pantanos. Del mismo modo, la Amazonía central fue el lugar en el que se desarrollaron los primeros modelos hidrodinámicos en gran escala, y los conocimientos adquiridos son actualmente aplicados para mapear el riesgo de inundación globalmente, lo que impacta la vida de un número significativo de personas. Sería razonable pensar que documentar el gran volumen de estudios de investigación hidrológica realizados en la cuenca sería una tarea imposible, pero es exactamente eso que este artículo consigue hacer. Los autores realizaron una revisión equilibrada, detallada y global de la investigación hidrológica espacial en la cuenca amazónica, y al hacerlo prestaron un gran servicio a su comunidad.

**Dr. Paul Bates**  
*University of Bristol,*  
*Reino Unido*



# Índice

01	Introducción	18
02	Precipitación	24
03	Evapotranspiración	40
04	Nivel del agua	51
05	Extensión de Aguas Superficiales	63
06	Topografía de lagos y canales de la llanura de inundación	75
07	Color del agua: sedimentos, clorofila y materia orgánica disuelta coloreada	80
08	Almacenamiento total de agua y almacenamiento de aguas subterráneas	89

09	Balance hídrico	96
10	Modelado del ciclo hidrológico de la Amazonía y sus áreas húmedas	103
11	Ecosistemas Acuáticos	116
12	Cambios ambientales	123
13	Síntesis de los avances científicos, desafíos futuros y prioridades	134
14	Recomendaciones	163
15	Referencias	168



# 01 **Introducción**

Alice Fassoni-Andrade

Ayan Fleischmann

Fabrice Papa

Rodrigo Paiva

Sly Wongchuig

John Melack

La cuenca del río Amazonas es un importante sistema hidrológico (~6 millones de km<sup>2</sup> de área de drenaje) con diversos ríos, bosques y áreas inundables (Junk et al., 2011; Reyes et al., 2019; **Figura 1**). Abarca siete países y cuenta con cuatro de los diez más grandes ríos del mundo, a saber, los ríos Solimões-Amazonas<sup>1</sup>, Madera, Negro y Japurá (**Figura 2**), recibiendo alta precipitación anual (~2200 mm por año, Builes-Jaramillo y Poveda, 2018; Espinoza et al., 2009). Cerca del 30-40% de la precipitación en la cuenca se recicla por la evapotranspiración local (Eltahir y Bras, 1994; Salati et al., 1979; Satyamurty et al., 2013a), aportándoles humedad a las regiones del sur de América del Sur. El río Amazonas fluye hacia el Océano Atlántico con un caudal medio anual de 206000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (Callède et al., 2010), representando casi el 20% del agua dulce global que desemboca en el océano anualmente, arrastrando consigo una gran cantidad de sedimentos (1,1 mil millones de toneladas por año; Armijos et al., 2020).

Las altas tasas de precipitación, evapotranspiración y grandes variaciones en el almacenamiento de agua dulce y la escorrentía hacen de la cuenca amazónica una pieza clave en el sistema climático global, con gran contribución para los ciclos del agua, energía y carbono (Gash et al., 2013; Gatti et al., 2021; Nagy et al., 2016). Las aguas superficiales de la Amazonía, por ejemplo, son una importante fuente y sumidero de dióxido de carbono (Abril et al., 2014; Amaral et al., 2020; Guilhen et al., 2020; Raymond et al., 2013; Richey et al., 2002) y la mayor fuente natural de metano en los trópicos (Kirschke et al., 2013; Melack et al., 2004; Pangala et al., 2017; Pison et al., 2013). Las variaciones estacionales del agua contribuyen con la formación de bosques tropicales (Leite et al., 2012), mantienen una alta productividad acuática (Melack y Forsberg, 2001), promueven la biodiversidad (Junk, 1997; Junk et al., 2010), e influyen en la distribución de peces y la producción pesquera (Junk et al., 2010; Lobón-Cerviá et al., 2015; **Figura 1**). La cuenca alberga un ~40% del bosque tropical mundial y un ~15% de la biodiversidad terrestre global (Marengo et al., 2018). También es hogar de comunidades ribereñas que dependen de los ríos para el transporte y utilizan estos ecosistemas para su subsistencia (Anderson et al., 1991; Campos-Silva et al., 2020; Endo et al., 2016). Además, la Amazonía proporciona energía, alimentos y otros productos forestales a la población de Sudamérica en general, y desempeña un papel fundamental en el control de los procesos climáticos.



<sup>1</sup>El río Solimões-Amazonas se llama río Solimões antes de confluir con el río Negro, y a partir de ese lugar se llama río Amazonas hasta el océano.



---

**Figura 1:** Diversidad de la cuenca del río Amazonas. (a) Imagen de la misión espacial MODIS de la parte central de la cuenca, caracterizada por grandes llanuras aluviales (Fuente: catálogo de National Aeronautics and Space Administration - NASA; <https://visibleearth.nasa.gov/images/62101/the-amazon-Brasil/621041>); (b) Imagen de la misión espacial Sentinel-1 de los ríos y lagos del alto río Solimões (Fuente: catálogo de ESA; [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2020/09/Amazon\\_River](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/09/Amazon_River)); (c) Imagen MODIS mostrando la reducida cobertura de nubes sobre cuerpos de agua (Fuente: catálogo de NASA; <https://earthobservatory.nasa.gov/images/145649/mapping-the-amazon>); (d) Vista aérea del río Blanco (Fotografía de Thiago Laranjeira); (e) Llanura de inundación durante la época de aguas altas (Fotografía de João Paulo Borges Pedro); (f) Canal de bosque de várzea en la Reserva de Desarrollo Sostenible Mamirauá (Fotografía de Jefferson Ferreira-Ferreira); (g) Comunidad en margen de río (Fotografía de Thiago Laranjeira); (h) Manatí o vaca marina (Fotografía de Amanda Lellis); (i) Pirarucú, el mayor pez de agua dulce con escamas del mundo (Fotografía de Bernardo Oliveira).

La región ha enfrentado múltiples riesgos derivados de cambios en los factores climáticos y antropogénicos, y los cambios en la hidrología amazónica pueden provocar impactos sustanciales a nivel global (Jimenez et al., 2019). Durante las últimas décadas, la cuenca sufrió varios eventos climáticos intensos, como sequías e inundaciones extremas sin igual en los últimos 100 años (Barichivich et al., 2018; Marengo y Espinoza, 2016). Las sequías extremas pueden llevar a perturbaciones ambientales, desde aumento de incendios (Zeng et al., 2008) hasta cambios abruptos en los cardúmenes de peces (Röpke et al., 2017). Además, los impactos negativos acumulados por el aumento de intervenciones humanas en toda la región, como la construcción de represas (Forsberg et al., 2017; Latrubesse et al., 2017), la deforestación (Arias et al., 2020; Coe et al., 2009; Gutierrez-Cori et al., 2021; Leite-filho et al., 2020; Leite et al., 2012), los incendios (Aragão et al., 2008; Libonati et al., 2021; Xu et al., 2020; Zeng et al., 2008), y la explotación minera (Abe et al., 2019; Lobo et al., 2015), posiblemente desencadenaron y desencadenarán grandes modificaciones que podrían afectar el ciclo hidrológico de la Amazonía.

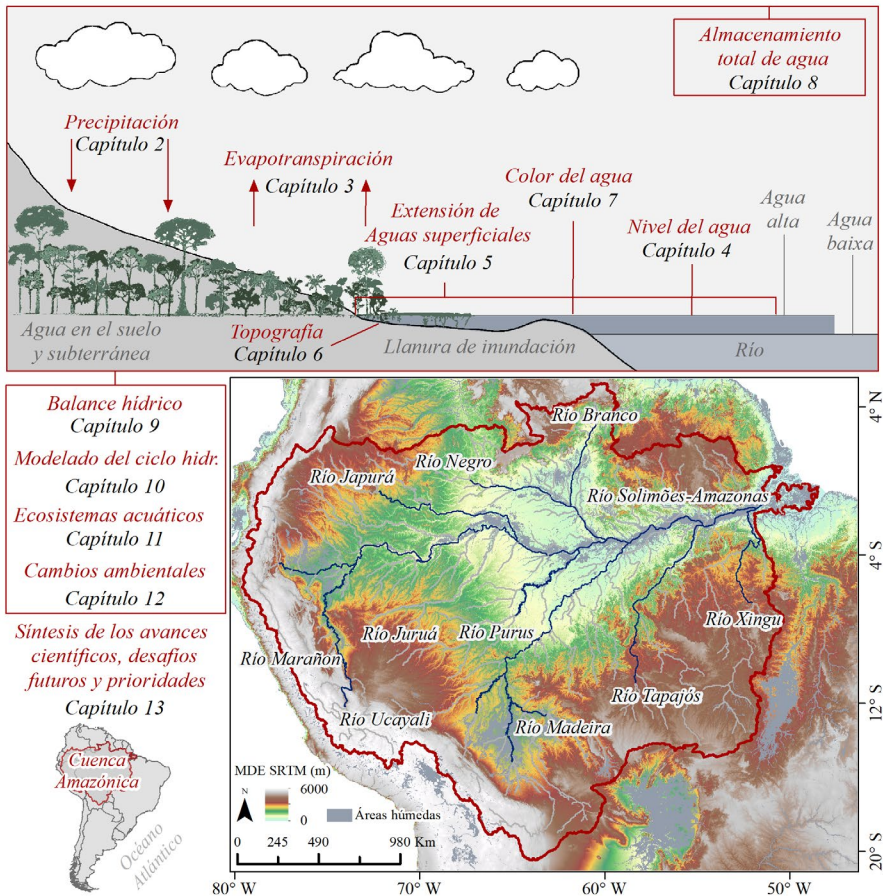
La caracterización y comprensión del ciclo del agua en la Amazonía es primordial para la investigación climática, ecológica y para la gestión de recursos hídricos. Consecuentemente, es necesario un monitoreo global de la dinámica espacio-temporal de los componentes del ciclo del agua y de cómo interactúan con la variabilidad climática y las presiones antropogénicas. En cuencas hidrográficas tropicales grandes y remotas como la amazónica, las redes de observación *in situ* son difíciles de operar y mantener, de esta forma las observaciones por teledetección han traído grandes oportunidades para el monitoreo de los diversos componentes del ciclo del agua, aunque muchos desafíos técnicos aún necesiten ser superados.

Durante las últimas décadas, mientras la cuenca amazónica estuvo en el centro de las discusiones científicas internacionales, el entendimiento de la hidrología

amazónica evolucionó junto a otro campo innovador: la teledetección del ciclo del agua terrestre. En este contexto, la cuenca amazónica ha sido un laboratorio natural ideal para el desarrollo productivo de técnicas de teledetección con el advenimiento de la observación de la Tierra a través de satélites. Estos avances han fomentado la comprensión científica de la hidrología amazónica, los ecosistemas y los cambios ambientales en curso. Por ejemplo, las primeras aplicaciones de los satélites altimétricos y gravimétricos para caracterizar, respectivamente, la elevación de las aguas superficiales (Guzkowska et al., 1990) y las variaciones totales de almacenamiento de agua (Tapley et al., 2004) fueron realizadas en la cuenca debido al amplio ancho del río y a las grandes variaciones espaciales y temporales del agua dulce. Las aplicaciones pioneras de teledetección también incluyen microondas, radar de apertura sintética y mapeo interferométrico de inundaciones a gran escala, así como la caracterización de la dinámica de sedimentos (Alsdorf et al., 2000; Hess et al., 2003; Mertens et al., 1993; Sippel et al., 1994). Desde entonces, se han realizado varias aplicaciones usando datos de teledetección en otras cuencas del mundo (por ejemplo, Alsdorf et al., 2021). Todos estos avances importantes han sido logrados por una diversificada comunidad de científicos con diferentes intereses y perspectivas sobre el ciclo del agua en el Amazonas. No obstante, hasta el día de hoy no existía una revisión completa que analizara el crecimiento continuo de publicaciones que utilizan observaciones de teledetección para estudiar la hidrología de la región.

En este libro, presentamos una extensa revisión de los logros alcanzados en más de tres décadas de avances científicos sobre la hidrología de la cuenca amazónica utilizando teledetección (**Figura 2**). También presentamos perspectivas, actualmente propiciadas por una disponibilidad sin precedentes, de observaciones de la Tierra y el lanzamiento inminente de satélites dedicados a la hidrología, como las misiones SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) y NASA-ISRO SAR (NISAR). Este trabajo ha reunido especialistas en teledetección de diferentes procesos hidrológicos de la cuenca amazónica para revisar tópicos específicos y discutir caminos para los avances científicos, así como las oportunidades que moldearán esta área en las próximas décadas. Las revisiones consideraron variables del ciclo hidrológico, como precipitación, evapotranspiración, elevación y extensión de aguas superficiales, topografía de la llanura de inundación y de los canales fluviales, calidad del agua (por ejemplo, estimación de sedimentos, clorofila y materia orgánica disuelta), almacenamiento total de agua y de aguas subterráneas, que se presentan en capítulos separados (**Figura 2**). Cada capítulo describe cómo se estima la variable por medio de teledetección y presenta los avances científicos que fueron alcanzados a partir de esta información, así como varias aplicaciones desarrolladas para la cuenca,

discutiendo los desafíos futuros. Luego, se presentan cuatro capítulos dedicados a la integración de datos de teledetección en las siguientes áreas: análisis de balance hídrico, modelado hidrológico e hidráulico, ecosistemas acuáticos y cambios ambientales en la Amazonía. El capítulo 13 resume los avances científicos, las lagunas de conocimiento y las oportunidades de investigación sobre la hidrología y los ecosistemas de la Amazonía, incluyendo las próximas misiones de observación de la Tierra. Este capítulo también aborda de qué forma los conocimientos adquiridos con las experiencias en la Amazonía están beneficiando el estudio en otras grandes cuencas hidrográficas del mundo. Al final del capítulo 13 se discute cómo aprovechar los avances científicos desarrollados para una planificación efectiva de recursos hídricos a escala de cuenca, así como las nuevas herramientas de monitoreo ambiental disponibles. Además, se destacan nuestras recomendaciones para la agenda de investigación de la hidrología amazónica desde el espacio para la próxima década.



**Figura 2:** Ubicación de la cuenca amazónica en América del Sur y representación de las variables hidrológicas observadas mediante las técnicas de teledetección, con la respectiva numeración de los capítulos de este libro.



02  
**Precipitación**

Sly Wongchuig  
Jhan Carlo Espinoza  
Gabriel Medeiros Abrahão

La precipitación es un componente crucial del ciclo del agua (Bookhagen y Strecker, 2008; Espinoza Villar et al., 2009b; Salati y Vose, 1984; Trenberth, 2011), que se caracteriza por la alta variabilidad espacial y temporal. En la cuenca amazónica, la precipitación está relacionada a interacciones complejas de varios procesos físicos y dinámicos de gran escala, así como a las características locales, responsables por la distribución temporal y espacial de la precipitación (Figuroa y Nobre, 1990). Por ejemplo, además de las precipitaciones orográficas que ocurren en la transición entre la Cordillera de los Andes y la Amazonía, la transpiración sustancial del bosque contribuye con abundantes flujos de agua hacia la atmósfera, que eventualmente retornan a la tierra como precipitación reciclada, contribuyendo con hasta un 30% de la precipitación de la cuenca (Bosilovich y Chern, 2006; Eltahir y Bras, 1994; Fisher et al., 2009; Salati y Nobre, 1991; Staal et al., 2018; Van Der Ent et al., 2010; Yang y Dominguez, 2019; Zemp et al., 2014). Las precipitaciones en Amazonía están relacionadas a procesos de convección profunda, que ayudan a mantener la circulación de gran escala en niveles altos de la atmósfera, conocida como *Bolivian High* (Lenters y Cook, 1997; Virji, 1981). Estos patrones de precipitación son afectados por fenómenos tanto a escala global (por ejemplo, *El Niño–Southern Oscillation –ENSO*, *Tropical Atlantic sea surface temperature –SSTemp*) como local, como la cobertura del suelo (Aceituno, 1988; Gutierrez-Cori et al., 2021; Koren et al., 2008; Leite-filho et al., 2020; Lin et al., 2006).

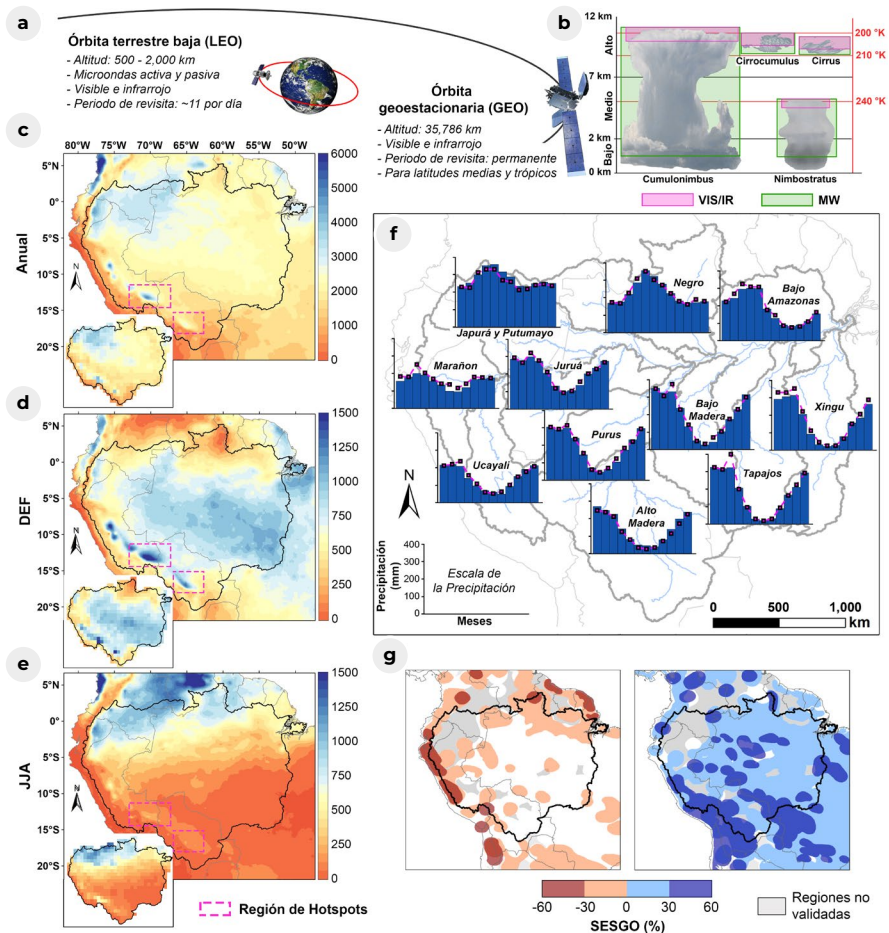
Los regímenes de precipitación en la cuenca difieren entre regiones en términos de ciclo estacional (Figura 3c a f), principalmente debido a su gran extensión. A escala local, los regímenes de lluvia presentan una alta variabilidad espacial (Arias et al., 2021; Espinoza et al., 2009). Por lo tanto, las mediciones precisas y confiables de la precipitación son fundamentales para el estudio de las tendencias y la variabilidad climática, así como para la gestión de los recursos hídricos y las previsiones meteorológicas, climáticas e hidrológicas en la región (Jiang et al., 2012; Liu et al., 2017; Yilmaz et al., 2005).

Los pluviómetros son tradicionalmente usados para medir la precipitación directamente en la superficie terrestre (Kidd, 2001), y se han desarrollado varias bases de datos especializados, a diferentes escalas, a partir de observaciones *in situ* (Becker et al., 2013; Kidd et al., 2017). Sin embargo, las mediciones *in situ* presentan varios inconvenientes, como una cobertura incompleta en áreas poco pobladas, lo que es común en los países amazónicos o en regiones remotas con grandes altitudes en los Andes (Condom et al., 2020). Además, la variabilidad espacial de

la precipitación contribuye a que las mediciones realizadas en estaciones *in situ* no sean completamente representativas de las áreas adyacentes, o puedan resultar imprecisas (Kidd et al., 2017; Prabhakara et al., 1986). En la cuenca amazónica las estaciones pluviométricas están típicamente localizadas en las ciudades, cerca de los principales ríos y tributarios, observándose una baja densidad de estaciones en el bosque tropical y en regiones poco accesibles. Por lo tanto, la baja densidad de la red pluviométrica y la falta de homogeneidad en las series temporales impiden un monitoreo confiable con datos de campo (Debortoli et al., 2015; Delahaye et al., 2015; Espinoza Villar et al., 2009b; Ronchail et al., 2002). Así, la recolección de observaciones complementarias a las mediciones *in situ* es fundamental para obtener una estimación de la precipitación sobre las diferentes regiones del continente (Kidd y Levizzani, 2011; Van Dijk y Renzullo, 2011; Wanders et al., 2014).

Durante las últimas décadas, las observaciones de precipitación por satélite se han puesto a disponibilidad a escala global. Estos satélites usan principalmente sensores infrarrojos (IR, *InfraRed*) y microondas (MW, *MicroWave*) para indicar valores aproximados de precipitación usando diferentes técnicas (Kidd y Huffman, 2011). Los sensores usados para calcular la precipitación pueden ser clasificados en tres categorías (Prigent, 2010): (i) sensores visibles/IR (VIS/IR) en satélites geoestacionarios (GEO) y en órbita terrestre baja (LEO, *Low Earth Orbit*), (ii) sensores de MW pasivos (PMW, *Passive MicroWave*) en satélites LEO, y (iii) sensores de MW activos (AMW, *Active MicroWave*) en satélites LEO. Los sistemas de imagen en satélites geoestacionarios GEO brindan un ciclo de actualización temporal rápido, necesario para capturar el aumento y la disminución de los sistemas de nubes de precipitación en una escala de varios kilómetros. Las imágenes generadas por sensores de microondas a bordo de los satélites LEO son más adecuadas que las generadas por sensores IR para mediciones cuantitativas de precipitación, debido a la relación física bien establecida entre la radiación ascendente y la estructura de la precipitación en nubes (Turk et al., 2000; **Figura 3a y b**).

A partir de estos sensores, se ha desarrollado una vasta gama de productos que calculan la precipitación basados en algoritmos sometidos a una validación rigurosa para ofrecer informaciones sobre calidad, limitaciones e incertidumbres asociadas a los datos calculados. Esos algoritmos se dividen principalmente en los llamados métodos “calibrados por microondas” y Morphing (Huffman et al., 2007; Joyce et al., 2004; Kidd et al., 2003; Marzano et al., 2004; Paola et al., 2012). Sin embargo, existen diferencias entre esos conjuntos de datos debido a deficiencias en las fuentes



**Figura 3:** (a) Representación esquemática de sensores remotos para el cálculo de la precipitación a bordo de satélites. (b) Ilustración de la banda de cobertura de visible/infrarrojo y microondas para diferentes tipos de nubes. Climatología de precipitación (c) anual, (d) para el verano austral - DEF, y (e) para el invierno austral - JJA, con el conjunto de datos CHIRP v2 (1981-2020) con resolución espacial de 5 km, en la imagen mayor y con la base de datos HOP (1981-2009) con resolución de 100 km (Espinoza et al., 2016; Guimberteau et al., 2012), en pequeñas cajas en la parte inferior izquierda. (f) Régimen anual de precipitación para once grandes subcuencas de la Amazonía, con el conjunto de datos HOP (1981-2009) (barras), y el basado en datos CHIRP (1981-2020) en líneas magentas. (g) Sego medio anual negativo (escala roja) y positivo (escala azul) de seis productos de precipitación basados en teledetección y no corregidos por pluviómetros en la cuenca amazónica para el período 2000-2016, adaptados de Beck et al. (2017b).

y en la generación de los productos. Por lo tanto, LEO MW, GEO VIS/IR, datos *in situ* y datos de reanálisis han sido combinados para aprovechar los beneficios relativos vinculados a cada tipo de sensor y producto (Figura 3a). Esto puede aumentar precisión, cobertura, resolución espacio-temporal, homogeneidad espacial

y continuidad temporal (Adler et al., 1994; Huffman et al., 1995; Joyce et al., 2004; Levizzani et al., 2007; Sorooshian et al., 2002; Tapiador et al., 2004; Vicente et al., 1998; Xie et al., 2003).

Los conjuntos de datos disponibles en modo operacional incluyen *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM; Huffman et al., 2007), *Climate Hazards group InfraRed Precipitation* (CHIRP; Funk et al., 2015), *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN; Ashouri et al., 2015), *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM* (IMERG; Huffman, Bolvin, y Nelkin, 2015; Huffman, Bolvin, Braithwaite, et al., 2015), Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation near-real-time (MSWEP-NRT; Beck et al., 2018) y productos de la técnica *morphing* (CMORPH; Joyce et al., 2004), del Centro de Previsión del Clima (CPC *Climate Prediction Center*), entre otros. Aunque un número creciente de bases de datos de precipitación con una mayor resolución espacial y temporal haya sido elaborado y comparado directamente o por medio de la aplicación de modelos hidrológicos, se han presentado incertidumbres e imprecisiones entre

**TABLA 1**

Misiones y productos que ofrecen niveles aproximados de precipitaciones derivados de datos de teledetección, incluyendo resolución temporal-espacial, satélites y algoritmos utilizados, y links de repositorio (NRT - sigla en inglés para Casi en Tiempo Real).

NOMBRE	NOMBRE EXTENDIDO	AJUSTE	COBERTURA	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN TEMPORAL	COBERTURA TEMPORAL	REFERENCIA / LINK
<b>CMORPH v1.0</b>	Técnica CPC MORPHing (CMORPH) V1.0	-	60° N/S	0.07°	30 min	1998-NRT	Joyce et al. (2004); Joyce e Xie (2011); Xie et al., (2017)  <a href="http://www.cpc.ncep.noaa.gov">www.cpc.ncep.noaa.gov</a>
<b>CMORPH-CRT v1.0</b> <b>CMORPH v1.0</b>	Técnica CPC MORPHing (CMORPH) con sesgo corregido (CRT) V1.0	Pluviómetro	60° N/S	0.07°	30 min	1998-2019	<a href="https://rda.ucar.edu/datasets/ds502.2">https://rda.ucar.edu/datasets/ds502.2</a>  <a href="ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CMORPH_V1.0/CRT/">ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CMORPH_V1.0/CRT/</a>
<b>GSMaP-Std v6</b>	Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Moving Vector with Kalman (MVK) Standard V6	-	60° N/S	0.1°	Horaria	2000-NRT	Ushio et al. (2009)
<b>GSMaP-Std Gauge v7</b>	Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Moving Vector with Kalman (MVK) Standard gauge-corrected V7	Pluviómetro	60° N/S	0.1°	Horaria	2000-NRT	<a href="http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/">http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/</a>

<b>IMERGHHE v06</b>	<i>Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) early run V06</i>	-	Global	0.1°	30 min	2010-NRT	Huffman et al. (2015a, 2015b); Tan et al. (2019) <a href="https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GPM_L3/GPM_3IMERGHHE.06/">https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GPM_L3/GPM_3IMERGHHE.06/</a>
<b>IMERGDF v06</b>	<i>Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) final run V06</i>	Pluviómetro	Global	0.1°	Diaria	06/2000 - Presente	<a href="https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GPM_L3/GPM_3IMERGDF.06/">https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GPM_L3/GPM_3IMERGDF.06/</a>
<b>PERSIANN</b>	<i>Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN)</i>	-	60° N/S	0.25°	Horaria	03/2000-NRT	
<b>PERSIANN-CCS</b>	<i>Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN) Cloud Classification System (CCS)</i>	-	60° N/S	0.04°	Horaria	01/2003-NRT	Ashouri et al. (2015); Nguyen et al. (2019); Sorooshian et al. (2000) <a href="https://chrsdata.eng.uci.edu/">https://chrsdata.eng.uci.edu/</a>
<b>PERSIANN CDR VIRI</b>	<i>Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN) Climate Data Record (CDR) VIRI</i>	Pluviómetro	60° N/S	0.25°	Diaria	1983- Presente	
<b>SM2RAIN-CCI v2</b>	Rainfall inferred from European Space Agency's Climate Change Initiative (CCI) satellite near-surface soil moisture V2	Humedad del Suelo	Quasi Global / Land	0.25°	Diaria	01/1998-12/2015	Brocca et al. (2014); Ciabatta et al. (2018) <a href="https://zenodo.org/record/846260">https://zenodo.org/record/846260</a> <a href="https://doi.org/10.5281/zenodo.846259">https://doi.org/10.5281/zenodo.846259</a>
<b>SM2RAIN-ASCAT v1.2</b>	Rainfall inferred from Advanced SCATterometer soil moisture	Humedad del Suelo	Global	12.5 km	Diaria	2007-2019	Brocca et al. (2019) <a href="https://doi.org/10.5281/zenodo.3635932">https://doi.org/10.5281/zenodo.3635932</a>
<b>GPM+SM2RAIN v0.1</b>	Rainfall inferred from ASCAT H113 H-SAF, SMOS L3 and SMAP L3 soil moisture	Humedad del Suelo	Global	0.25°	Diaria	2007-2018	Massari (2020) <a href="https://doi.org/10.5281/zenodo.3854817">https://doi.org/10.5281/zenodo.3854817</a>

<b>TMPA-3B42RT v7</b>	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) 3B42RT V7	-	60° N/S	0.25°	3 horas	03/2000-NRT	Huffman et al. (2007)  <a href="https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42RT_7/summary">https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42RT_7/summary</a>
<b>TMPA-3B42 v7</b>	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) 3B42 V7	In situ	50° N/S	0.25°	3 horas	12/1997-01/2020	<a href="https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_7/summary">https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_7/summary</a>
<b>TMPA-3B43 v7</b>	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) 3B43 V7	In situ	50N-50S	0.25°	Mensual	1998-2020	Huffman et al. (2010)  <a href="https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B43.7/">https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B43.7/</a>
<b>GridSat v1.0</b>	P derived from the Gridded Satellite (GridSat) B1 thermal infrared archive v02r01	-	< 50°	0.1°	3 horas	1983-2016	Knapp et al. (2011)  <a href="https://www.ncdc.noaa.gov/gridsat/">https://www.ncdc.noaa.gov/gridsat/</a>
<b>ERA5 -HRES</b>	European Centre for Medium-range Weather Forecasts ReAnalysis 5 (ERA5) High RESolution (HRES)	Reanálisis	Global	0.28° (~31 Km)	Horaria	2008-NRT	Hersbach et al. (2020, 2018)
<b>ERA5 - EDA</b>	European Centre for Medium-range Weather Forecasts ReAnalysis 5 (ERA5) Ensemble Data Assimilation (EDA) ensemble mean	Reanálisis	Global	-0.56°	Horaria	2008-NRT	
<b>ERA5-Land</b>	European Centre for Medium-range Weather Forecasts ReAnalysis 5 (ERA5)	Reanálisis	Global	0.1°	Horaria	01/1981 - Presente	<a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#/dataset/reanalysis-era5-land">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#/dataset/reanalysis-era5-land</a>
<b>CHIRP v2.0</b>	Climate Hazards group InfraRed Precipitation (CHIRP) V2.0	Reanálisis	50° N/S	0.05°	Diaria	1981-NRT	Funk et al. (2015)  <a href="https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRP/daily/netcdf/">https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRP/daily/netcdf/</a>
<b>CHIRPS v2.0</b>	Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) V2.0	Reanálisis y Pluviómetro	50° N/S	0.05°	Diaria	01/1981-presente	<a href="https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/">https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/</a>

<b>GPCP-1DD v1.2</b>	<i>Global Precipitation Climatology Project (GPCP) 1-Degree Daily (1DD) Combination V1.2</i>	Pluviómetro	Global	1°	Diaria	10/1996 - 11/2015	Huffman et al. (2016, 2001) <a href="https://rda.ucar.edu/datasets/ds728.3">https://rda.ucar.edu/datasets/ds728.3</a>
<b>GPCP-PEN v2.2</b>	<i>Global Precipitation Climatology Project (GPCP) pentad precipitation analysis (PEN)</i>	Pluviómetro	Global	2.5°	5 veces ao día	01/1979 - 06/2017	Xie et al. (2011) <a href="https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1214566485-NO-AA_NCEI">https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1214566485-NO-AA_NCEI</a> <a href="http://apdr.csoest.hawaii.edu/dchart/index.html?dsetid=e-53e32f2c760e6375a-4de86bd4718cba">http://apdr.csoest.hawaii.edu/dchart/index.html?dsetid=e-53e32f2c760e6375a-4de86bd4718cba</a>
<b>MERRA-2</b>	<i>Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications 2</i>	Reanálisis y Pluviómetro	Global	-0.5°	Horaria	1980 - NRT	Gelaro et al. (2017); Reichle et al. (2017)
<b>MSWEP v2.2</b>	<i>Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) V2.2</i>	Reanálisis y Pluviómetro	Global	0.1°	3 horas	01/1979 - NRT	Beck et al. (2019, 2017a) <a href="http://www.gloh2o.org">www.gloh2o.org</a>
<b>CMAP</b>	<i>CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP)</i>	Pluviómetro	Global	2.5°	Mensal	1979 - Presente	Huffman et al. (1997) <a href="ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/cmap/">ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/cmap/</a>
<b>CPC-Global</b>	<i>CPC Unified Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation</i>	Pluviómetro	Global	0.5°	Diaria	2006 - Presente	Chen et al. (2008) <a href="https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CPC_UNLPRCP/">https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CPC_UNLPRCP/</a>

las diferentes bases de datos (Beck et al., 2018, 2017b; Collischonn et al., 2008; Correa et al., 2017; Sun et al., 2018; Tapiador et al., 2017). Un resumen de las bases de datos pluviométricos provenientes de satélites actualmente disponibles para la región amazónica se presenta en la **Tabla 1**.

Durante las últimas décadas, las informaciones sobre precipitación basadas en teledetección contribuyeron sustancialmente a comprender los principales procesos que causan su variabilidad espacial y temporal, así como los procesos atmosféricos locales y regionales relacionados. Esas bases de datos globales, o casi globales, generalmente ofrecen registros de precipitación adecuados para estudios climáticos e hidrológicos, tales como iniciativas de reanálisis hidrológicos evaluados en la

Amazonía a escala regional (p. ej. Correa et al., 2017; Wongchuig et al., 2019) y global (p. ej. Balsamo et al., 2015; Rodell et al., 2004; Van Huijgevoort et al., 2013).

Muchos estudios han usado bases de datos de precipitación por satélite como base para forzar modelos hidrológicos. Uno de los primeros estudios fue realizado en la cuenca del río Tapajós, uno de los principales tributarios del río Amazonas, que utilizó cálculos estimativos de precipitación TRMM como entrada para un modelo hidrológico de tipo lluvia-escorrentía (Collischonn et al., 2008). Diferentes investigaciones fueron evaluadas a fin de representar las series interanuales, intraestacionales (30 a 70 días, Kiladis y Mo, 1998) y multidecadales en la Amazonía. Las bases de datos por satélite también fueron usadas en estudios de balance hídrico para evaluar tendencias de largo plazo (Espinoza et al., 2019a; Heerspink et al., 2020; Paca et al., 2020; X. Y. Wang et al., 2018) y variaciones mensuales de escorrentía (Builes-Jaramillo y Poveda, 2018). Además, en las últimas décadas la utilización de estimaciones de precipitación por satélite permitió documentar eventos hidrológicos extremos en la cuenca amazónica (Barichivich et al., 2018; Espinoza et al., 2014, 2012; Funatsu et al., 2021; Gloor et al., 2013; Marengo y Espinoza, 2016; Satyamurty et al., 2013b; Sena et al., 2012). Las aplicaciones de las bases de datos de precipitación para la comprensión del ciclo del agua por medio del modelado hidrológico se describen en el capítulo 10.

Sin embargo, debido a imprecisiones entre diferentes bases de datos, se realizaron varias evaluaciones de conjuntos de datos pluviométricos a partir de estudios globales (Beck et al., 2018, 2017; Sun et al., 2018), o para toda la cuenca (Cavalcante et al., 2020; Correa et al., 2017; Espinoza et al., 2019a; Haghtalab et al., 2020; Mayta et al., 2019; Paca et al., 2019; Zubieta et al., 2019) o para regiones específicas dentro de la Amazonía (Avila-Diaz et al., 2020; Bookhagen y Strecker, 2008; Chavez y Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015; Getirana et al., 2011; Killeen et al., 2007; Manz et al., 2017; Paccini et al., 2018; Zulkafli et al., 2014). Estos conjuntos de datos tienen resultados diferentes dependiendo de la región y la escala de tiempo analizadas, conforme se describe a continuación junto con los principales avances científicos obtenidos.

Las **Figuras 3c-e** muestran la precipitación acumulada en la cuenca amazónica para los períodos anual, húmedo (DEF) y seco (JJA), respectivamente. En estas figuras se utilizaron la base de datos de precipitación (HOP) del sistema de monitoreo HYBAM de la cuenca amazónica, compuesto por 752 estaciones pluviométricas

diarias en toda la Amazonía con resolución espacial de 1° (Espinoza et al., 2016; Guimberteau et al., 2012), y la base de datos CHIRP con resolución de 5 km.

Los estudios climatológicos en la cuenca que consideran patrones espaciales comenzaron a realizarse en los años 1980. La evaluación de la radiación de onda larga ascendente (ROL) de los satélites en órbita polar (principalmente los de NOAA), por ejemplo, iniciada en 1974, fue particularmente útil para el monitoreo rutinario de las zonas de formación de nubes y convección profunda sobre los trópicos con el trabajo pionero de Gruber y Krueger (1984) y Liebmann y Smith (1996). Otros patrones de precipitación regional fueron revelados en la transición entre los Andes y la Amazonía en la región de los llamados hotspots de precipitaciones, donde la precipitación puede alcanzar valores superiores a 6000 mm por año, la mayor precipitación promedio anual en la cuenca amazónica (Chavez y Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015; Killeen et al., 2007). Esta región está entre las áreas más lluviosas del mundo, de acuerdo con el conjunto de datos IMERG *Grand Average Climatology*, que comprende el período de junio de 2000 a mayo de 2019 y tiene las mayores líneas de inestabilidad del mundo (sistemas convectivos casi lineales; Garstang et al., 1994). Estructuras verticales y horizontales extremas ocurren debido a las interacciones entre la circulación atmosférica a gran escala y la topografía masiva que afectan la convección atmosférica, produciendo los *hotspots* de lluvia durante casi todo el año (Bookhagen y Strecker, 2008; Espinoza Villar et al., 2009a; Killeen et al., 2007). Además, cambios en la cobertura forestal en el sur de la Amazonía han sido considerados un factor que puede intensificar la presencia de células convectivas, ocasionando variabilidad espacial y temporal acentuada (Durieux et al., 2003; Funatsu et al., 2012; Laurance y Bruce Williamson, 2001; Staal et al., 2020). Una discusión más detallada de los efectos de los cambios de la cobertura del suelo sobre los patrones de precipitación puede ser encontrada en el capítulo 12 sobre cambios ambientales.

La **Figura 3f** muestra la distribución espacial del ciclo anual de precipitación según las bases de datos CHIRP y HOP. Los ciclos anuales de precipitación en la cuenca varían significativamente, en función de latitud, orografía y características atmosféricas de gran escala, como ejemplos la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sigla en inglés), el Sistema Monzónico Sudamericano (SAMS, por sigla en inglés) y la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (SACZ, por sigla en inglés) (Espinoza Villar et al., 2009b). La tendencia de las bases de datos aparece en la **Figura 3g**, que considera seis conjuntos de datos no corregidos

por pluviómetros (PERSIANN-CCS, MSWEP-ng v2, CHIRP v2.0, CMORPH v1.0, SM2RAIN-ASCAT y TMPA 3B42RT v7, adaptado de Beck et al. (2017b). La tendencia en la precipitación anual total para el período 2000–2016 se presenta para valores negativos y positivos, en los cuales al menos una de esas bases de datos detectó un valor igual o mayor de tendencia. Las bases de datos que se apoyan en datos de satélites fueron validadas a partir de estaciones *in situ* de fuentes de datos globales y locales (por ejemplo, GHCN, la base de datos *Global Summary of the Day* - GSOD, y el *Latin American Climate Assessment & Dataset*). La evaluación de las bases de datos mostró un fuerte sesgo en la Amazonía occidental y sur, en la región de cabeceras de los Andes.

En la región de transición Andes-Amazonía los datos de precipitación basados en teledetección contribuyeron para comprender los principales procesos orográficos relacionados con los vientos anabáticos y catabáticos, que son esenciales para explicar el ciclo diurno de precipitación en esta área (Junquas et al., 2018). En esta región específica, los sesgos de la precipitación medida por satélites generalmente coinciden con otras zonas. Sin embargo en los *hotspots* de lluvias de los Andes peruanos la precipitación total anual (de la base de datos TRMM-PR para el período 1998–2012) presenta una subestimación de cerca del 35% a 40% (Chavez y Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015). El sesgo general en algunas regiones andinas puede ser explicada, en parte, por la predominancia de nubes cirrus (confundidas por sensores de satélites con nubes convectivas, como las cumulonimbus, que tienen temperatura similar en su tope; Paredes Trejo et al., 2016; Thiemig et al., 2013; **Figura 3b**), lo que ocurre, por ejemplo, al este de las montañas del sur de los Andes (planalto del altiplano que se extiende entre 15°S y 22°S). Esto sucede principalmente durante la época húmeda en el verano austral (Barahona et al., 2017; Dinku et al., 2011; Viale et al., 2019), donde estas formaciones de nubes dependen de la orografía (Chavez y Takahashi, 2017; Giovannettone y Barros, 2009; Junquas et al., 2018; Saavedra et al., 2020; Satgé et al., 2017, 2016).

La circulación de mesoescala entre la superficie terrestre y grandes masas de agua en la cuenca amazónica produce brisas fluviales y costeras. Estos sistemas afectan el transporte de humedad y el patrón de precipitación espacial en una escala local (Fitzjarrald et al., 2008; Santos et al., 2019; Silva Días et al., 2004). Los datos de teledetección ayudaron a revelar que la brisa fluvial reduce la precipitación sobre los grandes cuerpos de agua de la Amazonía (ríos y grandes reservorios) por medio del uso del TRMM (Paiva et al., 2011a).

Cambios en la cobertura del suelo pueden producir patrones complejos de circulación en mesoescala, incluyendo la llamada “brisa de la deforestación” (Lawrence y Vandecar, 2015; Saad et al., 2010). La deforestación de gran escala puede alterar significativamente las tendencias de lluvia en diferentes escalas (Leite-Filho et al., 2021). Los patrones pluviométricos pueden verse afectados en diversas escalas, desde locales hasta continentales. Cambios de este tipo ya han sido observados en la Amazonía en las últimas décadas (Butt et al., 2011; Khanna et al., 2017; Leite-Filho et al., 2019). Los efectos de la deforestación sobre la precipitación se discutirán con mayor detalle en el capítulo 12.

Los datos de teledetección han sido utilizados para evaluar la variabilidad temporal en diferentes escalas de tiempo. Los cambios sinópticos espaciales en los patrones de precipitación, por ejemplo, fueron evaluados usando informaciones de teledetección debido a la distribución espacial heterogénea de las estaciones meteorológicas y a mediciones temporales dudosas en los pluviómetros (Arvor et al., 2017; Silva Junior et al., 2018). Otros estudios a escala diaria se concentraron en la evaluación del desempeño de los conjuntos de datos TMPA V7, TMPA RT, CMORPH y PERSIANN para representar el índice de concentración de precipitación durante el período 2001-2009 (Zubieta et al., 2019). Este índice es un indicador de la distribución temporal de la precipitación. Los autores concluyeron que los mejores productos (CMORPH y TMPA V7) pueden ser una fuente alternativa de datos para detectar cambios en la concentración de la precipitación diaria durante las estaciones secas o húmedas en regiones de la cuenca que presentan eventos extremos.

Considerando que una de las principales características de los procesos de convección en las regiones tropicales es su fuerte relación con el ciclo diario (Duvel y Kandel, 1985; Minnis y Harrison, 1984), se realizaron estudios pioneros a partir de los años 1990 para la comprensión de los patrones convectivos en la cuenca amazónica. Basados en nueve años (1983-1991) de datos de los satélites GEO IR (puntualmente el producto B3 ISCCP) con resolución temporal de 3 horas, Garreaud y Wallace (1997) documentaron varias características de la variación diaria en la frecuencia de la nubosidad asociada a procesos convectivos. Los datos del SSM/I a bordo del *Defense Meteorological Satellite Program* con la aplicación del algoritmo *Goddard Profiling* también se utilizaron para caracterizar la climatología (10 años) y la variabilidad diaria (6 años) de la precipitación en la cuenca (Negri et al., 2000). Oliveira et al. (2016) evaluaron dos productos GPM a fin de reproducir el ciclo diario de precipitación en la Amazonía central y obtuvieron resultados

semejantes a los de Angelis et al. (2004), que mostraron que la lluvia tiende a ocurrir principalmente durante la tarde en la cuenca Amazónica central.

Las informaciones de teledetección sobre precipitaciones han ayudado a identificar la época de inicio y fin de la estación lluviosa (Wright et al., 2017). El interés por la duración de la estación seca se motiva porque la prolongación de la estación seca aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas locales y de la agricultura a eventos de sequía y quemas (Arias et al., 2015; Fu et al., 2013; Marengo et al., 2011). Una de las primeras evaluaciones basadas en teledetección constató que el inicio de la estación lluviosa en la Amazonía ocurre particularmente en un único mes (Horel et al., 1989). Negri et al. (1994) produjeron una climatología de precipitación regional sobre la Amazonía durante la estación lluviosa (enero-mayo) usando tres años de datos obtenidos dos veces por día por el *Special Sensor Microwave/Imager* (SSM/I). Cambios en la amplitud del ciclo estacional también fueron observados con los datos del TRMM (Liang et al., 2020).

Las informaciones de teledetección aportaron avances significativos en la comprensión de los procesos que rigen la estacionalidad de las precipitaciones en la cuenca amazónica. La disponibilidad de datos de precipitación por satélite, ROL y reanálisis permitieron la descripción de los patrones estacionales térmicamente orientados que forman el Sistema Monzónico Sudamericano (SAMS, por sigla en inglés), anteriormente no entendido como un monzón, en parte porque no presenta la inversión estacional clásica de vientos zonales absolutos (Zhou y Lau, 1998). Una característica inusual del monzón sobre la Amazonía es que el inicio de las precipitaciones ocurre antes de la migración de la ITCZ hacia el sur y la zona de presión de la Alta de Bolivia, se genera parcialmente por la liberación de calor latente de la precipitación sobre la cuenca antes del tradicional inicio de los monzones (Fu et al., 1999).

A escala estacional e intraestacional, los datos ROL de los satélites de órbita polar de la NOAA fueron utilizados para identificar la intensidad y características espaciales de la SACZ en la región de la Amazonía brasileña (Carvalho et al., 2004). La SACZ es una zona de convección noroeste-suroeste que se extiende desde la cuenca amazónica hasta el sudeste del Océano Atlántico, cuya intensidad y distribución geográfica están asociadas a eventos pluviométricos extremos en el sur de la Amazonía. En escala intraestacional, la Oscilación en gran escala Madden-Julian (MJO; Madden y Julian, 1994) fue establecida como el modo más dominante de variabilidad en

los trópicos, modulando la SACZ y otras características climatológicas sobre la cuenca. Mayta et al. (2019) y Vera et al. (2018) utilizaron datos de ROL como *proxy* de convección para analizar la variabilidad intraestacional de la precipitación en América del Sur. En particular, De Souza y Ambrizzi (2006) mostraron que la MJO es el principal mecanismo atmosférico de variabilidad pluviométrica a escalas de tiempo intraestacional sobre la Amazonía oriental durante la estación lluviosa, lo que fue confirmado por medio del uso de la red de pluviometría por Mayta et al. (2019). Además, las informaciones de teledetección contribuyeron a comprender los mecanismos de circulación atmosférica y el desempeño de bases de datos de precipitación estacional e intraestacional. En la región de transición Andes-Amazonía, por ejemplo, patrones específicos de circulación atmosférica fueron descritos por Paccini et al. (2018), cuyas particulares situaciones meteorológicas fueron relacionadas con las anomalías de precipitación regional usando conjuntos de datos TRMM 3B42, TRMM-PR 2A25 y CHIRPS.

Cambios en la distribución espacial y temporal de las precipitaciones en la cuenca amazónica pueden proporcionar un indicador de variabilidad climática que, a la vez, es un indicador de variabilidad hidrológica, incluyendo eventos extremos como inundaciones crecidas y sequías (p. ej. Lewis et al., 2011; Marengo y Espinoza, 2016). La evaluación directa de estas bases de datos se hizo para caracterizar la evolución temporal de las precipitaciones por medio del análisis de los índices de casos, como la frecuencia de días secos y la frecuencia de días húmedos por medio de la base de datos CHIRPS (Espinoza et al., 2019a); o la evaluación de la tendencia en la duración de la estación lluviosa en el sur de la Amazonía con el PERSIANN-CDR (Arvor et al., 2017). La evolución interanual de procesos hidrológicos, como el coeficiente de escurrimiento, fue evaluada por medio de un análisis del balance hídrico utilizando la base de datos CHIRPS (Espinoza et al., 2019b). Un enfoque similar, a partir del balance hídrico superficial de largo plazo sobre el sistema Andes-Amazonía, fue realizado por Builes-Jaramillo y Poveda (2018) por medio del uso de informaciones *in situ* (precipitación del GPCC y escorrentía superficial de HYBAM) e informaciones basadas en teledetección y modelos de superficie (evapotranspiración del ORCHIDEE, GLEAM, MPI y MOD16). Este estudio indicó que las fallas y la escasez de informaciones en altas altitudes en los Andes inducen a incertidumbres y errores en el balance hídrico. Adicionalmente, el CHIRPS v2.0 fue usado para analizar anomalías de precipitación para identificar patrones espaciales de sequía en la cuenca relacionados a anomalías de temperatura de la superficie del mar en el Atlántico y el Pacífico tropicales y a diferentes eventos

ENSO (Jimenez et al., 2019).

Desde la década de 1980, las estimaciones de precipitación en la cuenca amazónica han mostrado una mayor cantidad de lluvia en el norte, particularmente durante la estación lluviosa (Espinoza et al., 2019a; Paca et al., 2020; G. Wang et al., 2018) y una menor cantidad en el sur, particularmente durante la estación seca (Espinoza et al., 2019a; Leite-Filho et al., 2019). Este patrón contrastante norte-sur se traduce en el comportamiento hidrológico de las principales cuencas que muestran una intensificación del régimen hidrológico en el tramo principal del río Amazonas (Barichivich et al., 2018; Espinoza Villar et al., 2009a; Heerspink et al., 2020).


Las características de la Amazonía imponen desafíos únicos a los algoritmos de cálculos de lluvia por satélite, tanto de sensores IR como MW, considerando contrastes en términos de orografía, clima y cambios en la cobertura vegetal. Para los sensores IR los desafíos ocurren principalmente para estimaciones de precipitaciones orográficas calientes (mostradas al norte de 10°S), donde los límites de temperatura de brillo (más fríos que nubes orográficas calientes) tienden a subestimar las cantidades de lluvia. Esto sucedería en las regiones de *hotspots de precipitaciones*, en la región de transición Andes-Amazonía, entre Perú y Bolivia (Espinoza et al., 2015). Para los algoritmos MW, la sobreestimación de la lluvia surge de las superficies frías de hielo sobre las cimas de las montañas, lo que puede ser equivocadamente interpretado como precipitación (Dinku et al., 2011; Toté et al., 2015).

Una vez que las estimaciones de precipitación por satélite se ajustan con base en las observaciones de los pluviómetros, la precisión de los valores estimados puede verse aumentada. Esto requiere de una red de pluviómetros con cobertura espacial adecuada en áreas clave de la Amazonía y registros de alta calidad para calibración y validación adecuadas. En el caso de estaciones *in situ*, se deben tomar en consideración algunos aspectos, pues las estimaciones de precipitación pluviométrica probablemente serán distorsionadas por la brisa del río en algunas épocas del año, ya que las estaciones meteorológicas están normalmente localizadas cerca de grandes ríos y de muchas ciudades (Paiva et al., 2011a; Santos et al., 2019; Silva Días et al., 2004).

Las misiones actuales de satélites con tecnología de radar, como el radar de precipitación de la misión TRMM, el Radar perfilador de nubes del CloudSat o el Radar de precipitación de doble frecuencia GPM, tienen baja resolución temporal, por lo tanto, no consiguen observar la evolución en corto plazo de los

procesos meteorológicos. Para superar esta limitación, usando solo radares en LEO, es necesario contar con una constelación de estos satélites. Durante los últimos años, los nanosatélites (por ejemplo, las plataformas SmallSat o CubeSat) han permitido reducir el tamaño y los costos, manteniendo los requisitos fundamentales de sus equivalentes más grandes y costosos. En este sentido, el RainCube es una potencial misión de demostración tecnológica para permitir tecnologías de radar de precipitación en una plataforma de bajo costo (Peral et al., 2019).

Los radares terrestres pueden medir la estructura vertical de la lluvia, ya que su estructura depende del tipo de lluvia, pero con mejor resolución temporal que MW a bordo de satélites (Kumar et al., 2020). Un ejemplo reciente es el algoritmo operacional *RAdar INfrared Blending* para el monitoreo operativo del clima, que agrupa la red de radares terrestres con imágenes de satélite del VIS y el IR para caracterizar patrones e intensidades de lluvia sobre Italia (Adderio et al., 2020). Nuevos métodos han surgido aprovechando la red global de telefonía celular y su densidad para hacer cálculos estimados de la intensidad de las precipitaciones, principalmente en áreas urbanas, pero que también pueden ser usados en regiones con alta variabilidad topográfica (Gosset et al., 2016; Overeem et al., 2016, 2013; van het Schip et al., 2017). Sin embargo, aún no han sido aprovechados en la cuenca amazónica. En general, las bases de datos a escalas mensuales y anuales son útiles porque están alineadas con las observaciones, pero existen más inconsistencias en comparación con los datos diarios y con los datos obtenidos varias veces al día.



# 03 Evapotranspiración

Adriana Moreira  
Ayan Fleischmann  
Leonardo Laipelt  
Anderson Ruhoff

La Evapotranspiración (*ET*) tiene una enorme importancia para el sistema climático terrestre, siendo una fuente de humedad para la atmósfera, al interconectar los ciclos del agua, la energía y el carbono (Fisher et al., 2017; M. Jung et al., 2010), además de tener un papel significativo en el reciclaje de la precipitación y la regulación de la temperatura, a escalas local y regional (Marengo et al., 2018). Algunos estudios han demostrado que aproximadamente la mitad de la precipitación en la cuenca amazónica es reciclada localmente por la *ET* (Salati et al., 1979; Satyamurty et al., 2013a; Zemp et al., 2017). Además, la *ET* de la Amazonía constituye una importante fuente de humedad para el sudeste de América del Sur, suministrando cerca del 70% de la precipitación en esta región, por medio de los “ríos voladores” (Pearce, 2020; Van Der Ent et al., 2010). Especialmente durante la estación seca, ha quedado demostrado que la *ET* de la Amazonía provee más humedad en forma de precipitación para la cuenca del Río de la Plata que la propia *ET* local (Martinez y Dominguez, 2014).

En la Amazonía, los factores espaciales y temporales de la *ET* aún no son completamente entendidos y estas incertidumbres se reflejan en la forma en la que los modelos estiman la *ET* (Baker et al., 2021; Maeda et al., 2017; Sörensson y Ruscica, 2018). A pesar de las sustanciales contribuciones que las mediciones de flujo, como las del proyecto *Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in the Amazon* (LBA; Davidson y Artaxo, 2004), que enriquecen nuestro entendimiento sobre la estacionalidad y la dinámica de la *ET*, solo existen algunas torres de observación en la cuenca amazónica debido al alto costo de estas mediciones de flujo y a las dificultades de mantenimiento de las mismas. Además, las mediciones de las torres de flujo existentes no cubren toda la complejidad en términos de litología, topografía, vegetación y condiciones climáticas en la Amazonía. En este sentido, el uso de datos de *ET* estimados por teledetección se muestra como una gran oportunidad para ampliar nuestro conocimiento sobre la dinámica de estos procesos de *ET*, dada la cobertura de amplias escalas espaciales y temporales, además de ofrecer la posibilidad de estudiar lugares aún no monitoreados.

Los modelos de teledetección desarrollados para estimar *ET* se pueden dividir en dos enfoques principales basados en: i) balance de energía (SEB, por sigla en inglés), e ii) índices de vegetación. Un modelo de *ET* muy conocido, basado en balance de energía, es el *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), propuesto por Bastiaanssen (1995) con el objetivo de superar la mayoría de los problemas de los primeros modelos de este enfoque, que solamente se adecuaban para estimaciones

de *ET* a escala de torre de flujo. Con base en los principios y métodos adoptados en el SEBAL, Allen et al. (2007) propusieron el *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (METRIC), añadiendo un proceso de calibración interna con el objetivo de reducir los sesgos computacionales inherentes a los modelos de balance de energía que usan datos de teledetección (Allen et al., 2011, 2007). También se han propuesto otros modelos de balance de energía que utilizan datos de teledetección como el *Simplified Surface Energy Balance Index* (SEBI; Menenti y Choudhury, 1993), *Simplified Surface Energy Balance Index* (S-SEBI; Roerink et al., 2000), y *Surface Energy Balance System* (SEBS; Su et al., 2001).

Los modelos SEB, además, pueden dividirse en modelos de balance de energía de ‘una fuente’ o ‘dos fuentes’ (*Two Source Energy Balance* - TSEB). Los modelos de una fuente son los que no diferencian entre evaporación del suelo y transpiración de la vegetación y así la superficie se considera como una única capa (Tang et al., 2013; Zhang et al., 2016). En los modelos de dos fuentes, por otra parte, el sistema suelo-vegetación se aproxima a un modelo de dos capas, en el cual los flujos de energía se dividen en componentes del suelo y de la vegetación, como propone el TSEB (Kustas y Norman, 1999; Norman et al., 1995). Con base en el enfoque del TSEB, Anderson et al. (1997) desarrollaron el modelo *Atmosphere-Land Exchange Inverse* (ALEXI) con el objetivo de representar el cambio de energía entre la superficie y la atmósfera en una amplia gama de condiciones de cobertura de la tierra (Zhang et al., 2016).

Los modelos de teledetección que se basan en índices de vegetación generalmente se dividen en enfoques basados en las ecuaciones *Penman-Monteith* y *Priestley-Taylor*. Penman (1948) fue el primero en formular una ecuación para calcular la evaporación basándose en un enfoque físico usando un término de energía relacionado con la radiación y un término aerodinámico relacionado con el déficit de presión de vapor y la velocidad del viento (Shuttleworth, 2012). Sin embargo, esta ecuación era más adecuada para la representación de la evaporación de una superficie de agua abierta. Posteriormente, Monteith (1965) presentó una extensión de esta ecuación, añadiéndole el término resistencia superficial, y así la ecuación se volvió más consistente con la estimación de *ET* de superficies cubiertas por vegetación, resultando en la conocida ecuación *Penman-Monteith* (Monteith y Unsworth, 2013).

Considerando el enfoque *Penman-Monteith*, Mu et al. (2011, 2007) formularon

el algoritmo MOD16, con base en Cleugh et al. (2007), para calcular la *ET* por medio del uso integrado de datos meteorológicos globales de reanálisis y datos de teledetección del sensor MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Leuning et al. (2008) también propusieron un modelo de *ET* basado en esta ecuación, el *Penman-Monteith-Leuning* (PML), que incluye un modelo biofísico que calcula la conductancia de superficie utilizando el producto de índice de área foliar del MODIS.

También se propusieron otros enfoques para la estimación de *ET* con base en la ecuación de *Priestley-Taylor* (Priestley y Taylor, 1972). La ecuación de *Priestley-Taylor* tiene el objetivo de simplificar las parametrizaciones necesarias en la ecuación de *Penman-Monteith* para la estimación de las resistencias aerodinámica y de superficie. De esta forma, por medio del coeficiente de *Priestley-Taylor* ( $\alpha$ ), esa ecuación busca minimizar las incertidumbres relacionadas con esas parametrizaciones. Con base en el enfoque de *Priestley-Taylor*, Fisher et al. (2008) desarrollaron el modelo *Priestley-Taylor Jet Propulsion Laboratory* (PT-JPL), y Miralles et al. (2011) propusieron el *Global Land-Surface Evaporation Amsterdam* (GLEAM). Un resumen de los principales modelos basados en teledetección para estimar la *ET*, con aplicaciones en la cuenca amazónica, se muestra en la **Tabla 2**.

Los modelos de *ET* basados en teledetección han proporcionado una mayor profundidad en nuestro entendimiento de los procesos de *ET*, mejorando nuestra comprensión de los procesos hidrológicos desde escalas locales hasta grandes escalas espaciales y temporales. Con relación a los modelos de balance de energía, estos tienen como ventaja la estimación de *ET* en mayor resolución espacial, además de la posibilidad de estimar los impactos humanos en los ciclos de energía y agua y en las interacciones entre superficie y atmósfera. Sin embargo, por depender de datos termales de teledetección, generalmente estos modelos se limitan a condiciones de cielo claro o sin nubes, lo que es una gran desventaja, especialmente en áreas tropicales húmedas como la Amazonía. Además, los modelos SEB generalmente requieren la presencia de condiciones de *pixel* caliente y frío en la región de dominio de la imagen. Este requisito representa una desventaja, ya que la selección de estos píxeles puede generar resultados subjetivos, especialmente en regiones húmedas como la cuenca amazónica, donde dicha selección durante las estaciones lluviosa y seca se convierte en un desafío (Khand et al., 2017). En cuanto a los modelos basados en índices de vegetación, estos tienen como ventaja la estimación de *ET* en alta resolución temporal, permitiendo evaluaciones de largo plazo y en gran

**TABLA 2**  
Resumen de los principales modelos basados en teledetección para estimar la ET con aplicaciones en la Amazonía.

PRINCIPIOS FÍSICOS	MODELO Y RESOLUCIÓN ESPACIAL	PRINCIPALES DATOS DE ENTRADA (SATÉLITES Y AUXILIARES - AUX)	VENTAJAS	LIMITACIONES	EJEMPLOS DE APLICACIÓN
<b>Modelo Biofísico</b>	BESS Ryu et al. (2011)  1 a 5 km	<b>MODIS:</b> Datos atmosféricos (aerosol, vapor de agua, nube, perfil atmosférico) y propiedades de la superficie (temperatura de la superficie de la Tierra, cobertura de la Tierra, LAI, albedo).  <b>Aux:</b> Datos meteorológicos (Reanálisis) y datos de superficie (climas y vegetación globales).	1) Cobertura espacial global y disponibilidad de datos públicos; 2) Independiente de los datos de la torre de flujo; 3) Resolución espacial moderada para grandes áreas; 4) Datos atmosféricos múltiples y de la superficie terrestre usados como entrada; 5) Considera el cruzamiento entre flujos de carbono, agua y energía	1) Exige muchos datos (teledetección y meteorológicos); 2) El efecto de la humedad del suelo y la evaporación del agua de la lluvia interceptada por el dosel no están explícitamente incluidos en el modelo; 3) El terreno complejo y la heterogeneidad de la superficie terrestre no son considerados; 4) Incertidumbres en los conjuntos de datos de entrada y métodos de relleno de lagunas.	Swann e Koven (2017)
<b>Índice de Vegetación – Penman Monteith equation</b>	MOD16 Mu et al. (2011, 2007)  500 metros a 0.05°	<b>MODIS:</b> Fenología de la Vegetación (LAI, fPAR) y propiedades de la superficie (cobertura de la tierra, albedo).  <b>Aux:</b> Datos Meteorológicos (reanálisis).	1) Cobertura espacial global; 2) Datos disponibles públicamente; 3) Baja complejidad de implementación.	1) Parametrizaciones de conductancia de superficie; 2) Requiere datos medidos para calibración/parametrización del modelo; 3) Limitaciones en áreas con alta evaporación del suelo y del agua; 4) Moderado a alto requisito de entrada de datos meteorológicos.	Baker e Spracklen (2019); de Oliveira et al. (2017); Maeda et al. (2016); Paca et al. (2019); Swann e Koven (2017); Vergopolan e Fisher (2016); Xu et al. (2019)
	PML Leuning et al. (2008)  500 metros	<b>Aux:</b> Datos Meteorológicos (reanálisis).			Zhang et al. (2016)*
<b>Índice de Vegetación – Priestley-Taylor equation</b>	GLEAM Miralles et al. (2011)  0.25°	<b>AISR, CERES, MODIS:</b> humedad del suelo, datos atmosféricos (radiación, precipitación, temperatura del aire, frecuencia de los rayos) y propiedades de superficie (equivalente al agua de la nieve, humedad del suelo, fracción de cobertura vegetal, profundidad óptica de la vegetación).  <b>Aux:</b> Datos Meteorológicos (reanálisis).	1) Se puede implementar solo con datos de satélites; 2) Requisitos moderados de datos meteorológicos; 3) Cobertura espacial global y disponibilidad de datos públicos.	1) Simplificación de algunos procesos físicos; 2) Dependencia excesiva de la disponibilidad de agua; 3) Limitaciones en áreas con alta evaporación del suelo y del agua; 4) Baja resolución espacial.	Miralles et al. (2016)*; Baker et al. (2021); Baker e Spracklen (2019); Paca et al. (2020)
	PT-JPL Fisher et al. (2008)  1°	<b>AVHRR, MODIS:</b> Fenología de la Vegetación (NDVI, SAVI).  <b>Aux:</b> Meteorológico (reanálisis) y climatología de la superficie terrestre por satélite.	1) Cobertura espacial global y disponibilidad de datos públicos; 2) Se puede aplicar solo con datos de satélites; 3) Requisitos moderados de datos meteorológicos	1) Simplificación de algunos procesos físicos; 2) Muchas parametrizaciones ecofisiológicas; 3) Limitaciones en áreas con alta evaporación del suelo y del agua; 4) Baja resolución espacial.	Fisher et al. (2009); Miralles et al., (2016)*

<b>Balance de Energía</b>	ALEXI Anderson et al. (1997)	375 metros a 0.05°	<b>GOES, MODIS, VIIRS:</b> Termal (temperatura de la superficie terrestre) y datos Multiespectrales (reflectancia de la superficie).  <b>Aux:</b> Datos Meteorológicos (reanálisis) y de superficie (cobertura de la tierra).	1) La energía disponible se divide en componentes del suelo y de la vegetación; 2) Representación de procesos de superficie en áreas con alta disponibilidad de agua.	1) Alta complejidad de implementación; 2) Requiere condiciones de cielo claro; 3) Exige muchas variables meteorológicas.	Paca et al. (2019)
	METRIC Allen et al. (2007)	30 metros a 1 km	<b>MODIS, Landsat:</b> Termal (temperatura de la superficie terrestre) y datos Multiespectrales (reflectancia de la superficie).  <b>Aux:</b> Datos Meteorológicos (reanálisis) y de superficie (cobertura de la tierra).	1) Aplicaciones para escala regional en resolución espacial de moderada a alta; 2) Poca parametrización de superficie; 3) Util para evaluar los impactos de los cambios en la cobertura de la tierra; 4) Bajos requisitos de entrada de datos meteorológicos (SEBAL).	1) Requiere condiciones de cielo claro; 2) No hay distinción entre evaporación del suelo y transpiración del dosel; 3) Exige la presencia de condiciones extremas calientes y frías en el área de dominio; 4) Dependencia del área de dominio, con limitaciones para aplicaciones en gran escala;	Khand et al. (2017); Nóbrega et al. (2017); Numata et al. (2017)
	SEBAL (Bastiaanssen, 1995)	30 metros a 1 km	<b>AVHRR, MODIS, Landsat, ASTER:</b> Termal (temperatura de la superficie terrestre) y datos Multiespectrales (reflectancia de la superficie).  <b>Aux:</b> Datos Meteorológicos (reanálisis) y de superficie (cobertura de la tierra).	5) Mayor precisión en áreas con medidas de suelo disponibles (METRIC).	5) Moderado al alto requisito de entrada de datos meteorológicos (METRIC); 6) Mayor incertidumbre en áreas con escasez de datos (METRIC).	De Oliveira et al. (2019); Laipelt et al. (2020); Nóbrega et al. (2017)
	SEBS Su et al. (2001)	30 metros a 1 km	<b>MODIS, Landsat:</b> Termal (temperatura de la superficie terrestre) y datos Multiespectrales (reflectancia de la superficie).	1) Precisión relacionada con la temperatura de la superficie de la Tierra; 2) Baja demanda de datos meteorológicos.	1) Alto requisito para parametrización de la superficie; 2) Complejidad de implementación de moderada a alta.	Paca et al. (2019)
	SSEBop Senay et al. (2013)	30 metros a 1 km	<b>Aux:</b> Datos Meteorológicos (reanálisis) y de superficie (cobertura de la tierra)	1) Baja complejidad de implementación; 2) Cobertura espacial global y disponibilidad de datos públicos.	1) Balance de energía simplificado; 2) Mayor incertidumbre en áreas con escasez de datos.	Paca et al. (2019); Senay et al. (2020)*

escala. Sin embargo, algunas limitaciones de estos modelos incluyen incertidumbres en la parametrización de procesos físicos, una baja resolución espacial y también la utilización de datos globales, que muchas veces pueden no representar con precisión algunas dinámicas regionales (Maeda et al., 2017; Miralles et al., 2016). La propagación de errores derivados de forzantes meteorológicas, es una desventaja más de estos modelos, pudiendo introducir grandes incertidumbres en las estimaciones de *ET* (Gomis-Cebolla et al., 2019; Miralles et al., 2016; Panday et al., 2015; Talsma et al., 2018).

Los principales hallazgos de estos modelos de teledetección sobre *ET* en la Amazonía han mostrado que el patrón espacial de *ET* (Figura 4a), la estacionalidad

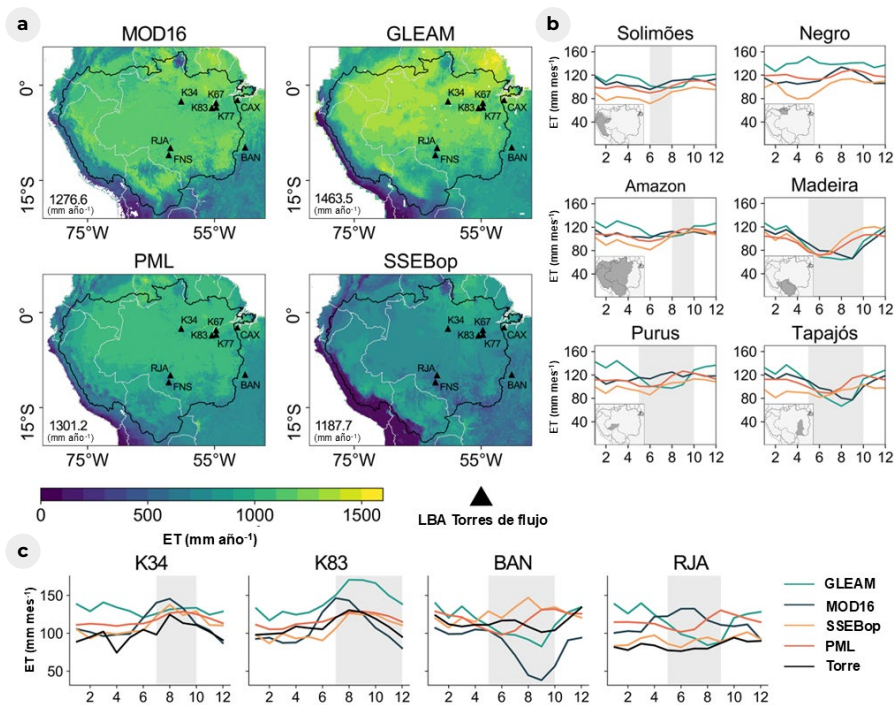


<sup>2</sup>Aplicaciones globales, incluyendo análisis en la cuenca amazónica

(Figura 4b) y los principales factores determinantes de la *ET* varían a lo largo de la cuenca (Baker et al., 2021; Maeda et al., 2017). Por ejemplo, los datos de modelos de teledetección (Figura 4) han mostrado que las tasas promedio mensuales de *ET* varían entre 80 mm mes<sup>-1</sup> en la región sur (incluyendo las cuencas de los ríos Madera y Tapajós) hasta 160 mm mes<sup>-1</sup> en la parte norte de la cuenca (cuenca del río Negro). Sin embargo, la mayoría de los modelos, como el MOD16, generalmente muestran un aumento de la *ET* a medida que la estación seca avanza en la región nordeste y central amazónica, donde predominan las áreas húmedas ecuatoriales. En estas regiones, la estacionalidad de la *ET* es impulsada principalmente por la radiación incidente y por el LAI (Maeda et al., 2017). A pesar de que este patrón sea mostrado por las mediciones de torres de flujo (Christoffersen et al., 2014), no todos los modelos consiguen capturarlo (Figura 4c). Por ejemplo, mientras en la estacionalidad del MOD16 la *ET* es consistente con las mediciones de flujo (en K34 y K83), mostrando tasas más altas durante la estación seca, la estacionalidad del modelo GLEAM (en K34) muestra mayores valores durante la estación lluviosa y menores durante la estación seca. Esta dinámica que presenta el GLEAM en regiones húmedas en la Amazonía puede explicarse debido a la dependencia de este modelo con relación a los datos de humedad y precipitación, lo que afecta su desempeño en regiones donde la *ET* no está limitada por la disponibilidad de agua (Miralles et al., 2016).

En regiones más al sur y sudeste de la cuenca amazónica (en las cuencas del río Madera y río Tapajós), la mayoría de los modelos basados en teledetección indican de forma consistente una disminución de las tasas de *ET* durante la estación seca, acompañando la reducción de la disponibilidad de agua (Maeda et al., 2017; H. J. F. da Silva et al., 2019). Sin embargo, cuando las estimaciones de los modelos basados en teledetección se comparan con las mediciones de flujo (en una escala local) o con estimaciones de balance hídrico (en gran escala), la representación de la estacionalidad de la *ET* aún es incierta, una vez que la mayoría de los modelos es incapaz de reproducir consistentemente los ciclos estacionales en áreas tropicales, considerando los múltiples factores que operan simultáneamente en toda la Amazonía.

Estudios que usan mediciones de flujo han demostrado a escalas locales que los cambios en el uso y la cobertura de la tierra impactan los flujos de agua y energía. Por ejemplo, se han observado tasas de *ET* significativamente menores en áreas de pastaje, agrícolas y en áreas deforestadas que en bosques primarios y secundarios



**Figura 4:** Patrones espaciales y temporales de *ET* en la cuenca amazónica se representan de forma diferente por los modelos que utilizan teledetección. (a) Variabilidad espacial del promedio anual de la *ET* (2003-2017) para los modelos GLEAM, SSEBop, MOD16 y PML; los números en el ángulo inferior izquierdo de cada ploteo representan el promedio anual de *ET*. (b) Estacionalidad de la *ET* para las principales subcuencas amazónicas. (c) Comparación del promedio mensual entre estimaciones y mediciones de flujo del proyecto LBA, usando datos de Saleska et al. (2013). La estación seca está destacada en gris como tasas mensuales de precipitación menores que 100 mm mes<sup>-1</sup>.

(von Randow et al., 2004, 2020). Estos resultados indican que menos agua retorna a la atmósfera, afectando así el reciclaje de la precipitación y contribuyendo con cambios en las estaciones seca y lluviosa (Costa y Pires, 2010; Panday et al., 2015). De acuerdo con las mediciones de flujo, los análisis en gran escala utilizando modelos de teledetección reforzaron estos descubrimientos (Baker y Spracklen, 2019; de Oliveira et al., 2019; Khand et al., 2017; Laipelt et al., 2020). Por ejemplo, estudios que usaron modelos de teledetección han demostrado que eventos de sequía tienden a afectar los sistemas antropogénicos como pastaje y áreas agrícolas más que bosques primarios y secundarios, llevando a un aumento de la temperatura del aire y a una disminución del LAI y de la *ET* (Baker y Spracklen, 2019; de Oliveira et al., 2019).

Los modelos de teledetección también han ayudado a mejorar la comprensión de la

distribución de la energía disponible en diversas regiones del bioma amazónico (de Oliveira et al., 2019; Laipelt et al., 2020). Las estimaciones de *ET* de alta resolución usando SEBAL al sudoeste de la Amazonía, por ejemplo, muestran diferencias significativas entre flujos de energía y de agua en áreas forestales y no forestales, tales como pastaje y áreas agrícolas. En esas áreas antropogénicas, los flujos de calor en el suelo y el flujo de calor sensible fueron de dos a cuatro veces mayores que en áreas forestales (de Oliveira et al., 2019). En una región de transición entre los biomas Amazonía y Cerrado, donde también se presentan áreas de deforestación, fue posible mostrar diferencias significativas de áreas forestales en la distribución de los flujos de energía. Mayores tasas de flujo de calor latente (parte de la energía disponible que se utiliza en el proceso de *ET*) fueron observadas en áreas forestales, mientras en áreas deforestadas se observó un aumento en el flujo del calor sensible (parte de la energía disponible que se utiliza para calentar la atmósfera) (Laipelt et al., 2020).

Fisher et al. (2017) resumieron en diez preguntas científicas las principales lagunas de conocimiento para la ciencia basada en *ET*. El estudio señala que, para responder a estas preguntas, las estimaciones de *ET* deben ser mejoradas, buscando disminuir las incertidumbres y abarcar una mayor escala espacial y temporal, para alcanzar estimaciones de largo período. Con relación a las incertidumbres, estudios recientes han demostrado que los modelos basados en teledetección pueden estimar *ET* con razonable precisión y coincidir entre ellos (Gomis-Cebolla et al., 2019; Martens et al., 2017; Michel et al., 2016; Zhang et al., 2019). Sin embargo, los componentes individuales de la *ET* (evaporación del suelo, transpiración de la vegetación y evaporación del agua interceptada por el dosel de la vegetación) divergen considerablemente (Miralles et al., 2016; Talsma et al., 2018). Por ejemplo, Miralles et al. (2016) mostraron que, en bosques tropicales, la evaporación del suelo es casi inexistente en los modelos GLEAM y PT-JPL, mientras para el MOD16, este componente puede exceder la transpiración en la región de los trópicos. En la Amazonía, la interceptación del dosel del PT-JPL y MOD16 es casi dos veces mayor que con el modelo GLEAM. Además de las incertidumbres relacionadas a la transpiración del dosel y a la evaporación del suelo, la evaporación de agua abierta y la *ET* en áreas húmedas amazónicas también son una gran laguna de conocimiento.

La *ET* en áreas húmedas puede ser un proceso complejo, puesto que abarca flujos en diferentes condiciones de vegetación con relación a la transpiración, evaporación de agua interceptada en el dosel y agua superficial. Cambios en los patrones de calor latente sobre los cuerpos de agua (ríos, áreas húmedas, lagos y reservorios artificiales)

afectan los patrones de circulación climática local a partir de un efecto de brisa (Silva Días et al., 2004), y tienen potencial para afectar el clima regional por la posibilidad de supresión de la precipitación sobre las áreas húmedas y la iniciación de convección sobre las fronteras de las áreas húmedas (Taylor et al., 2018). Además, las diferencias de *ET* en áreas húmedas y montañosas aún son poco comprendidas en la Amazonía y solamente algunas mediciones *in situ* podrían ser usadas para validar los modelos de teledetección, que se encuentran disponibles en ambientes inundables (Borma et al., 2009). Mejoras en la precisión de las estimaciones de componentes de la *ET* nos permiten comprender mejor sus procesos y cómo estos se ven afectados por cambios en la temperatura, la concentración de gases de efecto invernadero y en el ciclo hidrológico (Fisher et al., 2017; Talsma et al., 2018).

Otro desafío para la estimación de *ET* basada en teledetección es la minimización del uso de parametrizaciones y el mejoramiento de la precisión de los datos de entrada. Mientras que el desempeño de los modelos *Penman-Monteith* puede ser influenciado por parametrizaciones de conductancia de superficie, las estimaciones de los modelos *Priestley-Taylor* dependen del coeficiente  $\alpha$ . Como los modelos de *ET* dependen de datos meteorológicos de entrada, los errores asociados a estos datos también pueden contribuir para aumentar las incertidumbres en las estimaciones de *ET* (Ershadi et al., 2015; Gomis-Cebolla et al., 2019). Además, las mediciones de flujo aún son una limitación significativa en la mejora de las estimaciones de *ET*. En el bioma Amazonía, existen solo ocho torres de medición de flujo con datos públicos disponibles (proyecto LBA; Saleska et al., 2013) y no cubren toda la complejidad climática y de vegetación de la cuenca amazónica. Además, para los modelos de balance de energía el principal desafío, especialmente en la Amazonía, es la exigencia de condiciones de cielo claro. Los esfuerzos recientes para integrar datos de microondas a estos modelos son prometedores (Holmes et al., 2018), ya que la banda de microondas se ve menos afectada por la cobertura nubosa que la banda del infrarrojo térmico.

Actualmente, la teledetección se basa en una gama de sensores y satélites que proporcionan imágenes en la banda del infrarrojo térmico y observaciones meteorológicas y de superficie, esenciales para la estimación de la *ET*. La misión ECOSTRESS (*Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station*), lanzada por la Agencia Espacial de Estados Unidos (NASA) en 2018, proporcionará información sobre la eficiencia en el uso del agua por las plantas y sobre cómo la vegetación responderá al estrés hídrico. Su enfoque principal será la

medición de la temperatura de la vegetación, lo que permitirá comprender mejor la dinámica y los procesos de la *ET* con alta resolución temporal y espacial (Fisher et al., 2017; Sheffield et al., 2018).

Otras misiones mejorarán las estimaciones de *ET* y proporcionarán información clave para validar los modelos actuales. Por ejemplo, el satélite de órbita polar JPSS (*Joint Polar Satellite System*), operado por la NOAA y la NASA, está equipado con una variedad de sensores, como el *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS), que captura imágenes en los espectros visible e infrarrojo. Estas imágenes proporcionan información global valiosa para el monitoreo de la vegetación y sirven como datos de entrada para la estimación de variables hidrológicas (McCabe et al., 2017; Sheffield et al., 2018; Zhou et al., 2016). La misión *Water Cycle Observation Mission* (WCOM), de China, busca adquirir mediciones consistentes de los componentes del ciclo del agua (Levizzani y Cattani, 2019; Shi et al., 2016). La misión *FLourescence Explorer* (FLEX), de la Agencia Espacial Europea, mapeará la fluorescencia de la vegetación, proporcionando información sobre la actividad fotosintética, así como el estrés y la salud de las plantas, además de contribuir a mejorar la comprensión de los factores que limitan la transpiración (Drusch et al., 2017; McCabe et al., 2017). La continuidad de la misión Landsat va a permitir estimaciones de *ET* en alta resolución espacial y de largo plazo (>30 años) (McCorkel et al., 2018), y la misión *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE Follow-On) traerá una significativa oportunidad para estimar la *ET* por medio del enfoque de balance hídrico (Landerer et al., 2020).

La teledetección ha sido crucial para mejorar nuestra comprensión de las interacciones superficie-atmósfera por medio de la *ET*, a pesar de los desafíos que aún persisten. Las futuras misiones espaciales representan una excelente oportunidad para abordar aspectos científicos clave derivados de la investigación basada en la *ET*. Esto nos permitirá perfeccionar técnicas y enfoques, así como aumentar nuestro conocimiento sobre los procesos de *ET* y cómo el impacto de las actividades humanas puede afectar el ciclo del agua a nivel global, incluyendo la cuenca amazónica.



04  
**Nivel**  
*del agua*

Adrien Paris  
Stéphane Calmant  
Fabrice Papa  
Alice Fassoni-Andrade  
Rodrigo Paiva  
Frédéric Frappart

Las aguas superficiales son recursos clave para todas las comunidades que viven a lo largo del río Amazonas. Sin embargo, el monitoreo del nivel del agua (NA) y del caudal en los ríos de la cuenca amazónica es todavía un desafío. Mientras el ciclo hidrológico de la cuenca viene siendo presionado por las actividades humanas, el monitoreo *in situ* ha disminuido globalmente en las últimas décadas (Vörösmarty et al., 2000). Estas condiciones amenazan nuestra capacidad de comprender los impactos de los cambios ambientales y climáticos en los ríos amazónicos. Aunque hasta la fecha presente, ninguna misión de satélite haya sido lanzada específicamente para monitorear las aguas continentales, las observaciones del NA provenientes de radares altimétricos a bordo de los satélites lanzados en las últimas décadas han demostrado ser adecuadas y complementarias a las series históricas de mediciones *in situ* (Fekete et al., 2012), lo que aprimora el monitoreo de los ríos amazónicos (Calmant y Seyler, 2006; Silva et al., 2014).

En este contexto, la cuenca amazónica se ha vuelto un laboratorio ideal para estudios pioneros que demostraron la capacidad de estimar informaciones precisas de NA en lugares específicos (cruce entre los cursos de agua y las trayectorias proyectadas en tierra de los satélites) gracias a tratamientos específicos de ecos de radar. Los primeros estudios sobre NA en la Amazonía utilizaron observaciones de la misión Seasat (Sea Satellite de la NASA), lanzado en 1978, para estimar la pendiente de la línea de agua y su variación temporal en el curso principal del río Amazonas (Guzkowska et al., 1990).

La configuración de la órbita de los satélites con radares altimétricos define finalmente las intersecciones entre las trayectorias del satélite en la Tierra y el río, las llamadas estaciones virtuales (VSs, por sigla en inglés), en las que se puede estimar el NA. En determinada VS, el NA se estima por medio de la inversión del tiempo de propagación de la señal de ida y vuelta, lo que proporciona la distancia entre el sensor y el cuerpo observado. Varias correcciones de incertidumbres deben aplicarse para estimar el NA debido, por ejemplo, al retraso en la propagación causado por la atmósfera y la dinámica de la superficie terrestre. Stammer y Cazenave (2017) presentaron una extensa discusión sobre la estimación del NA a partir de altimetría por satélite y de los errores asociados. Desde los primeros satélites, la precisión de la órbita, que depende de la densidad de la atmósfera y de la resolución del campo gravitacional, ha mejorado y en la actualidad se encuentra en cerca de un centímetro (comparado con los 60 centímetros del Seasat). Sin embargo, el cálculo correcto del rango continúa siendo un desafío, pues es necesario rastrear (a bordo) o rastrear

nuevamente (en el suelo) la forma de onda altimétrica (Frappart et al., 2006; Zhang et al., 2010) utilizando algoritmos que se ajusten mejor a la distribución altamente variable de la energía recibida por el radar, la cual varía considerablemente según los diferentes tipos de superficies en el campo de visión del satélite (Calmant et al., 2016).

Desde los primeros estudios con datos de la misión Seasat, tenemos ya en la actualidad más de 30 años de monitoreo de aguas continentales usando altimetría por satélite. Luego del Seasat, surgió la misión *GEodetic and Oceanographic SATellite* (GEOSAT), que fue usado por Koblinsky et al. (1993) para estimar series temporales de NA sobre la Amazonía con niveles de incertidumbre que varían de 0,19 a 1,09 m con relación a los datos *in situ*. El Satélite Europeo de Sensoramiento Remoto (ERS-1, por sus siglas en inglés; lanzado en 1991) inició una larga familia de satélites que siguieron la misma órbita de repetición de 35 días (ERS-1, ERS-2, ENVISAT -Satélite Ambiental y SARAL -Satélite con ARGOS y ALtika), cubriendo el período de 1991 a 2016. Asimismo, un gran avance fue conquistado con el proyecto *Observations des Surfaces Continentales par Altimetrie Radar* (OSCAR), que sirvió para evaluar el método de rastreo mediante ecos de radar específico para casquetes glaciares denominado ICE-2 (Legresy et al., 2005) - un nuevo procesamiento (*retracking*) basado en el ajuste de las formas de la onda del radar, como el borde del frente (*leading edge*) y de la pendiente del borde de fuga (*trailing edge slope*), a una función denominada Brown - para ERS-1, ERS-2 y ENVISAT, y que fue documentado en los Registros de Datos Geofísicos (archivo de datos que contienen las medidas del altímetro a lo largo de la banda espectral y las correcciones que son necesarias para aplicar a dicha banda con el fin de estimar el NA).

Años más tarde un nuevo procesamiento de los ecos de radar fue analizado por Frappart et al. (2016, 2006) y J. S. Da Silva et al. (2010) para más de 70 VSs de las misiones ERS-2 y ENVISAT para ríos con una amplia variedad de anchuras (de decenas de metros a kilómetros). Estos autores señalaron que la selección adecuada de los datos considerados representativos del cuerpo hídrico es tan importante como la selección del algoritmo de procesamiento (*retracking*). Complementariamente, los datos de la órbita de repetición de 10 días del Topex/Poseidon (T/P) y Jason-2/3 también fueron analizados en la cuenca amazónica en posteriores estudios. Seyler et al. (2013) destacaron las ventajas de la misión Jason-2 (variando de 2008 a 2016 en su órbita nominal) en comparación a T/P (de fines de 1992 a 2005), con una incertidumbre de 0,35 m aproximadamente, posiblemente debido a la mejor capacidad del sensor de discriminar la llanura de inundación adyacente al río.

Todas esas misiones operan en modo de baja resolución, es decir, la cobertura de la tierra es grande (algunos kilómetros, dependiendo de la banda de operación del radar) y los ecos que retornan a la antena sufren la influencia del ambiente. El modo SAR, activo en los satélites Sentinel-3, permite una reducción de los ruidos en su entorno, seccionando el área circular iluminada por el eco de radar en un momento determinado (Raney, 1998). Esta reducción proporciona una resolución espacial mucho mejor a lo largo del trazo (*track*), sin embargo, no resuelve algunos aspectos como las medidas de inclinación transversal (Bercher et al., 2013). La adición de una segunda antena, como en el Cryosat-2, permite que el modo Interferométrico SAR corrija esas mediciones transversales, permitiendo así una mejoría en la precisión de las series temporales de NA. No obstante, el uso del Cryosat-2 no es común para el monitoreo del NA de los ríos, ya que su órbita se desplaza a aproximadamente 30 km hacia el oeste cada 28,9 días, 7 km al este cada 89 días y retorna al mismo lugar cada 369 días. De hecho, la mayoría de los estudios sobre el uso de altimetría por satélite en la cuenca amazónica se han centrado en órbitas repetitivas, aunque algunos estudios han explorado el uso de misiones a la deriva o con repetitividad larga encontrando buena precisión para el monitoreo del NA (por ejemplo, Bogning et al., 2018). Hasta el día de hoy, las principales aplicaciones de misiones a la deriva o con repetitividad larga consisten en restringir variables o calibrar modelos hidrodinámicos, pero ningún estudio se ha enfocado aún en la cuenca amazónica. Estas misiones, en vez de proporcionar una observación del NA en una base de 10 días o casi mensualmente, con una gran distancia entre trazos en Ecuador (entre 60 km y 100 km), proporcionan una distribución espacial mucho más densa, pero con observaciones menos frecuentes. Alternativamente, el uso de datos de altimetría por láser de la misión ICESat (*Ice, Cloud, and land Elevation Satellite*) ha sido investigado por Hall et al. (2012), quienes concluyeron que esta misión puede ser una valiosa fuente de datos para el monitoreo de ríos de la Amazonía, con precisiones de algunas decenas de centímetros en comparación con los datos *in situ*. La misión ICESat obtuvo continuidad con el ICESat-2, lanzado en 2018. Estudios realizados por Bercher et al. (2013) y Jiang et al. (2017) concluyeron que la misión SAR CryoSat-2 ofrece nuevas oportunidades para monitorear los ríos angostos en la cuenca amazónica, lo que debería contribuir a la integración de las misiones de altimetría actuales y futuras.

Adicionalmente, la técnica de interferometría diferencial con datos SAR permite obtener informaciones sobre cambios en los desplazamientos de superficie, tales como cambios topográficos. Algunos estudios obtuvieron mediciones a escala

**TABLA 3**  
Conjuntos de datos de series temporales del nivel del agua superficial sobre los cuerpos hídricos.

NOMBRE...	FUENTE	ENLACE WEB	REFERENCIA	OBJETIVO	TIEMPO DE DISPONIBILIDAD <sup>3</sup>
<b>G-REALM</b>	USDA NASA	<a href="https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/Default.aspx#SatelliteRadarAltimetry">https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/Default.aspx#SatelliteRadarAltimetry</a>	Birkett et al. (2017)	Lagos y reservorios	NTC
<b>River &amp; Lake</b>	Universidad de Montfort	<a href="http://altimetry.esa.int/riverlake/shared/main.html">http://altimetry.esa.int/riverlake/shared/main.html</a>	Berry et al. (2005)	Ríos, lagos y reservorios	SCT (descontinuado)
<b>Base de datos DAHITI</b>	German Geodetic Research Institute	<a href="https://dahiti.dgfi.tum.de/en/">https://dahiti.dgfi.tum.de/en/</a>	Schwatke et al. (2015)	Ríos, lagos, reservorios y áreas húmedas	NTC y reanálisis
<b>Producto GRRATS</b>	Universidad Estadual de Ohio	<a href="https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/PRESWOT_HYDRO_GRRATS_L2_VIRTUAL_STATION_HEIGHTS_V2">https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/PRESWOT_HYDRO_GRRATS_L2_VIRTUAL_STATION_HEIGHTS_V2</a>	Coss et al. (2020)	Ríos	Solamente reanálisis
<b>Hidosat</b>	ORE-HYBAM e ANA	<a href="http://hidosat.ana.gov.br/">http://hidosat.ana.gov.br/</a>	Carvalho et al. (2015)	Ríos	NTC
<b>Hydroweb</b>	IRD/LEGOS, CNES (Agencia Espacial Francesa) y Universidad del Estado de Amazonas	<a href="http://hydroweb.theia-land.fr/">http://hydroweb.theia-land.fr/</a>	Crétau et al. (2011); J. S. Da Silva et al. (2010)	Ríos, lagos y reservorios	SCT y reanálisis

STC: *Slow-Time Critical* - se entrega a lo sumo después de tres días; NTC: *Non-Time Critical* - normalmente se entrega en un mes.

de centímetros de los cambios del NA en toda el área anegada en la llanura de inundación usando SAR interferométrico por primera vez sobre las llanuras de inundación de la Amazonía (Aldorf et al., 2001a, 2001b, 2000). Esta estimación

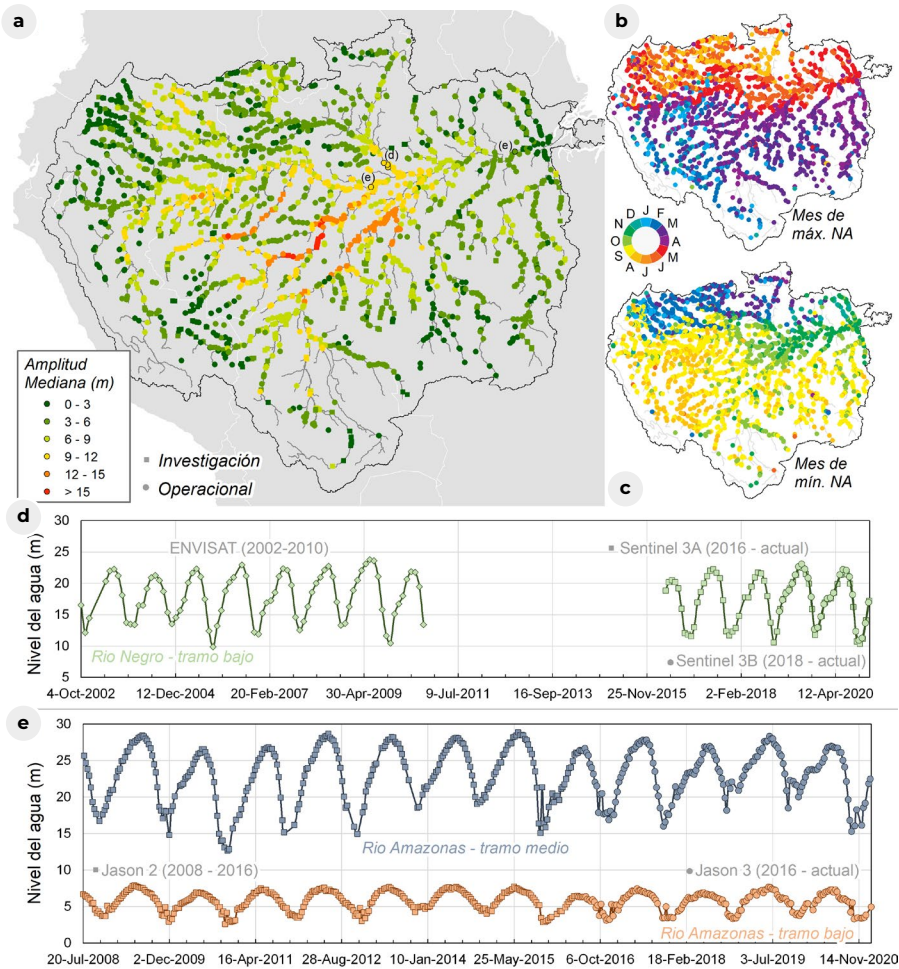
<sup>3</sup>Tiempo que demora para que el dato esté a disposición en las páginas web.

ha sido posible debido a las interacciones del pulso de radar con la superficie del agua y los troncos de la vegetación inundada, creando un camino de doble rebote (double-bounce path) (Alsdorf et al., 2000; Hess et al., 1995). Lee et al. (2020) y Mohammadmanesh et al.(2018) revisaron los métodos y las limitaciones de la técnica para aplicaciones en áreas húmedas.

Hasta el momento, las informaciones sobre el NA están disponibles tanto como datos brutos como datos ya procesados, siendo que algunos grupos de investigación o instituciones suministran las series temporales ya procesadas (ver **Tabla 3**). Cada conjunto de datos proporciona los valores del NA en cuerpos de agua seleccionados en todo el mundo o en regiones específicas y tienen objetivos diferentes en términos de operatividad. Los procedimientos de procesamiento y filtrado varían entre cada grupo, y las series temporales de las mismas estaciones virtuales pueden variar de un grupo a otro.

La **Figura 5** muestra la localización de todas las estaciones virtuales en la cuenca amazónica disponibles en la base de datos *Hydroweb*. La **Figura 5a** es una representación de la amplitud mediana del NA en cada estación virtual. La amplitud del NA medida por los satélites es menor en las cabeceras (0-3 m) y en ríos de mediano porte (3-6 m) con relación al tramo principal del río Solimões-Amazonas y sus afluentes (9-12 m). Los mayores valores se encuentran para el río Purus (>15 m), afluente de la margen derecha. La **Figura 5b** y **c** muestran, respectivamente, el mes en el que ocurren típicamente los niveles altos y bajos, indicando la influencia del régimen de precipitaciones en las partes norte y sur de la cuenca y el desplazamiento gradual debido al tiempo de propagación de las crecidas en los ríos y llanuras de inundación (~1-3 meses). Las **Figuras 5d** y **5e** proporcionan series temporales del NA de múltiples misiones, que varían desde el 2002 hasta el presente con ENVISAT y Sentinel 3-B, y de 2008 a 2020 con Jason-2 y Jason-3, respectivamente. Estas figuras muestran la fuerte señal estacional de la crecida gradual de los ríos amazónicos y la variabilidad interanual de los niveles máximo y mínimo.

Debido a su cobertura espacial relativamente densa (ver **Figura 5**), la altimetría por satélite ha sido utilizada para derivar los perfiles altimétricos de los ríos en toda la cuenca. Estos perfiles, fueron calculados para aguas bajas y altas del río Negro a partir de VSs T/P (Frappart et al., 2005) y VSs ENVISAT (Leon et al., 2006), e indicaron una pendiente menor para el río Negro a lo largo de más de 500 km (de su desembocadura hacia el curso del río aguas arriba) que para el río Solimões



**Figura 5:** a) Localización de las estaciones virtuales disponibles gratuitamente en el portal Theia-hydroweb (<http://hydroweb.theia-land.fr/>) y amplitud promedio de la serie temporal. Los puntos se refieren a las VSs operativas (misiones actuales en operación y actualizadas en tiempo casi real) y los cuadrados representan las VSs de investigación (identificados como reanálisis en la tabla 3). Las VSs están destacadas por círculos negros en (d) y (e); b) mes de máximo NA para el promedio de la serie temporal mensual en cada VS; c) mes de mínimo NA para el promedio de la serie temporal mensual; d) series temporales compuestas de las VSs cercanas unas de otras en el tramo bajo del río Negro, VSs NEGRO\_KM1444, NEGRO\_KM1420 y NEGRO\_KM1404, e) series temporales en los tramos medio y bajo del Amazonas compuestas por la observación de Jason-2 y Jason-3 en la VS AMAZONAS\_KM1534 y AMAZONAS\_KM0397, respectivamente.

(confirmado por Callède et al., 2013). Esta diferencia explica el fuerte efecto de remanso que ocurre en la sección inferior del río Negro lo que altera la época de pico y de escorrentías bajas. Otros efectos de remanso, principalmente en el tramo

principal del río Amazonas y sus tributarios, quedan en evidencia en los perfiles del río a partir de la altimetría por satélite. Las observaciones de altimetría satelital, aunque escasas en el tiempo, ahora ofrecen una red lo suficientemente densa como para monitorear eventos extremos, como las sequías ocurridas en 2005 y 2010 en la Amazonía (Frappart et al., 2012; Silva et al., 2012).

Una aplicación directa de esos perfiles es la obtención de las variaciones espacio-temporales de la pendiente de la superficie del agua. Mientras los estudios anteriores se enfocaron en las variaciones espaciales del gradiente de la superficie del agua, una primera tentativa de estimar las variaciones temporales de la pendiente del tramo principal del Amazonas fue realizada por Birkett et al. (2002) usando VSs de la misión T/P. Estos han revelado cambios en la señal de la tasa de variación de la pendiente que fueron explicadas por el hecho de que el río no alcanzase un estado de equilibrio. Aunque las pendientes estimadas por Birkett et al. (2002) se hayan comparado bien con la pendiente derivada del Modelo Digital de Elevación (MDE) de la misión *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) - con un aforo instantáneo de perfiles y pendientes en febrero de 2000 (LeFavour y Alsdorf, 2005) - y con datos de instrumentos in situ (Calmant et al., 2013), estos quiebres en la tasa de variación de pendiente no fueron encontrados en perfiles extraídos de bases de datos altimétricos más recientes y completos (Calmant et al., 2016). Por ejemplo, Paris et al. (2016) estimaron dos series temporales diferentes de declividades a partir de la altimetría por satélite en el tramo bajo del río Negro: la primera fue calculada usando una interpolación diaria de las series temporales del NA aguas arriba y aguas abajo, proporcionando una serie temporal de declividades diarias, y la segunda fue calculada usando la climatología promedio de las VSs aguas arriba y aguas abajo. Aunque la curva de calibración (relación entre el NA y la caudal del río) haya mejorado si se considera la variación de la pendiente con el tiempo, utilizando ambos métodos, el promedio mensual ha sido la que proporcionó el mejor resultado, ilustrando la dificultad de inferir pendientes a partir de observaciones inciertas no obtenidas diariamente.

Al acoplar la altimetría por satélite y un modelo hidrológico e hidráulico por medio de curvas de calibración, Paris et al. (2016) estimaron mapas de la profundidad del río a lo largo de la cuenca amazónica usando datos de las misiones ENVISAT y Jason-2. Estos mapas fueron posteriormente utilizados por Garambois et al. (2017) en un tramo del río Xingú para parametrizar un modelo hidráulico. En los casos en que la trayectoria terrestre del satélite cruza varias veces el mismo curso del río,

es posible realizar un análisis más ajustado del NA. Esto ocurre en ríos sinuosos que fluyen de norte a sur (o al contrario) como el río Xingú, un tributario de la margen derecha del río Amazonas (**Figura 2**). Dadas estas condiciones, los autores verificaron que la presencia de un obstáculo en el lecho del río produce alteraciones temporales en el NA a partir de la altimetría orbital. Brêda et al. (2019) propusieron un nuevo método de asimilación de datos altimétricos, que va desde la inserción directa hasta un filtro Kalman de base hidráulica, para mejorar las estimaciones de la batimetría del río Madera. Concluyeron que la altimetría por satélite puede ser usada para restringir mejor las estimaciones del NA e inundación. Un análisis del NA de la misión ENVISAT reveló el paso de agua del río Negro para el río Solimões a través de sus llanuras de inundación interconectadas durante los períodos de crecida (Silva et al., 2012).

La capacidad de observar la conectividad entre canal y llanura de inundación por medio de altimetría fue investigada por Park (2020). Al observar cambios estacionales en el NA de ríos y en las llanuras de inundación adyacentes, separando el papel de los flujos en el canal y la escorrentía difusa sobre las márgenes (*overbank flow*), que contribuyen con el almacenamiento del agua de superficie y suavizan la topografía inducida por la canalización. La llanura de inundación localizada entre los ríos Madre-de-Dios, Beni, Guaporé y Mamoré, en la cuenca del alto río Madera, fue caracterizada usando datos ENVISAT y SARAL (Ovando et al., 2018). Las diferencias del nivel del agua entre las regiones frecuentemente inundadas, sin conexión directa con los Andes, y las regiones sujetas a eventos esporádicos, aunque con grandes crecidas, fueron destacadas. Recientemente, Fleischmann et al. (2020) produjeron series temporales del NA en las complejas áreas húmedas interfluviales del río Negro a partir de los datos del Sentinel3-A. Por primera vez se reportaron variaciones del nivel del agua inferiores a 1 m en esas áreas complejas. Sus resultados muestran que la altimetría por satélite puede ayudar a entender el comportamiento hidráulico de áreas complejas poco exploradas y contribuir a la validación de modelos hidrológicos e hidráulicos.

Alsdorf et al. (2000, 2005, 2007) aplicaron por primera vez el método SAR interferométrico (InSAR, por sigla en inglés) en las llanuras de inundación de la Amazonía central y mostraron que en estas áreas, los flujos de agua son dinámicos en el espacio y el tiempo, cambiando de dirección a lo largo del pulso de inundación anual. Antes de la crecida, las escorrentías son controladas por la topografía local y el NA en la llanura de inundación no es equivalente al nivel del río (Alsdorf et al., 2007).

Al asumir que la superficie del agua en la llanura de inundación es equivalente a la del canal principal, las estimaciones de almacenamiento de agua derivadas de la propagación de crecidas pueden ser sobreestimadas, como demostró Alsdorf (2003). H. C. Jung et al. (2010) compararon los cambios temporales en las aguas de las llanuras de inundación en las cuencas de la Amazonía y del Congo. Mientras el río Amazonas está conectado por muchos canales a las llanuras de inundación y tiene patrones de flujo complejos, los ríos del Congo (y especialmente el *Cuvette Centrale*) tienen conexiones dispersas con áreas interfluviales y patrones de flujo que no están bien definidos y con fronteras difusas. Los patrones de variaciones de la superficie del agua en las llanuras de inundación localizadas en los ríos Tapajós y Solimões fueron analizados por Wang et al. (2011) y Cao et al. (2018), respectivamente. Asimismo, las misiones SAR más recientes permitieron el monitoreo de cuerpos de agua menores.

La altimetría por satélite puede usarse para derivar variables hidrológicas, usualmente no medidas, por medio de la evaluación directa o por la combinación con otros productos de teledetección. Pfeffer et al. (2014) consiguieron inferir los diferentes cambios entre las aguas superficiales y subterráneas a partir de 491 VSs ENVISAT localizados en toda la cuenca amazónica. Las estimaciones de desviaciones del nivel de base de las aguas subterráneas alcanzaron hasta 5 m. Frappart et al. (2012) combinaron los datos de altimetría por satélite y de extensión de inundación para generar variaciones del almacenamiento de aguas continentales superficiales (ver capítulo 8). Estas dos variables fueron usadas por Frappart et al. (2019) para estimar la variabilidad espacio-temporal del almacenamiento de agua subterránea en la cuenca amazónica. Campos et al. (2001) y Silva et al. (2019) encontraron marcas de eventos climáticos globales como ENSO y variaciones de la temperatura de la superficie del mar en las series temporales del NA de las misiones T/P y Jason-2, respectivamente. Como las estimaciones del NA actualmente se entregan en tiempo casi real, las curvas de calibración que relacionan el NA con la escurrentía han sido el foco de varios estudios (ver detalles en el capítulo 10). Estas curvas de calibración fueron calculadas usando altímetros locales (Zakharova et al., 2006) o resultados de modelos (Getirana et al., 2012; Leon et al., 2006). Al limitar los parámetros de la curva de calibración a límites realistas del coeficiente de rugosidad de Manning, Paris et al. (2016) mostraron que las escurrentías previstas por la altimetría por satélite son comparables a las medidas *in situ*. La serie temporal original del NA o su conversión en escurrentía ofrece una herramienta independiente para validar modelos hidrológicos (Paris et al., 2016) y sus datos de entrada de lluvia (Silva et al., 2014).

Más recientemente, con su tecnología innovadora basada en *swath altimetry* (altimetría de bandas anchas, en libre traducción del inglés), cobertura casi global y observación conjunta del NA, ancho y pendiente de la línea del agua, la misión SWOT, lanzada en diciembre del 2022, permitirá una observación sin precedentes del NA en toda la red fluvial y en los principales lagos y llanuras de inundación. Como ha sido destacado por Biancamaria et al. (2016), la observación del NA usando SWOT permitirá un mejor monitoreo de aguas transfronterizas y de llanuras de inundación en la Amazonía. Dedicada a hacer muestreo de todos los ríos con ancho superior a 100 m y lagos mayores que 250 x 250 m, la misión permitirá una consecuente reducción de incertidumbres referentes a modelos hidrológicos e hidrodinámicos globales y regionales, por medio de técnicas como asimilación de datos (Emery et al., 2020; Wongchuig et al., 2020). La estimación de la escorrentía obtenida vía altimetría por satélite se beneficiará de los datos SWOT, tanto por la cobertura global como por la observación de la declividad, permitiendo una mejor corrección de modelos hidráulicos (Wilson et al., 2015).

Gracias a más de veinte años de estudios, las bases de datos de observación de la Tierra por satélite, especialmente las de altimetría por satélite, se han revelado como una herramienta sin precedentes para monitorear cuencas hidrográficas continentales, abarcando tanto períodos de sequías e inundaciones (Lopez et al., 2020). Las actuales misiones de altimetría por satélite inauguraron la era del monitoreo operacional a gran escala desde el espacio, lo que tendrá un impacto fundamental en las próximas décadas para la gran cuenca hidrográfica transfronteriza tropical que es la cuenca amazónica. Con casi dos mil estaciones virtuales distribuidas por toda la cuenca, disponibles gratuitamente y con el potencial de sumar centenares más en un futuro cercano, la altimetría por satélite puede complementar, de manera promisoría, la red tradicional de campo (*in situ*), cuya localización generalmente depende de la proximidad a una ciudad o comunidad. Sin embargo, monitorear operacionalmente aguas no abiertas, como las de llanuras de inundación cubiertas por vegetación permanente o estacionalmente inundadas, continúa siendo un desafío. En realidad, pocos lagos y reservorios son rutinariamente monitoreados por altimetría en la cuenca y este número podría aumentar (Crétau et al., 2011; Crétau y Birkett, 2006). Las próximas misiones se beneficiarán de investigaciones anteriores para mejorar la precisión de las series temporales del NA y promover su uso para monitorear más fenómenos locales, tales como los cambios entre llanuras de inundación y canales. Aunque limitados por la disponibilidad de datos adecuados, los conjuntos de datos InSAR son útiles para caracterizar la conectividad

y la dinámica de las llanuras de inundación y ríos. La cobertura global de la próxima misión SWOT aumentará significativamente nuestro entendimiento del ciclo hidrológico global, permitiendo una mejor cuantificación de los sesgos entre misiones pasadas y actuales. Esto facilitará la transformación de los archivos de altimetría por satélite en un conjunto único de datos climáticos y así comprender los impactos del cambio climático y las actividades humanas en la cuenca. Esta tarea se beneficiará por el proyecto en marcha VASHYB (*Validation of Altimetric Satellites for HYdrology in Brazil*, <https://swot.jpl.nasa.gov/documents/1054/>), que busca validar observaciones SAR e InSAR. La misión SWOT, por su parte, va a aumentar significativamente nuestra capacidad para modelar la cuenca amazónica y las variaciones de su ciclo hidrológico, gracias a la nueva posibilidad de monitorear variables hidrológicas (nivel, pendiente y escorrentía asociada) de centenares de ríos mayores a 100 m de ancho (Biancamaria et al., 2016). La precisión centimétrica del NA y la pendiente (Desai, 2018) aportarán nuevas perspectivas sobre los flujos de agua en la Amazonía. Dado que la principal limitación para un uso más amplio de la altimetría por satélite continúa siendo su bajo muestreo temporal, misiones futuras, como la misión SMASH (*SMall Altimetry Satellites for Hydrology*, Blumstein et al., 2019), lanzada en combinación con los satélites actuales, debería ayudar a resolver esta limitación.



05  
**Extensión de**  
*Aguas Superficiales*

Fabrice Papa  
Ayan Fleischmann  
John Melack  
Rodrigo Paiva  
Alice Fassoni-Andrade  
Filipe Aires

Caracterizar la extensión y variación de cuerpos de agua superficiales y de ecosistemas acuáticos que incluyen ríos, canales, lagos y áreas húmedas como bosques de várzea e igapós, tiene un peso primordial para el estudio de los ciclos hidrológico, energético y biogeoquímico de la cuenca amazónica (Junk, 1997; Melack et al., 2009). Efectivamente, cubriendo cerca del 20% de la superficie de la cuenca y con gran variabilidad temporal, las aguas superficiales de la Amazonía desempeñan un papel fundamental en el clima y el mantenimiento de la biodiversidad. Las aguas superficiales de la Amazonía son una importante fuente y sumidero de dióxido de carbono (Abril et al., 2014; Amaral et al., 2020; Raymond et al., 2013) y la mayor fuente natural de metano en los trópicos (Kirschke et al., 2013; Melack et al., 2004; Pangala et al., 2017; Pison et al., 2013). En este contexto, entender la dinámica de las aguas superficiales es de extrema importancia para la hidrología amazónica, los procesos biogeoquímicos y su conexión con el clima, una gestión efectiva de los recursos hídricos y pesqueros, así como para una gestión de desastres en ciudades que corren riesgo de inundación (por ejemplo, Iquitos, Oporto Viejo, Río Blanco, Crucero del Sur). Es decir, es particularmente importante en el contexto de los actuales cambios globales que impactan la Amazonía (ver capítulo 12), como los eventos de intensas sequías e inundaciones que recientemente afectaron grandes áreas de esta región (Davidson et al., 2012; Jiménez-Muñoz et al., 2013; Marengo et al., 2011, 2008). Además, el monitoreo de las variaciones de las aguas superficiales es fundamental para apoyar el desarrollo de modelos matemáticos del ciclo hidrológico de la Amazonía (ver capítulo 10).

Caracterizar la distribución y cuantificar las variaciones estacionales e interanuales de la extensión de aguas superficiales en una escala como la de la cuenca amazónica es un desafío, dada su gran variedad, variabilidad y por la presencia de cobertura de nubes y vegetación forestal. Las primeras estimaciones de la distribución de aguas superficiales en grandes áreas se apoyaron en bases de datos estáticos de cartas aeronáuticas y en fotografías aéreas, las que frecuentemente reflejaban la extensión máxima de aguas abiertas (Cogley, 2013; Matthews y Fung, 1987) y que no proporcionaban informaciones sobre sus variaciones a nivel temporal y espacial. De esta manera, el surgimiento de las observaciones por satélite ha permitido monitorear la dinámica de las aguas superficiales en gran escala, incluyendo las de la cuenca amazónica (Alsdorf et al., 2007; Prigent et al., 2007), y así avanzar en el entendimiento de los procesos físicos, biogeoquímicos, ambientales y ecológicos asociados.

Diferentes técnicas basadas en teledetección, que utilizan observaciones en una amplia gama del espectro electromagnético (visible, infrarrojo y microondas; Melack et al., 2004; Prigent et al., 2016), han ido siendo desarrolladas con diferentes grados de éxito, para obtener estimaciones cuantitativas de la extensión y de la dinámica de las aguas superficiales, así como de los sistemas acuáticos en la Amazonía (Tabla 4). Estas técnicas abarcan diversas resoluciones espaciales y temporales, muchas veces basadas en un análisis de costo-beneficio entre coberturas temporales y espaciales. Es decir, por un lado, observaciones con baja resolución espacial (por ejemplo, ~10-50 km de los sensores de microondas pasivos) son generalmente limitadas a la detección de áreas relativamente grandes e inundadas, o de regiones donde el área acumulada de pequeñas áreas representa una porción bastante grande de la cobertura del satélite. Sin embargo, estas tienen la ventaja de una cobertura temporal frecuente, a veces diaria. Por otro lado, observaciones de alta resolución (por ejemplo, <100 m del SAR) proporcionan información a una escala espacial fina, pero tienen baja frecuencia temporal, muchas veces limitando las observaciones sobre grandes áreas a algunas veces por estación en el año. Las observaciones ópticas e infrarrojas ofrecen resolución espacial y temporal adecuadas al mismo tiempo, pero tienen capacidades limitadas en la región tropical de la Amazonía, ya que son incapaces de penetrar en las nubes y en la vegetación densa.

**TABLA 4**  
Enfoques basados en teledetección desarrollados para monitorear la extensión de aguas superficiales en la Amazonía (lista no exhaustiva). Se muestran referencias, nombre del sensor/satélite, nombre del producto (cuando está disponible), área original del estudio, resolución espacial/temporal y período de disponibilidad de los datos.

ENFOQUES BASADOS EN	REFERENCIAS	SATÉLITES SENSORES (nombre del producto)	ÁREA ORIGINAL DEL ESTUDIO	RESOLUCIÓN ESPACIAL/ TEMPORAL	PERÍODO DE DISPONIBILIDAD
<b>Microondas pasivos</b>	Giddings e Choudhury (1989)	SMMR en el Nimbus 7	4 grandes cuencas hidrográficas de la SA	-25km / Mensual	1979-1985
	Sippel et al. (1994)	SMMR en el Nimbus 7	Amazonia Central y llanuras de inundación	-25km / Mensual	1979-1985
	Sippel et al. (1998)	SMMR en el Nimbus 7	Río Amazonas y afluentes	-25km / Mensual	1979-1985 (y 1902-1995 reconstrucción)
	Hamilton et al. (2002)	SMMR en el Nimbus 7	Cuatro grandes cuencas hidrográficas sobre la SA	-25km / Mensual	1979-1987
	Brakenridge et al. (2007)	AMSRE en el Aqua	Global	-25km / Diaria	2002-2011
	Parrens et al. (2017)	SMOS (SWAF)	Cuenca amazónica	-25-50km / 3-días	2009-presente

<b>Microondas activos</b>	Hess et al. (2003)	SAR en el JERS-1	Amazonía central	100m / Sep-Oct 95 y Mayo-Jun 96	Sep-Oct 95 y Mayo-Jun 96
	Bourrel et al. (2009)	SAR en el ERS-2 / RADASRAT	Amazonía boliviana	2 RADASRAT (50m) / 3 imágenes ERS (15m)	1996-1998
	Arnesen et al. (2013)	ScanSAR mode en el ALOS/PALSAR	Llanura de inundación del tramo bajo del río Amazonas	100m / 12 imágenes ScanSAR	2007-2010
	Ferreira-Ferreira et al. (2015)	SAR en el ALOS/PALSAR	Llanura de inundación de la Amazonía Central	12.5 / 13 imágenes ScanSAR fine beam	2007-2010
	Hess et al. (2015)	SAR en el JERS-1	Cuenca Amazónica	100m / Sep-Oct 1995 y Mayo-Jun 1996	Sep-Oct 1995 y Mayo-Jun 1996
	Chapman et al. (2015)	Modo ScanSAR en el ALOS/PALSAR	Cuenca Amazónica	100m / 323 imágenes ScanSAR	2007-2010
	Ovando et al. (2018, 2016)	Modo ScanSAR en el ALOS/PALSAR y reflectancia MODIS	Áreas húmedas Amazonía boliviana	100m / 45 ScanSAR y 500m / 8-días / imágenes MODIS	2007-2009 y 2001-2014
	Park e Latrubesse (2017)	SAR en el ALOS/PALSAR	Llanuras de inundación de la Amazonía (Miratuba)	12-350m / 19 imágenes	2006-2008
	Pinel et al. (2019)	SAR en el ALOS/PALSAR	Río Solimões (Janauacá)	30m / 23 imágenes	2007-2011
	Resende et al. (2019)	SAR en el ALOS/PALSAR	Cuenca Amazónica	25m / 56 imágenes	2006-2011
Rosenqvist et al. (2020)	ScanSAR en el ALOS-2 PALSAR-2	Cuenca Amazónica	50m / mínima y máxima anuales	2014-2017	
<b>Óptico e infrarrojo</b>	Yamazaki et al. (2015)	Landsat (G3WBM)	Global	90m / 4 escenas de cuerpo de superficie freq. en intervalo de 5 años	1990-2010
	Pekel et al. (2016)	Landsat (GSW)	Global	30m / casos de aguas superficiales	1984-2015
	Allen e Pavelsky (2018)	Landsat (GRWL)	Global	30m / anchos y áreas estáticas	-
	Souza et al. (2019)	Landsat	Cuenca Amazónica	30m / Cambios del agua de superficie	1985-2017
<b>Técnica Multisatélite (Microondas pasivos combinados con otras observaciones de teledetección)</b>	Prigent et al. (2020, 2007)	SSM/AVHRR/ERS (GIEMS)	Global	-25km / mensual	1992-2015
	Schroeder et al. (2015)	SSM/I, SSMIS, ERS, QuikSCAT, ASCAT (SWAMPS)	Global	-25km / mensual / diaria	1992-presente
	Aires et al. (2013)	GIEMS/JERS-1 SAR	Amazonía central	500m / mensual	1993-2007
	Fluet-Chouinard et al. (2015)	GIEMS reducido (o GIEMS-D15)	Global	500m / max. / min. / media	1993-2007
	Aires et al. (2017)	GIEMS reducido (o GIEMS-D15)	Global	90m / mensual	1993-2007
	Parrens et al. (2019)	SMOS reducido (o SWAF-HR)	Cuenca Amazónica	1km / 3-días	2010-2016

Estudios que analizaron sensores de microondas pasivos demostraron su utilidad para observar aguas superficiales y áreas de inundación, suministrando así algunas de las primeras estimaciones por satélite sobre la extensión de aguas superficiales de la Amazonía (Giddings y Choudhury, 1989), según la revisión de Kandus et al. (2018). Estas emisividades (y temperaturas de brillo) son sensibles a la presencia de aguas superficiales (Choudhury, 1991; Sippel et al., 1994) con una disminución de la emisividad en ambas polarizaciones lineales (horizontal y vertical) y un aumento de la diferencia de polarización, especialmente en bajas frecuencias, debido a las diferentes propiedades dieléctricas entre agua, suelo y vegetación. Por ejemplo, las aguas superficiales y los patrones de inundación en las grandes llanuras de inundación de la Amazonía central (Hamilton et al., 2002) se obtuvieron por medio de análisis de la diferencia de polarización de 37-GHz observada por el *Scanning Multichannel Microwave Radiometer* (SMMR; satélite Nimbus-7, 1979-1987). Al establecer una relación entre el área total inundada a lo largo del tramo principal del río Amazonas y las medias mensuales del nivel del agua del río en Manaus, se obtuvo la primera reconstrucción de 94 años de áreas inundadas, estimando un promedio climatológico del área inundada a lo largo del bosque de várzea del río Amazonas de ~47000 km<sup>2</sup>. Estos estudios fueron acompañados por productos de análisis de aguas superficiales provenientes de sensores microondas pasivos sobre la Amazonía, usando el Sensor Especial de Microondas/Imager (SSM/I), *Advanced Microwave Scanning Radiometer* (AMSR-E; Brakenridge et al., 2007) y, más recientemente, observaciones de *Soil Moisture Ocean Salinity* (SMOS) (Parrens et al., 2017). Parrens et al. (2017) utilizaron las observaciones de la banda L del microondas (1,4 GHz) durante el periodo 2010-2017 para mapear la evolución temporal de los cuerpos de agua de la Amazonía a una resolución espacial de ~50 km y temporal de siete días (producto llamado SWAF) con capacidad, gracias a la frecuencia de la banda L, de conseguir estimar de manera adecuada el agua superficial debajo de densos doseles como aquellos que caracterizan al bosque amazónico. Sin embargo, las observaciones de microondas pasivo tienen limitaciones inherentes a la cobertura espacial en su proyección terrestre, en general del orden de 25 a 50 km, y esta resolución espacial relativamente baja es muchas veces insuficiente para observar pequeños cuerpos de agua.

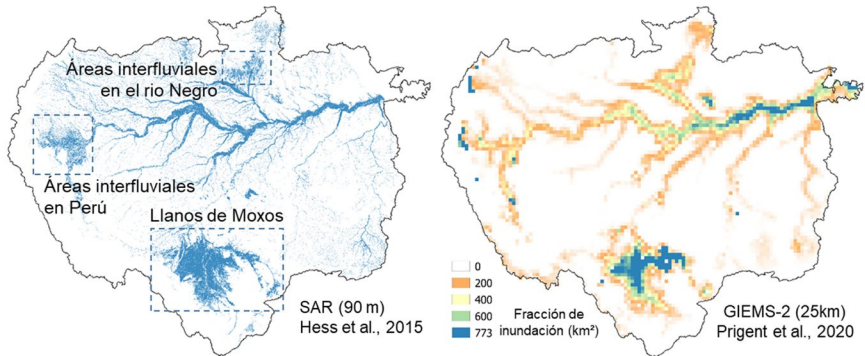
Adicionalmente, metodologías denominadas de multisatélites, que combinan diferentes tipos de observaciones para estimar la extensión de aguas superficiales y su dinámica, expanden las capacidades del uso de informaciones recopiladas por los radiómetros de microondas pasivos (Tabla 4). Aunque originalmente fueron

diseñados para aplicaciones a escala global, estas metodologías han sido aplicadas en la cuenca amazónica. Por ejemplo, las bases de datos *Global Inundation Extent from Multi-Satellite* (GIEMS, Papa et al., 2010; Prigent et al., 2007, 2016, 2020) y *Surface Water Microwave Product Series* (SWAMPS) *Inundated Area Fraction* (Schroeder et al., 2015) detectan y cuantifican la variabilidad multidecadal de la extensión de aguas superficiales sobre diversos ambientes como la cuenca amazónica (Frappart et al., 2008; Papa et al., 2013, 2008). La versión actual del GIEMS está disponible a una resolución temporal mensual, de 1992 a 2015, con una resolución espacial de ~25 km (GIEMS-2, Prigent et al., 2020, **Figura 6a**), mientras que SWAMPS ofrece informaciones actuales y en tiempo casi real (Jensen et al., 2018). El uso de estos conjuntos de datos provenientes de microondas pasivos ayudó a revelar las fuentes y las características del pulso de inundación y la onda de crecida anual a lo largo del río Amazonas y sus principales afluentes. Los mismos también contribuyeron para mostrar, a escala de cuenca, la estacionalidad de la extensión de aguas superficiales, con la estación de crecidas ocurriendo en mayo-junio y la de estiaje en noviembre en las llanuras de inundación de la Amazonía central. A escala de cuenca, la extensión de aguas superficiales de la Amazonía (**Figura 6b**) varía de ~100 mil km<sup>2</sup> (periodo de aguas bajas) a casi ~400 mil km<sup>2</sup> (periodo de aguas altas), pero con una gran variabilidad interanual, identificada principalmente como eventos extremos de sequías (1998, 2005, 2010) e inundaciones (1997, 2014) (Papa et al., 2010; Prigent et al., 2020). Sin embargo, las extensiones máximas de aguas superficiales estimadas por los productos GIEMS y SWAMPS son menores que las de las estimaciones realizadas mediante SAR (**Figura 6b**).

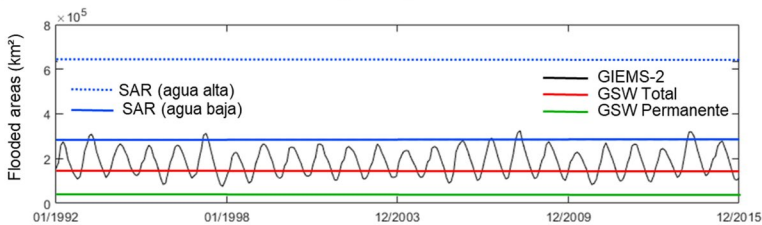
Prigent et al. (2007) demostraron que las inundaciones estacionales difieren entre las regiones norte y sur de la cuenca debido a diferencias estacionales en la precipitación. Papa et al. (2008) documentaron un retraso en el período de precipitación, la extensión de inundaciones y los picos de escorrentía a escala de cuenca, sugiriendo, al igual que Richey et al. (1989), que las llanuras de inundación en grandes cuencas, como la amazónica, pueden almacenar grandes volúmenes de agua y así alterar el transporte hídrico. Adicionalmente, Richey et al. (1989) aplicaron un esquema simple de propagación de agua y estimaron que hasta un 30% del caudal del río Amazonas es conducido a través de las llanuras de inundación. Sin embargo, estudios como Getirana et al. (2012), basados en un modelo hidrológico de gran escala que utilizó la base GIEMS para evaluar sus simulaciones de llanuras de inundación, sugirieron que el valor real podría estar por debajo del 5%. Además, Sorribas et al. (2020) indicaron que la proporción entre el flujo de agua río-llanura y la escorrentía en el río

principal varía entre un 5% y un 40%, lo que es comparable al intervalo estimado por Richey et al. (1989) y Alsdorf et al. (2010), quienes usaron métodos gravimétricos y de imagen por satélite para estimar las cantidades de agua que inundan y drenan estacionalmente las llanuras de inundación amazónicas. Por lo tanto, es necesario

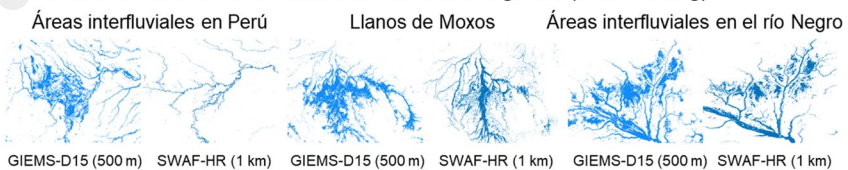
**a** Extensión máxima de la inundación de la cuenca amazónica



**b** Variabilidad de la extensión del agua superficial a escala de cuenca



**c** Extensión máxima de la inundación a escala regional (downscaling)



**Figura 6:** Extensión de aguas superficiales de la cuenca amazónica. (a) Mapa de la extensión máxima de áreas húmedas y aguas superficiales (estación de aguas altas) del SAR JERS-1 (Hess et al., 2015) y mapa de la extensión máxima anual de aguas superficiales (fracción en  $\text{km}^2$  para cada pixel de  $773 \text{ km}^2$ ) con promedio calculado de 1992 a 2015 del GIEMS2 (Prigent et al., 2020). (b) Variabilidad promedio mensual de la extensión de aguas superficiales en la escala de cuenca para el período 1992- 2015, a partir del GIEMS2 (línea negra sólida), junto a estimaciones de áreas húmedas derivadas del SAR JERS-1, área inundada para estaciones de aguas altas (línea azul punteada) y aguas bajas (línea azul sólida). También se muestra la extensión de aguas superficiales permanentes globales (GSW, Pekel et al., 2016) (línea verde, GSW permanente) y la extensión de aguas superficiales totales (la permanente más la temporal) como máximo (línea roja, GSW Total). (c) Mapa de la extensión máxima de aguas superficiales a escala regional (recuadros en (a) indican los locales) del GIEMS-D15 (Fluet-Chouinard et al., 2015) y del SWAF-HR (Parrens et al., 2019).

entender mejor los procesos que controlan las inundaciones amazónicas para cuantificar los diferentes flujos en ambientes de llanuras de inundación, como es evidente en las aplicaciones de modelos de inundación a escala regional (Rudorff et al., 2014a).

De manera complementaria, los radares de apertura sintética (SAR) son instrumentos activos que miden la retrodispersión de la superficie observada en un ángulo de incidencia (*off-nadir*), independientemente de la cobertura nubosa, permitiendo delinear aguas abiertas y áreas inundadas cubiertas por vegetación con una resolución espacial típica de 10-100m (Behnamian et al., 2017; Hess et al., 1990; Kasischke et al., 1997). El experimento *Spaceborne Imaging Radar-C* (SIR-C) ofreció datos de alta calidad, multibanda y multipolarización para la Amazonía que llevaron al desarrollo de nuevos enfoques usando SAR. Por ejemplo, Alsdorf et al. (2000) demostraron la capacidad de los análisis interferométricos para detectar variaciones a escala de centímetros en la declividad de los ríos y llanuras de inundación de la Amazonía (ver capítulo 4). Hess et al. (1995) desarrollaron algoritmos para detectar inundación y vegetación en áreas húmedas amazónicas, que se beneficiaron del modelado de las interacciones entre la vegetación y los sensores de radar, entre ellos el efecto *double-bounce*. Este entendimiento llevó al uso de datos proporcionados por la misión *Japan Earth Resources Satellite-1* (JERS-1) para producir el primer mapa de áreas húmedas de alta resolución para la región central de la Amazonía, en períodos de aguas bajas y aguas altas, a 100 m de resolución (Hess et al., 2003). Esos resultados fueron validados con transectos aéreos, de alta resolución y videográficos, en toda el área de la imagen (Hess et al., 2003). Hess et al. (2003) también identificaron que un 17% de los 1,77 millones de km<sup>2</sup> del área de estudio estaba ocupada por áreas húmedas, de las cuales el 96% estaban inundadas durante el periodo de aguas altas y 26% durante aguas bajas. Los bosques inundados representaban casi el 70% del área total de las áreas húmedas, pero las proporciones de los hábitats de las áreas húmedas presentaron grandes variaciones regionales relacionadas con la geomorfología de las llanuras de inundación. Estas nuevas estimaciones de grandes áreas inundadas fueron de gran importancia para comprender la emisión de gases como el metano y dióxido de carbono de las áreas húmedas amazónicas (ver capítulo 11).

Las estimaciones de la misión SAR JERS-1 se extendieron a todas las áreas húmedas de la cuenca amazónica (regiones <500 m sobre el nivel del mar) (Figura 6a; Hess et al., 2015). Este producto de Hess et al. (2015) es actualmente una de las principales referencias para el mapeo de estas áreas en la región, siendo frecuentemente usado en

comparaciones con otros productos derivados de satélite. Se estimó que la extensión de áreas inundadas (**Figura 6b**) fue de ~285 mil km<sup>2</sup> durante la época de aguas bajas (octubre-noviembre de 1995) y de ~634 mil km<sup>2</sup> en épocas de aguas altas (mayo-julio de 1996). Una comparación interesante se hizo para el corredor central de la Amazonía (Prigent et al., 2007) entre la base GIEMS y el mosaico de la banda L de la base SAR JERS-1 de 100 m de resolución de Hess et al. (2003) para aguas bajas (septiembre-octubre de 1995) y altas (mayo-junio de 1996). Para ambas estaciones del año, las estructuras espaciales son similares, pero las estimaciones de la extensión de aguas superficiales observadas por el SAR (118 mil km<sup>2</sup> para la estación de aguas bajas, 243 mil km<sup>2</sup> para la estación de aguas altas) son mayores que el área estimada por la base GIEMS (105 mil km<sup>2</sup> para la estación de aguas bajas, 171 mil km<sup>2</sup> para la de aguas altas). Gracias a su mejor resolución espacial, las estimaciones a través SAR son capaces de tomar en cuenta cuerpos de agua menores cuando comparados con la base GIEMS (típicamente cuerpos de agua menores de 80 km<sup>2</sup>, es decir, el 10% de un píxel del GIEMS), especialmente durante la estación de aguas bajas.

Para toda la cuenca amazónica, las estimaciones en su total amplitud de GIEMS no coinciden con las de SAR (**Figura 6a y b**), como se menciona en Hess et al. (2015), quien sugirió que los conjuntos de datos globales derivados de sensores de menor resolución espacial o sensores ópticos captan menos del 25% del área húmeda mapeada por bases SAR.

El uso de coberturas multitemporales SAR, como el modo ScanSAR del ALOS/PALSAR, muestra variaciones en la extensión de las inundaciones a escalas más locales como, por ejemplo, en la llanura de inundación del Lago Grande de Curuai a lo largo del bajo río Amazonas (Arnesen et al., 2013), en los bosques de várzea de Mamirauá (Ferreira-Ferreira et al., 2015) o patrones de inundación en la Amazonía central (Pinel et al., 2019; Resende et al., 2019). Rosenqvist et al. (2020) generaron mapas anuales de extensión máxima y mínima de inundación sobre la Amazonía usando el modo ScanSAR de la misión ALOS-2/PALSAR-2, alineado con los mapas de inundación anteriormente generados con la banda L del JERS-1 y las clasificaciones del radar ALOS/PALSAR (Chapman et al., 2015). A escala regional, Bourrel et al. (2009) mapearon las inundaciones en la Amazonía boliviana a partir de los datos de la banda C del SAR/Microondas de las misiones RADARSAT y ERS-2. En la misma región, se estudió la dinámica de las aguas superficiales en las áreas húmedas de la Amazonía boliviana (Ovando et al., 2018), así como la caracterización de eventos extremos de inundación (Ovando et al., 2016), se

investigaron combinaciones entre las observaciones SAR del ALOS/PALSAR con mapas de inundación multitemporales MODIS y variaciones del nivel del agua derivadas de altimetría (ENVISAT y SARAL). Otras misiones SAR, como la del satélite Sentinel-1 del programa Copernicus (lanzado en 2014), que ofrecen una revisita global de 6-12 días, aún no fueron totalmente exploradas en la Amazonía y presentan nuevas oportunidades para el mapeo de las variaciones espaciales y temporales de las aguas superficiales en una escala espacial fina en ambientes tropicales. El lanzamiento, en un futuro próximo, de nuevos satélites con tecnología SAR, como NISAR y SWOT (Prigent et al., 2016), ofrecerá nuevas oportunidades para monitorear las aguas superficiales de la Amazonía con sensores especialmente desarrollados para estos fines.

Las observaciones de imágenes ópticas e infrarrojas (por ejemplo, Landsat, SPOT, QuickBird, Ikonos, AVHRR, MODIS, Sentinel 2A/B) ofrecen altas resoluciones espaciales y temporales (~1-500 m, diarias a semanales), pero generalmente tienen un uso limitado en ambientes tropicales por su incapacidad para penetrar nubes y vegetación densa. Por lo tanto, continúa siendo un desafío monitorear la inundación en la Amazonía central durante el período de lluvias, debido a la gran cobertura de nubes (Asner, 2001; Hess et al., 2015; Klein et al., 2015). Sin embargo, según lo analizado por Huang et al. (2018), la clasificación de imágenes ópticas utilizando índices de agua y métodos relacionados permite estimar la frecuencia de las inundaciones a partir de mapas temporales de la cobertura de aguas superficiales. A pesar de las limitaciones que presentan la cobertura vegetal de doseles y las nubes, este tipo de información puede ser valiosa para monitorear aguas superficiales abiertas. Varios estudios (**Tabla 4**) basados en observaciones del Landsat crearon bases de datos globales del área de ríos (*Global River Widths from Landsat - GRWL*; Allen y Pavelsky, 2018) y las aguas superficiales (Pekel et al., 2016; Yamazaki et al., 2015), que pueden ser usados a escala de la cuenca amazónica. Basado en el monitoreo a escala decadal de las misiones Landsat, el conjunto de datos *Global Surface Water* (GSW, Pekel et al., 2016) usó alrededor de tres millones de imágenes a lo largo de 32 años (de 1984 a 2015) con una resolución espacial de 30 m para obtener un registro mensual de la presencia de agua en cada píxel Landsat.

En la cuenca amazónica, las estimaciones GSW de extensión de aguas superficiales (permanente y total, como la suma de los cuerpos de agua permanentes y temporales) son inferiores a las obtenidas por otras técnicas basadas en teledetección como SAR u otras como la combinación de múltiples satélites (**Figura 6b**), y la comparación

entre GSW y GIEMS-D3 (ver más abajo) mostró que cuerpos de agua estacionales en sabanas y bosques de inundación no fueron detectados correctamente (Aires et al., 2018). Souza et al. (2019) desarrollaron otra clasificación Landsat para estimar los cambios a largo plazo en las aguas superficiales de la Amazonía, destacando el reciente aumento en áreas asociadas a reservorios pertenecientes a hidroeléctricas. Misiones recientes de satélites como Sentinel 2A/B (desde 2015, con resolución espacial de 10 m en intervalos de 5-10 días; Pham-Duc et al., 2020), programas como *RapidEye* (desde 2008, con resolución espacial de 5 m y resolución temporal de 1-5.5 días; Garousi-Nejad et al., 2019) o *PlanetScope* (CubeSats, desde 2014, con resolución espacial de 3-5 m y tiempo de revisita diaria; Cooley et al., 2019) ofrecen nuevas oportunidades para estudiar la extensión de aguas superficiales a una escala más en la Amazonía.

Con el objetivo de aprovechar los puntos fuertes y complementarios al usar múltiples observaciones de satélites, como las estimaciones de baja resolución y de largo plazo de microondas pasivos versus las observaciones de alta resolución y limitadas en el tiempo de las observaciones SAR, fue desarrollada una metodología de *downscaling* por Aires et al. (2013). Esta metodología combina productos complementarios para estimar la inundación a nivel mensual en la Amazonía central con ~500 m de resolución espacial para el período 1993-2007 (Aires et al., 2013). Varios otros estudios, basados en enfoques de *downscaling* que usaron índices de inundación, proporcionaron mapas de alta resolución de la extensión de aguas superficiales sobre la Amazonía, como GIEMS-D15 (Fluet-Chouinard et al., 2015; ~500 m de resolución espacial y su adaptación de 1 km como en Reyes et al., 2019) y GIEMS-D3 (Aires et al., 2017; 90m). De modo similar, Parrens et al. (2019) propusieron una metodología de *downscaling* basada en múltiples fuentes de teledetección (SMOS SWAF; combinado con un conjunto global de datos de MDE y GSW) para mapear las aguas continentales de la Amazonía cubiertas por vegetación con ~1 km de resolución espacial, a cada 3 días y para el período 2010-2016 (denominado SWAF-HR). La **Figura 6c** muestra mapas de extensión máxima de aguas superficiales de los productos GIEMS-D15 y SWAF-HR para tres regiones, incluyendo áreas húmedas interfluviales. Estas observaciones son valiosas para la toma de decisiones en el contexto de la conservación de áreas húmedas, dado que el tiempo y la duración de la inundación muchas veces determinan las características del comportamiento ecológico y la prestación de servicios ecosistémicos por parte de estas áreas. Reyes et al. (2019), por ejemplo, clasificaron las áreas húmedas de la Amazonía según el tiempo y la duración (meses por año) de la inundación detectada con GIEMS-D15,

y lo relacionaron con los regímenes de precipitación. Se reveló que las áreas húmedas permanentemente inundadas representan la mayor cobertura superficial y son principalmente llanuras de inundación localizadas en las regiones bajas de la cuenca amazónica. La duración de la inundación en áreas húmedas estacionalmente inundadas varía, reflejando diferentes regímenes pluviométricos e hidrológicos. Estas diferencias regionales en las características de la inundación son importantes para la planificación de la conservación y el manejo de las áreas húmedas, especialmente en el contexto de intervenciones humanas, como represas y construcción de hidrovías.

Por último, nuevas técnicas y metodologías de teledetección continúan siendo desarrolladas y podrían contribuir al monitoreo de la extensión de las aguas superficiales en la cuenca amazónica. El potencial del Sistema Global de Navegación por Satélite - Reflectometría (GNSS-R) fue explorado (Chew y Small, 2020; Jensen et al., 2018; Rodríguez-Alvarez et al., 2019) usando la constelación de satélites GNSS Cyclone (CYGNSS) y un modelo que demuestra como la reflectividad de la superficie medida por la constelación CYGNSS puede capturar la dinámica de inundación sobre la región.

En la Sección 5.1 de la publicación *Methods sea Measuring Area* en Alsdorf et al. (2007), los autores sugirieron que “tal vez la mejor oportunidad en los próximos años para mediciones rutinarias del área inundada resulte de la misión ALOS de la *Japan Aerospace Exploration Agency*”.

Más de una década después, cabe notar que la extensión y la variabilidad de las aguas superficiales de la Amazonía todavía son los aspectos más analizados del ciclo hidrológico, pero los estudios que utilizan las observaciones ALOS aún continúan siendo recientes y limitadas. Por lo tanto, será necesario realizar más investigaciones y nuevas observaciones para caracterizar completamente la extensión de las aguas superficiales de la Amazonía y los procesos que determinan sus patrones y dinámica. En particular, los datos polarimétricos e interferométricos SAR en la banda L de la próxima misión SAR de la NASA/ISRO y las observaciones realizadas en la banda Ka del interferómetro SAR (*Radar Interferometer - KaRIn*) de la misión SWOT serán capaces de perfeccionar el monitoreo de la extensión y la dinámica de las aguas superficiales en la Amazonía.



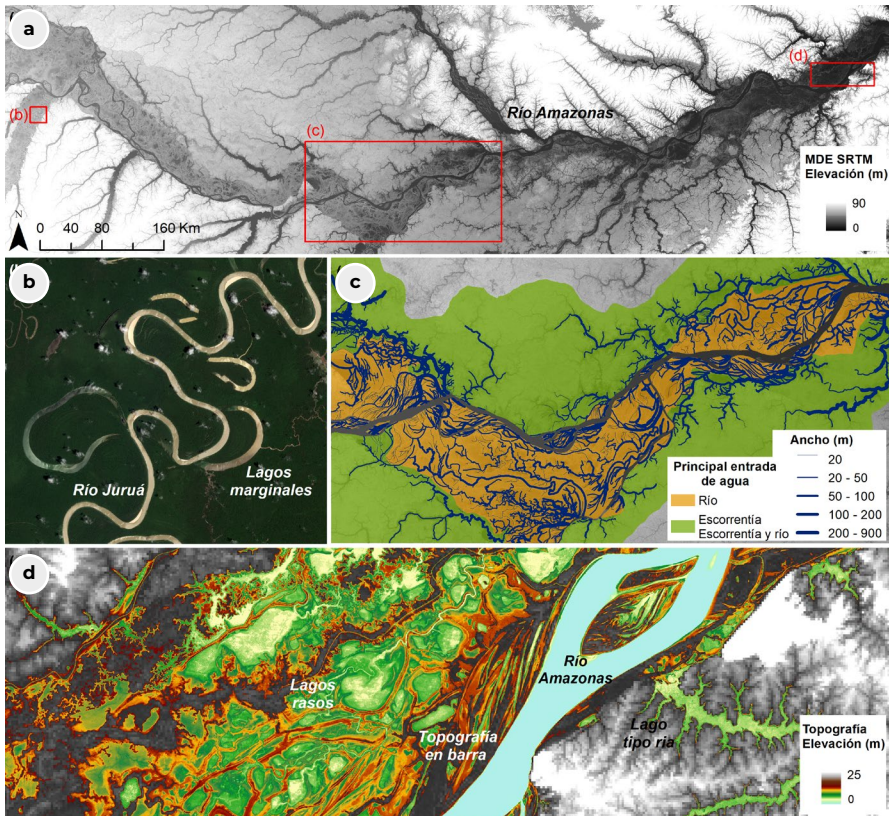
06  
*Topografía de lagos  
y canales de la llanura  
de inundación*

Alice Fassoni-Andrade  
Fabien Durand  
Ayan Fleischmann  
Rodrigo Paiva

Las llanuras de inundación a lo largo del río Amazonas tienen muchos lagos y canales cuya extensión, profundidad y conectividad varía a nivel espacial y temporal (Hess et al., 2015; Rudorff et al., 2014a; Trigg et al., 2012). Esta topografía compleja afecta el flujo del agua en los cambios entre el río y la llanura que, a la vez, son importantes para los flujos de carbono, nutrientes y sedimentos (Melack et al., 2009; Walcker et al., 2021). Informaciones topográficas precisas resultan, por lo tanto, esenciales para la caracterización de las aguas superficiales en la llanura de inundación, particularmente para el modelado numérico hidráulico (Baugh et al., 2013; Paiva et al., 2013a; Rudorff et al., 2014b). Además, el mapeo topográfico es necesario para comprender la morfología y la morfodinámica de canales y lagos. El MDE del SRTM es un conjunto de datos topográficos globales, con resolución espacial de 30 a 90 m y una precisión de 8 m (Rodríguez et al., 2006), que es generado a partir de la técnica de interferometría en la banda C (Farr et al., 2007), que ha sido ampliamente utilizada en simulaciones hidráulicas y caracterización geomorfológica de las llanuras de inundación amazónicas (**Figura 7a**). Sin embargo, estos datos se ven afectados por la cobertura de vegetación y tienen errores como sesgo sistemático o absoluto, ruidos de tipo *speckle* (aspecto granulado en la imagen debido a la presencia aleatoria de píxeles con valores extremos) y *stripe noise* (ruido en forma de rayas) (Rodríguez et al., 2006). Los datos tampoco son capaces de describir la batimetría de cuerpos de agua continentales.

La aplicación de datos topográficos, como el SRTM, junto con imágenes de radar (por ejemplo, RADAM, JERS-1) y ópticas (por ejemplo, Landsat) permitieron la caracterización geomorfológica de llanuras de inundación y canales de la cuenca amazónica. Sippel et al. (1992) describieron lagos de diferentes formas con base en mapas RADAM a lo largo de varias secciones del tramo principal del río Solimões-Amazonas y sus principales afluentes. Latrubesse y Franzinelli (2002) y Mertes et al. (1996) describieron regiones geomorfológicamente diversas a lo largo del curso superior y medio del río Amazonas. La topografía en barra (*Scroll-bar topography*), que forma lagos largos y estrechos, y lagos marginales (*oxbow lakes*) localizados en meandros abandonados de ríos, son dominantes en los tramos aguas arriba (Mertes et al., 1996; **Figura 7**). Los tramos río abajo se caracterizan por contar con grandes lagos poco profundos formados por la deposición de sedimentos finos sobre el margen en una topografía de llanura de inundación muy llana (Latrubesse y Franzinelli, 2002; Mertes et al., 1996; **Figura 7**). La deposición activa de sedimentos en las llanuras de inundación también fue identificada y descrita por Lewin et al. (2017), Park y Latrubesse (2019) y Rudorff et al. (2018) quienes usaron datos de

teledetección. Por su parte, Ahmed et al. (2019), Constantine et al. (2014), Peixoto et al. (2009), Rozo et al. (2012) y Sylvester et al. (2019) caracterizaron la migración de canales de ríos y llanuras de inundación. El balance de sedimentos tiene un papel importante en la evolución de los ríos de la Amazonía, puesto que los ríos con altas cargas de sedimentos sufren una migración de meandros más rápida y tasas de corte más altas que los ríos con cargas de sedimentos más bajas (Constantine et al., 2014). Cambios geomorfológicos grandes y rápidos también pueden surgir debido a las presiones antropogénicas como la actividad pecuaria y la irrigación de canales. Éstas pueden ser las causas de la erosión progresiva de un canal a lo largo del tramo bajo del río Amazonas que capturó casi toda la escorrentía del tramo bajo del río Araguari, que anteriormente corría de forma directa hacia el Océano Atlántico (dos Santos et al., 2018; se describe con más detalles en el capítulo 12).



**Figura 7:** (a) SRTM MDE en la Amazonía central. (b) Lagos marginales (*Oxbow lakes*) en el río Juruá (Sentinel-2, octubre de 2020). (c) Ancho del canal en la llanura de inundación (Adaptado de Trigg et al., 2012). (d) Elevación topográfica de canales y lagos de la llanura de inundación (Adaptado de Fassoni-Andrade et al., 2020b).

Con el fin de mejorar la aplicabilidad de los datos SRTM en el modelado hidráulico de la Amazonía, fueron desarrolladas varias técnicas como la remoción de la altura de la vegetación (Baugh et al., 2013; O'Loughlin et al., 2016; Paiva et al., 2013a, 2011b; Pinel et al., 2015; Rudorff et al., 2014b; Yamazaki et al., 2017), del sesgo interferométrico (Pinel et al., 2015; Rudorff et al., 2014b), y se suavizaron y eliminaron depresiones consideradas espurias (Yamazaki et al., 2012a). A pesar de haberse alcanzado una mejor representación topográfica con la utilización de esos métodos, las informaciones topográficas por debajo de la superficie del agua no pueden ser recuperadas a partir de los datos SRTM. Además, el conjunto de datos SRTM cuenta con un único pasaje de captura que se dió en febrero de 2000. Por lo tanto, algunos procesos como la crecida y la escorrentía de la llanura de inundación pueden no estar bien representados en los modelos numéricos. La batimetría del río también es una información fundamental que no se resuelve sistemáticamente. Por ejemplo, recientemente, Brêda et al. (2019) demostraron el potencial de asimilar datos de altimetría por satélite dentro de modelos hidráulicos para la estimación de sus parámetros. Para calcular la topografía en áreas estacionalmente inundadas, Bonnet et al. (2008) combinaron el nivel del agua superficial con extensiones de inundación derivadas de imágenes JERS-1 para estimar un MDE batimétrico de la llanura de inundación del Lago Grande de Curuai. Park et al. (2020) relacionaron la lámina del agua y un mapa de frecuencia de inundación derivado del mapeo de las aguas superficiales, para inferir la batimetría del Lago Grande de Curuai. Fassoni-Andrade et al. (2020b) desarrollaron y aplicaron un método sistemático para estimar la topografía de llanura de inundación usando una combinación de mapas de frecuencia de inundación derivados de teledetección óptica y datos de nivel del agua *in situ* (Figura 7d). Este fue el primer mapeo sistemático y extensivo de batimetría de un área inundada estacionalmente, mostrando profundidades de la llanura de inundación inferiores a 5 m (15 m) durante el periodo de aguas bajas (altas), y un volumen de almacenamiento activo en la llanura de inundación de aguas abiertas que variaba, en promedio, 104,3 km<sup>3</sup> por año. Este conjunto de datos fue complementado por una recopilación de cartas náuticas digitalizadas de la Marina de Brasil de regiones permanentemente inundadas. Recientemente, Fassoni-Andrade et al. (2021) aplicaron esta metodología en el estuario del río Amazonas mostrando la morfología de la llanura de inundación en zonas de marea.

Las informaciones batimétricas en áreas permanentemente inundadas dependen de mediciones en campo. Entre los estudios citados aquí, solamente algunos obtuvieron informaciones batimétricas *in situ* en las llanuras de inundación (Bonnet et al.,

2008; Fricke et al., 2019; Pinel et al., 2015) y en ríos (Wilson et al., 2007). Estudios adicionales con batimetría detallada incluyen Lesack y Melack (1995), Barbosa et al. (2006), Panosso et al. (1995) y Trigg et al. (2012). Como parte del primer balance hídrico de un lago de llanura de inundación de la Amazonía, Lesack y Melack (1995) obtuvieron la batimetría del mismo, que fue posteriormente utilizada en el modelo hidrológico de Ji et al. (2019). Panosso et al. (1995) realizaron un control batimétrico del Lago Batata, localizado cerca de la confluencia de los ríos Trombetas y Amazonas. Ese lago recibió residuos del procesamiento de bauxita y la estimación fue utilizada para estudios de conservación y recuperación. Barbosa et al. (2006) condujeron un extenso levantamiento batimétrico de la llanura de inundación del Lago Grande de Curuai, en la parte este de la cuenca amazónica. La batimetría se usó para calcular el volumen de agua almacenada, en una simulación hidráulica (Rudorff et al., 2014b) y para una evaluación topográfica (Fassoni-Andrade et al., 2020a). Trigg et al. (2012) ilustraron la primera caracterización sistemática de canales de llanura de inundación en la Amazonía central con base en imágenes Landsat y datos *in situ* (Figura 7c). El ancho de los canales de las llanuras de inundación varía considerablemente (10-1000 m), y la profundidad de los canales está relacionada con la amplitud local de la ola de crecida del río Amazonas (~10 m), que es más profunda cuando está sujeta a la esorrentía local.

Se han alcanzado muchos avances para la caracterización de la topografía de ríos y llanuras de inundación con la utilización de la teledetección, incluyendo las promisorias perspectivas de los nuevos MDEs. La banda L, por ejemplo, reduce el sesgo positivo sistemático de la vegetación por causa de su capacidad de penetrar la copa de los árboles. Las imágenes de la misión NISAR, un satélite SAR de dos bandas a ser lanzado en 2023, con cobertura global y períodos de revisita de 12 días, aumentarán la disponibilidad de los datos del radar de banda L. La misión SWOT va a medir, simultáneamente, el nivel del agua superficial y la extensión de agua, abriendo nuevas oportunidades para crear y mejorar las técnicas para analizar la topografía de ríos y llanuras de inundación. Nuevos datos, aún no explorados, del satélite ICESat-2 (lanzado en 2018), podrán ser útiles para la estimación y validación de la topografía.

07

**Color del agua:**  
*sedimentos, clorofila  
y materia orgánica  
disuelta coloreada*

Claudio Barbosa

Daniel Maciel

Evlyn Novo

Alice Fassoni-Andrade

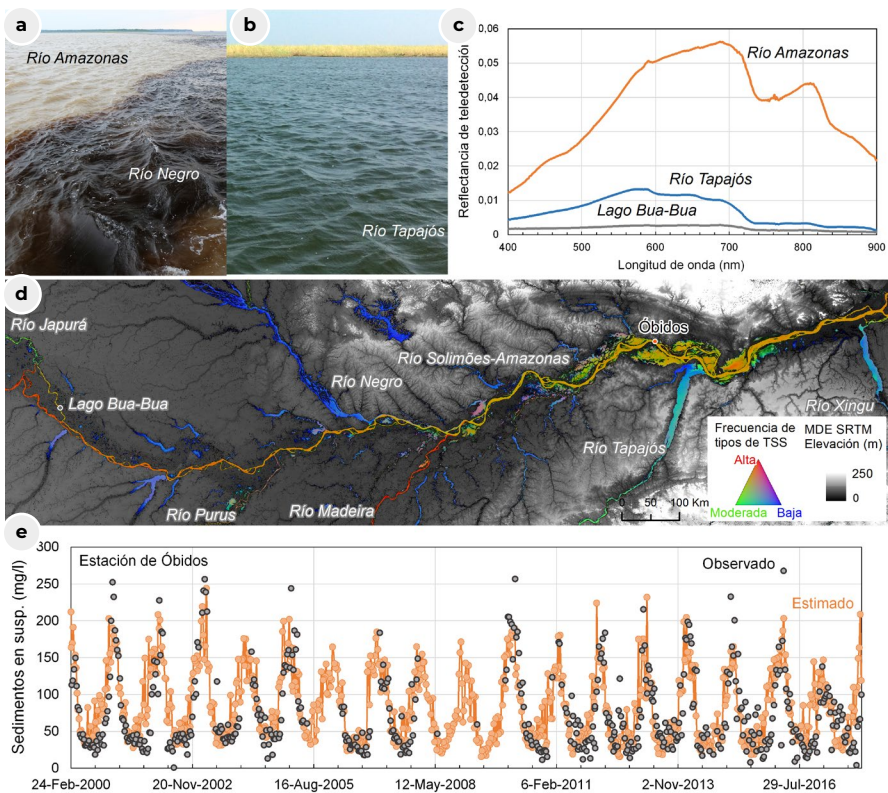
Raul Espinoza-Villar

Las aguas de la cuenca amazónica pueden clasificarse en tres tipos, según sus características físicas y químicas: aguas blancas, negras y claras (Junk et al., 2011; Sioli, 1956). Los ríos de aguas blancas, ricos en nutrientes, como los ríos Madera y Solimões, responden por el 98% de la descarga de sedimentos del río Amazonas hacia el Océano Atlántico, y son dominados por sedimentos inorgánicos originados principalmente en los Andes (Almeida et al., 2015; Meade, 1994). Los ríos de aguas negras (por ejemplo, el Río Negro; **Figura 8a**) son ricos en materia orgánica disuelta derivada de suelos podzólicos (Bouchez et al., 2011; Marino et al., 2020). Los ríos de aguas claras (por ejemplo, el Río Tapajós; **Figura 8b**) se caracterizan por ser pobres en nutrientes, con bajo sedimento y concentración de materia orgánica disuelta (Junk et al., 2015). La diversidad de tipos de agua y sus interacciones a lo largo de la llanura de inundación de la Amazonía tienen implicaciones significativas para los lagos de bosques de várzea y contribuyen con su alta biodiversidad (Junk et al., 2011; Thom et al., 2020).

El uso de teledetección viabiliza el monitoreo de las propiedades biogeoquímicas del sistema acuático, así como de la conexión entre los ríos y los lagos de la llanura de inundación. La interacción entre radiación electromagnética y los cuerpos de agua, descrita por la teoría de la transferencia radioactiva (Mobley, 1994), permite el desarrollo y la calibración de algoritmos para estimación de compuestos ópticamente activos (COAs) en los cuerpos de agua (COAs: Sólidos suspendidos totales, SST; pigmentos fitoplanctónicos como clorofila-a, Chl-a, y Ficocianina; y Materia Orgánica Disuelta Coloreada, CDOM por sigla en inglés). Esos COAs van a influir en el campo de luz subacuático y por lo tanto, en las propiedades ópticas vinculadas (por ejemplo, coeficiente de absorción y de retrodispersión) y aparentes (por ejemplo, reflectancia de teledetección -  $R_{rs}$ ) de cuerpos de agua.

Existen desafíos significativos en la aplicación de teledetección para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos de la cuenca amazónica: i) la cobertura frecuente de nubes dificulta la adquisición de imágenes; ii) la complejidad óptica de las aguas que fluyen por toda la cuenca, caracterizada por la alta variabilidad en la concentración de COAs; iii) la falta de sensores con alta resolución radiométrica, espectral, espacial y relación señal/ruido para detectar los pequeños cambios en la radiancia emergente de la columna de agua; y iv) la dificultad de usar teledetección en ríos angostos y pequeños lagos. Estos desafíos existen desde el comienzo de las aplicaciones de teledetección para estudiar los ecosistemas acuáticos de la Amazonía a comienzos de los años 1980, cuando los estudios se concentraban en la calibración y validación

de algoritmos basados en datos *in situ*. Estos métodos se basaban, principalmente, en enfoques empíricos (Bayley y Moreira, 1978; Bradley, 1980; Mertes et al., 1993), con una precisión aceptable limitada en el tiempo y el espacio para el conjunto de datos para lo que el algoritmo había sido desarrollado (Matthews, 2011; Odermatt et al., 2012). En la última década se han hecho esfuerzos para adaptar los protocolos de medidas en el océano (Mueller et al., 2003) con el objetivo de obtener propiedades ópticas inherentes (por ejemplo, el coeficiente de absorción) a las aguas de la Amazonía, permitiendo el desarrollo de algoritmos semianalíticos (Costa et al., 2013; de Carvalho et al., 2015; Jorge et al., 2017; Maciel et al., 2020a; Pinet et al.,



**Figura 8:** a) Ejemplos de aguas blancas y negras, y b) aguas claras. c) Ejemplos de espectros de tres tipos de agua (Fuente: LabISA; <http://www.dpi.inpe.br/labisa/>): agua blanca - río Amazonas (TSS de 288.5 mg L<sup>-1</sup>; Chl-a de 2.0 µg L<sup>-1</sup>; aCDOM in 440 nm of 1.3 m<sup>-1</sup>); agua clara - río Tapajós (TSS: 5.7 mg L<sup>-1</sup>; Chl-a: 10.8 µg L<sup>-1</sup>; aCDOM: 440 nm de 1.2 m<sup>-1</sup>); agua negra - Lago Bua-Bua (TSS: 7.4 mg L<sup>-1</sup>; Chl-a: 3.6 µg L<sup>-1</sup>; aCDOM: 440 nm de 2.9 m<sup>-1</sup>). d) Variabilidad espacial de sedimentos en suspensión en la Amazonía central (Adaptado de Fassoni-Andrade y Paiva, 2019). e) Serie temporal de sedimentos en suspensión *in situ* (observado) y basados en satélite con el sensor MODIS (estimado), obtenidos por el sistema de monitoreo HYBAM (<http://hidrosat.ana.gov.br>).

2017; Valerio et al., 2018). Estos métodos, basados en la teoría de transferencia radioactiva, utilizan un proceso de inversión para estimar las propiedades ópticas inherentes a partir de las propiedades ópticas aparentes. Debido a su base física, este tipo de algoritmo identifica mejor la contribución de cada componente (por ejemplo, Chl-a), proporcionando una cobertura temporal y espacial más completa (Dekker, 1993; Novoa et al., 2017).

El aumento del uso de teledetección en la segunda década del siglo XXI se debe a dos avances tecnológicos cruciales. Primero, a una nueva generación de sensores con mejor resolución espectral y radiométrica (Landsat-8/OLI, Sentinel-2/MSI, CBERS-04La/MUX, WFI y WPM) fue desarrollada y permitió aplicaciones y estudios en ambientes acuáticos complejos. En segundo lugar, el aumento sin precedentes en el desempeño computacional y almacenamiento de datos mejoró la capacidad de procesamiento de las imágenes. Sin embargo, aun considerando la baja resolución radiométrica de los sensores a bordo de los satélites Landsat-5 y Landsat-7, esto no ha impedido el desarrollo de estudios aprovechando la base de datos temporal disponible (de 1972 hasta hoy), como relatan Lobo et al. (2015) y Montanher et al. (2018). Como preparación para los nuevos sensores, se hicieron estudios de comportamiento espectral de tipos de agua de la Amazonía en una amplia gama de concentraciones de COAs (Barbosa, 2005; Nobrega, 2002; Rudorff, 2006). Estos espectros fueron organizados en una biblioteca espectral y junto a datos limnológicos, se utilizaron para crear espectros de referencia para la clasificación de tipos de agua (Lobo et al., 2012). La biblioteca espectral se utilizó como dato de entrada para un algoritmo tipo *Spectral Angle Mapper*, con el objetivo de obtener mapas de tipos de agua a partir de imágenes de los sensores *Hyperion* y *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) adquiridas simultáneamente con trabajos de campo, con precisiones razonables (un 48% y un 67% para Hyperion y MERIS, respectivamente). Esta biblioteca fue actualizada y se utilizó para clasificar los tipos de agua brasileños (da Silva et al., 2020). En otros estudios, imágenes MODIS de los satélites AQUA y TERRA se usaron con éxito para estimar Chl-a (Novo et al., 2006) y TSS (Espinoza-Villar et al., 2018; Fassoni-Andrade y Paiva, 2019; Marino et al., 2018; Martinez et al., 2009) en cuerpos de agua amazónicos con un tamaño compatible con la resolución espacial de los sensores.

La estimación de Chl-a, un *proxy* para la abundancia de fitoplancton aún es un desafío en los lagos de llanuras de inundación de la Amazonía, debido a la alta concentración de TSS que esconde las características espectrales de la Chl-a en

algunos momentos (Barbosa et al., 2015, 2009; Bourgoin et al., 2007; Ferreira et al., 2013; Lee et al., 2016; Maciel et al., 2019). Para superar este problema, se desarrolló un modelo de mezcla espectral aplicado a la llanura de inundación del Lago Grande de Curuai (Novo et al., 2006; Rudorff et al., 2006). Estos autores observaron mayores concentraciones de clorofila en períodos de aguas bajas (noviembre y diciembre), como resultado de lagos ricos en nutrientes disueltos en aguas menos turbias (Novo et al., 2006). Sin embargo, la naturaleza empírica de esos algoritmos impide su amplia aplicación. Posteriormente, se investigaron nuevos enfoques, incluyendo el uso de algoritmos semianalíticos (Flores Júnior, 2019). La estimación de CDOM, basada en imágenes de satélite es poco explotada en los lagos de la Amazonía, una vez que la separación de la contribución espectral del CDOM en ambientes turbios es un gran desafío (Jorge et al., 2021; Kutser et al., 2016). A pesar de esto, estudios como el de (M. P. da Silva et al., 2019) muestran la posibilidad de un algoritmo empírico para estimar la absorción de CDOM en 440 nm a partir de imágenes Sentinel-2/MSI. La **Tabla 5** presenta un resumen de esos estudios.

Existen muchos estudios sobre la estimación de sedimentos a partir de datos de satélite en la Amazonía. Los mismos se enfocaron principalmente en estimaciones de TSS para ríos (Bernini et al., 2019; Espinoza-Villar et al., 2018; Kilham y Roberts, 2011; Lobo et al., 2015; Maciel et al., 2020b, 2019; Montanher et al., 2014; Park y Latrubesse, 2014; Villar et al., 2013; Yopez et al., 2018) y lagos de llanuras de inundación de la Amazonía (Alcântara et al., 2009; Fassoni-Andrade y Paiva, 2019; Maciel et al., 2019; Rudorff et al., 2007, 2006). La mayoría de estos algoritmos se basan en métodos empíricos y sólo recientemente algunos algoritmos semianalíticos han sido desarrollados (**Tabla 5**). El sistema de monitoreo HYBAM proporciona datos de concentración de TSS obtenidos sistemáticamente usando algoritmos empíricos del MODIS en 16 estaciones virtuales (series temporales de TSS; <http://hidrosat.ana.gov.br>) en los principales ríos que constituyen fuentes de sedimentos del río Amazonas, incluyendo los ríos de la región amazónica-andina, en Perú y Bolivia (Espinoza-Villar et al., 2018; Espinoza Villar et al., 2012; Martinez et al., 2009; Villar et al., 2013). La **Figura 8e** es un ejemplo de una serie temporal de sedimentos en suspensión obtenida a partir del HYBAM en el Río Amazonas, entre 1999 y 2017, que ilustra la gran variabilidad de concentración de TSS en el intervalo de 25 a 250 mg L<sup>-1</sup>.

Montanher et al. (2014) mapearon el TSS en cinco ríos amazónicos usando métodos de regresión múltiple y observaron que algoritmos calibrados regionalmente tuvieron

mejor desempeño que algoritmos globales, debido a cambios en las propiedades ópticas de los ríos. Park y Latrubesse (2014) también observaron que calibrar un algoritmo empírico por separado para las estaciones de aguas bajas y altas arrojó un mejor resultado para las aguas de los ríos amazónicos. Marino et al. (2021) calibraron un algoritmo empírico usando la reflectancia en la banda del rojo (Sentinel-2/MSI) para obtener la concentración de sedimentos en el Río Negro ( $<10 \text{ mg L}^{-1}$ ), caracterizada por alta absorción de materia orgánica disuelta coloreada ( $a\text{CDOM} > 7 \text{ m}^{-1}$  en  $440 \text{ nm}$ ) y señales de  $R_{rs}$  muy bajas. Marino et al. (2020) también mostraron que el efecto de remanso del río Solimões en el río Negro es el factor principal que contribuye con la retención del 55% de la carga sedimentaria en el Archipiélago de Anavilhanas debido a la baja pendiente del agua y a la velocidad reducida del flujo.

**TABLA 5**  
Algoritmos utilizados para determinación de los componentes ópticamente activos (COAs) en la Cuenca Amazónica.<sup>4</sup>

ÁREA DE ESTUDIO	NOMBRE DEL SENSOR	COA <sub>s</sub>	RANGO DE LOS COA <sub>s</sub>	TIPO DE ALGORITMO	ECUACIÓN DEL ALGORITMO	RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LA VALIDACIÓN	REFERENCIA
Bajo Amazonas	MODIS Terra	Chl- $\alpha$	10-120 $\mu\text{g L}^{-1}$	E	$\text{Chl} = 3.9 \cdot e^{0.0175 \cdot f_{phy}}$	$R^2 = 0.76$ SE = 19 $\mu\text{g L}^{-1}$	Novo et al. (2006)
Reserva de Desarrollo Sostenible Mamirauá	Sentinel-2	CDOM	-1 - 6 $\text{m}^{-1}$	E	$a_{\text{cdom}}(440) = 4.39^{B2/B3} + 0.59^{B6/B5} - 6.67$	$R^2 = 0.75$ MSE = 0.53 $\text{m}^{-1}$ %NMSE = 15.12%	M. P. da Silva et al. (2019)
Lago Grande de Curuai	Sentinel-2 y Landsat-8	TSS y TSI	7-43.5 $\text{mg L}^{-1}$ (TSS) 3.4-33.8 $\text{mg L}^{-1}$ (TSI)	E	$\ln(\text{TSS}_{OL}) = 9.656 + 1.672 \cdot \ln(R_{rs} (550))$ $\ln(\text{TSI}_{OL}) = 10.73 + 2.08 \cdot \ln(R_{rs} (550))$ $\ln(\text{TSS}_{MS}) = 8.318 + 1.336 \cdot \ln(R_{rs} (550))$ $\ln(\text{TSI}_{MS}) = 8.447 + 1.511 \cdot \ln(R_{rs} (550))$	$R^2 = 0.71$ , MAPE = 16.81%, RMSE = 3.54 $R^2 = 0.86$ , MAPE = 18.08, RMSE = 1.97 $R^2 = 0.69$ , MAPE = 16.67, RMSE = 3.58 $R^2 = 0.81$ , MAPE = 18.62, RMSE = 3.1	Maciel et al. (2019)
Lago Grande de Curuai	WFI CBERS-4	TSS	9-28 $\text{mg L}^{-1}$	SA	$\text{TSS} = \frac{293.930 \cdot \rho_{550} + 1.341}{1 - (\rho / 0.345)}$	$R^2 = 0.75$ , MAPE = 27.08%, RMSE = 5.73 $\text{mg L}^{-1}$	Maciel et al. (2019)
Río Tapajós	Landsat-5/TM LISS-III	TSS	-0 - 120 $\text{mg L}^{-1}$	E	$P_{\text{surf(Red)}} = 2.64 \cdot (\text{TSS} - 2.27)^{0.45}$	$R^2 = 0.94$ RMSE = 1.39 $\text{mg L}^{-1}$	Lobo et al. (2015)
Río Solimões	MODIS	TSS	50-700 $\text{mg L}^{-1}$	E	$\text{TSS} = 759.12 \cdot (P_{\text{nir}} / P_{\text{red}})^{1.92}$	$r = 0.89$ , RMSE = 70.23 $\text{mg L}^{-1}$	Villar et al. (2018)
Río Orinoco	Landsat-8	TSS	-25-210 $\text{mg L}^{-1}$	E	$\text{TSS} = 1.35512 \cdot P_{\text{nir}} + 1000 - 2.9385$	$R^2 = 0.94$ , MAPE = 19.8%, RMSE = 12.8 $\text{mg L}^{-1}$	Yepez et al. (2018)

Río Madeira	MODIS	TSS	25-622 mgL <sup>-1</sup>	E	$TSS = 1020 \cdot (P_{nir} / P_{red})^{2.94}$	$r = 0.79$	Villar et al. (2013)
Río Amazonas	MODIS	TSS	7-130 mgL <sup>-1</sup>	E	TSS Fraction from spectral unmixing model	RE = 10 mgL <sup>-1</sup> (estimated)	Kilham e Roberts (2011)
Ríos de aguas blancas de la Amazonia	Landsat-5	TSS	0-3561 mgL <sup>-1</sup>	E	Multiple regression	$R^2 = 0.76$	Montanher et al. (2014)
Río Madeira	TriOS Ramses (In situ)	TSS	0-450 mgL <sup>-1</sup>	SA	Relação entre backscattering coefficient em 550nm e TSS	$R^2 = 0.7345$	Bernini et al. (2019)
Ríos de aguas blancas de la Amazonia	TriOS Ramses (In situ)	TSS	5-620 mgL <sup>-1</sup>	E	$TSS = 20.41 \cdot (P_{860})^{1.173}$	$R^2 = 0.89$	Martinez et al. (2015)
Río y lagos de la Amazonia	MODIS Terra y Aqua	TSS	0-600 mgL <sup>-1</sup>	E	$TSS = \exp^{20 \cdot P_{red} + 7.68 \cdot P_{nir} + 0.31 \cdot (P_{red} / P_{nir})}$	$R^2 = 0.7$ , RMSE = 75.6 mgL <sup>-1</sup>	Fassoni-Andrade e Paiva (2019)
Ríos Branco y Negro	Sentinel-2	TSS	0.44-22.64	E	$TSS = 881.4 \cdot R_{rs}(660) + 2.3$	$R^2 = 0.85$	Marinho et al. (2021)

La alta variabilidad de los COAs en lagos de llanura de inundación dificulta las parametrizaciones de los algoritmos. En la llanura de inundación del Lago Grande de Curuai (bajo Amazonas), por ejemplo, las concentraciones del TSS pueden variar de ~5 mg L<sup>-1</sup> en la estación de llena hasta 1000 mg L<sup>-1</sup> en la estación de sequía debido a la resuspensión de sedimentos por los vientos (Bourgoin et al., 2007). A pesar de estos aspectos, trabajos recientes presentan estimaciones exitosas de TSS en las llanuras de inundación del Bajo Amazonas (Maciel et al., 2020b, 2019).

Las tendencias de TSS documentadas en el río Amazonas (Martinez et al., 2009; Montanher et al., 2018) y Madera (Latrubesse et al., 2017; Li et al., 2020) pueden estar relacionadas a la construcción de represas (por más detalles ver capítulo 12). Las dinámicas estacionales e interanuales de los sedimentos en suspensión en el estuario del río Amazonas fueron estudiadas usando series temporales de ocho días (2000-

~~~~~  
<sup>4</sup>El rango de los COAs se refiere a los valores mínimo y máximo; El tipo de algoritmo se refiere a Empírico (E) o Semi-Analítico (SA). En la columna de la ecuación del algoritmo *fphy* se refiere a la fracción de fitoplancton del Modelo de mezcla lineal,  $R_{rs}(\lambda)$  es la reflectancia de SR,  $p(\lambda)$  es la reflectancia del agua.  $R^2$  es el coeficiente de determinación, SE es el error patrón, MSE es el error cuadrático medio, %NMSE es el error cuadrático medio estándar, MAPE es el error porcentual medio absoluto, RMSE es la raíz del error medio cuadrático, PE es el error porcentual. Para las ecuaciones de métricas estadísticas, el lector debe consultar las respectivas referencias.

2013) del sensor MODIS a bordo de las plataformas de los satélites continentales Terra y Aqua (Gensac et al., 2016). Las concentraciones de TSS se estimaron usando un algoritmo empírico que utiliza la banda del infrarrojo cercano y que había sido desarrollado anteriormente para las aguas turbias del Río Amazonas (Martinez et al., 2009). Los resultados ofrecieron una mejor comprensión de la formación de depósitos de lama, migración y geomorfología de la costa, indicando el papel fundamental de los datos de satélite combinados con las mediciones *in situ*. Los datos de teledetección en la Amazonía también fueron usados para evaluar los impactos de agradación causados por la explotación minera artesanal de oro en la cuenca del río Tapajós (Lobo et al., 2015, 2016; ver capítulo 12 para detalles). Además, Fassoni-Andrade y Paiva (2019) mapearon por primera vez el patrón espacio-temporal de sedimentos en aguas claras, blancas y negras de los ríos amazónicos (Figura 8d). A pesar de las incertidumbres, la reflectancia filtrada temporalmente en el rojo y el infrarrojo reveló variaciones de sedimentos en ríos y lagos. Así, fue posible caracterizar procesos hidrológicos como efectos de remanso, desborde y resuspensión de sedimentos en lagos. Se observó que los lagos poco profundos y grandes del tramo medio del río Amazonas reciben agua rica en sedimentos debido a la subida del río durante la llena, mientras que en el período de sequía se da una resuspensión de sedimentos, de acuerdo a lo documentado anteriormente (Bourgoin et al., 2007). En los lagos tipo ría (accidente geomorfológico que ocurre en la desembocadura de ríos), la principal fuente de agua proviene de la cuenca local (escorrentía superficial y precipitación local) con la entrada de agua del río agregando sedimentos durante el período de aguas bajas.

Uno de los mayores desafíos de la teledetección del color del agua es identificar y separar, desde la señal emergente en la columna de agua, cada contribución de los componentes ópticamente activos. Las altas concentraciones de sedimentos, que pueden encubrir las contribuciones de Chl-a y CDOM, vuelven este desafío especialmente significativo en las aguas de la Amazonía (Jorge et al., 2021). El enfoque semianalítico, que logra un buen desempeño en otras aguas complejas (Gholizadeh et al., 2016; Werdell et al., 2018; Zheng y DiGiacomo, 2017), es una alternativa para superar este desafío. Sin embargo, depende de sensores con características espectrales, radiométricas y espaciales, adecuadas a las aguas continentales para calibrar algoritmos con alta precisión. Las aplicaciones iniciales de este enfoque en aguas amazónicas, utilizando datos Landsat-8/OLI, Sentinel-2/MSI, y Sentinel-3/OLCI, han mostrado resultados promisoros (Bernini et al., 2019; de Carvalho et al., 2015; Jorge et al., 2017; Maciel et al., 2020a). Además, misiones

de sensores hiperspectrales como *Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem* (PACE; Werdell et al., 2019) de la NASA, y PRISMA de la Agencia Espacial Italiana (Giardino et al., 2020; Niroumand-Jadidi et al., 2020), pueden ayudar a superar este reto. Debido a la extensa variabilidad temporal en la concentración de los COAs, un enfoque promisor es el de integrar algoritmos híbridos y semianalíticos para obtener una mayor precisión en una amplia gama de COAs. Para enfrentar la frecuente cobertura de nubes y obtener datos compatibles con la dinámica de los ecosistemas acuáticos, el uso concomitante de datos de sensores intercalibrados (Landsat-8/OLI, Sentinel-2/MSI, Sentinel-3/OLCI, CBERS-4A/MUX), llamados constelaciones virtuales, puede ser una solución. En este sentido, existen diversas iniciativas en marcha, como por ejemplo el proyecto Brasil Data Cube (<http://brasildatacube.dpi.inpe.br/portal/explore>) y el *Harmonized Landsat Sentinel* (Claverie et al., 2018), que se proponen ofrecer datos intercalibrados de diferentes sensores. Sumado a esto, para investigar procesos dinámicos en los ecosistemas acuáticos, nano-satélites de alta resolución espacio-temporal representan una herramienta promisor para comprender las respuestas de corto plazo de la biota a los cambios hidrológicos de los lagos (Maciel et al., 2020b; Nagel et al., 2020).

El perfeccionamiento de las tecnologías de teledetección durante las últimas décadas ha llevado a algoritmos más precisos para la estimación de sedimentos en suspensión en la Amazonía. Pero, como ha sido demostrado en la **Tabla 5**, las estimaciones de Chl-a y CDOM aún son un desafío en esas aguas ópticamente complejas. Además, esta estimación precisa de Chl-a y CDOM depende de datos también precisos de teledetección, lo que exige la inversión de esos COAs. Por lo tanto, son imprescindibles nuevos sensores con alta resolución radiométrica y espectral. En suma, técnicas más robustas, como algoritmos semianalíticos, enfoques de aprendizaje de máquinas y plataformas de computación en nube (por ejemplo, *Google Earth Engine*) pueden mejorar los estudios de la calidad del agua usando teledetección en la cuenca amazónica.

08

**Almacenamiento**  
*total* de agua y  
**almacenamiento de**  
*aguas subterráneas*

Frédéric Frappart  
Fabrice Papa  
Alice Fassoni-Andrade

La distribución de la masa de agua en la Tierra es una información necesaria para entender el sistema climático y sus variaciones temporales a escalas de tiempo mensual a multidecadal. Sobre la tierra, esta distribución corresponde al continuo cambio de masas de agua entre las de la superficie (es decir, ríos, lagos, áreas húmedas, cobertura de nieve y glaciación de montaña) y la subsuperficie (agua en el suelo y aguas subterráneas) y las de la atmósfera y el océano por intermedio de precipitaciones, evapotranspiración y diversas formas de escorrentía superficial y subsuperficial. El almacenamiento total de agua es la suma del agua contenida en los diferentes compartimentos hidrológicos. La importancia de las aguas superficiales en la cuenca amazónica ha sido presentada en el capítulo 5. Sin embargo, el almacenamiento de las aguas subterráneas también desempeña un papel importante en la hidrología de la Amazonía y ejerce una gran influencia en la variabilidad climática y los ecosistemas del bosque tropical (Pokhrel et al., 2013). Los fuertes efectos de memoria del sistema de aguas subterráneas de la Amazonía han propagado anomalías climáticas sobre la región durante varios años (Frappart et al., 2019; Miguez-Macho y Fan, 2012; Pfeffer et al., 2014).

La misión GRACE, en operación desde marzo de 2002 a junio de 2017 y la misión GRACE *Follow-On*, en órbita desde mayo de 2018, han permitido el monitoreo de los cambios espacio-temporales del almacenamiento de agua terrestre (*Terrestrial Water Storage*, TWS; Tapley et al., 2004). La anomalía temporal del TWS proviene de las observaciones del satélite GRACE, que mide las variaciones pequeñas en el campo gravitacional de la Tierra (Tapley et al., 2004). Las observaciones de GRACE de la anomalía del almacenamiento de agua terrestre (*TWS Anomaly* - TWSA), a pesar de su resolución espacial grosera de ~200-300 km, han sido ampliamente utilizadas, junto a observaciones externas, para analizar el impacto de la variabilidad climática y los cambios globales en la distribución de las masas de agua sobre el suelo (Tapley et al., 2019) y de las reservas de agua subterránea (Frappart y Ramillien, 2018).

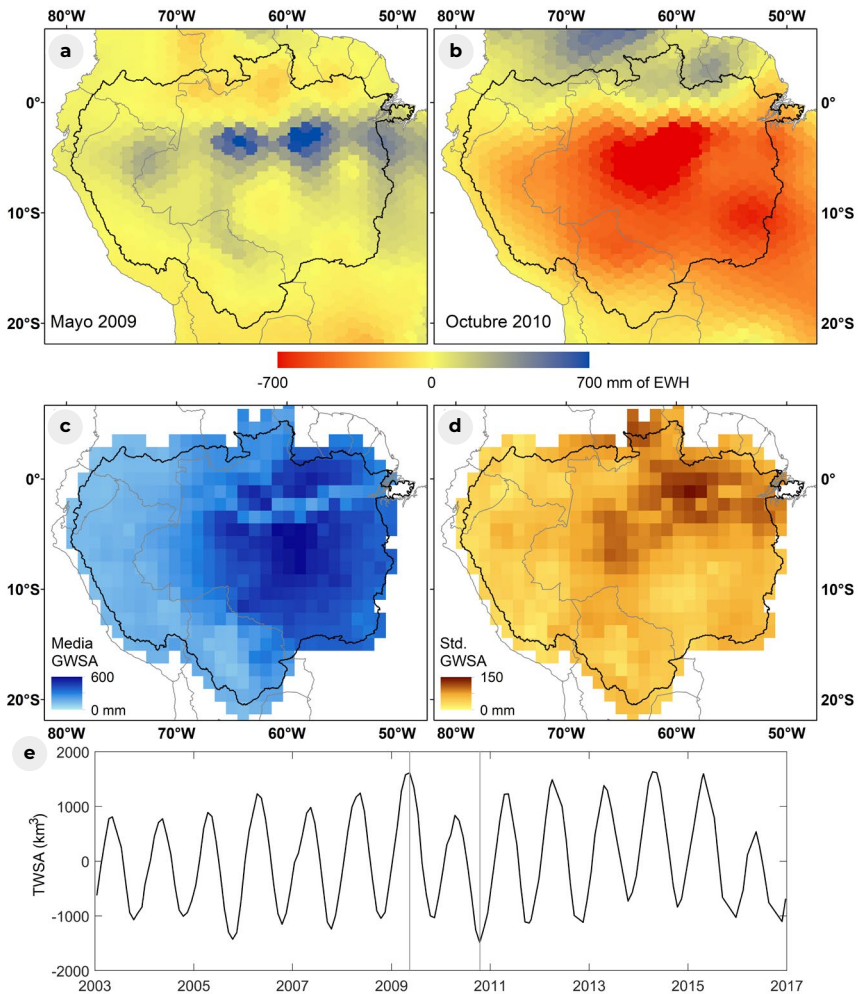
Considerando toda la cuenca amazónica, la estimación de la amplitud anual del TWS derivada del GRACE varía de 300 a 450 mm (**Figura 9**; Chen et al., 2009; Crowley et al., 2008; Frappart et al., 2013b; Xavier et al., 2010). Esa banda corresponde al doble de la amplitud anual del almacenamiento de agua superficial de toda la cuenca (Frappart et al., 2012; Ndehedehe y Ferreira, 2020), lo que significa que la amplitud anual de las variaciones de almacenamiento subsuperficial (humedad del suelo y agua subterránea) también representa la mitad de la amplitud anual del TWS. Se

han observado grandes variaciones de ese valor entre las principales subcuencas amazónicas, dependiendo de la extensión de las llanuras de inundación (Frappart et al., 2019, 2011; Papa et al., 2013). La lluvia y la TWSA basada en GRACE fueron consideradas altamente correlacionadas en la Amazonía y en sus principales subcuencas (período 2003-2010), incluso a escalas de tiempo interanuales, con coeficientes de correlación de Pearson generalmente superiores a 0,7 (excepto en las cuencas localizadas en los Andes) y con un desfase temporal que varía de cero a tres meses (Frappart et al., 2013a; Ndehedehe y Ferreira, 2020). Se obtuvieron resultados similares entre la TWSA y los valores de escorrentía de los ríos a lo largo de los mismos períodos (Frappart et al., 2013a). También se observó una buena concordancia entre el TWS y la extensión de aguas superficiales obtenida por satélite (GIEMS), las precipitaciones y la escorrentías a lo largo de varios períodos (Papa et al., 2008; Prigent et al., 2012, 2007; Tourian et al., 2018). Estos estudios revelaron la complejidad del transporte de agua entre las diferentes subcuencas de la Amazonía con la presencia del efecto de histéresis en la relación entre la extensión de agua superficial y la TWSA.

El análisis de los patrones espacio-temporales en los cambios del TWS ha proporcionado nuevas informaciones sobre el impacto de los eventos climáticos extremos (sequías e inundaciones excepcionales que ocurrieron en 2005, 2010, 2012-2015 y en 2009, 2012, respectivamente) en el almacenamiento de agua terrestre de toda la cuenca amazónica o de sus principales subcuencas (Chen et al., 2010, 2009; Espinoza et al., 2013; Ferreira et al., 2018; Frappart et al., 2013a). Ejemplos de mapas con las diferencias en la TWSA entre un mes determinado y su media climatológica están presentados en la **Figura 9a-b** para mayo de 2009 y octubre de 2010, respectivamente. Estos meses fueron elegidos por corresponder al valor extremo de esos eventos climáticos (sequías de 2005, 2010 y 2015, e inundación de 2009). Esta información es complementaria a la que se puede obtener por medio de datos de lluvia, niveles de agua y escorrentías *in situ*. Por ejemplo, los patrones de la TWSA mínima durante las sequías de 2005 y 2010 en la cuenca coincidieron con áreas de gran actividad de fuego (Aragão et al., 2008; Zeng et al., 2008) y de considerable mortalidad de árboles (Phillips et al., 2009) cómo relatan en Frappart et al. (2013a). La TWSA también ayudó, junto con el modelado hidrológico, a caracterizar las recientes sequías extremas ocurridas en la Amazonía, colocando en destaque la importancia de las interacciones entre los almacenamientos de agua de subsuperficie y superficial para mitigar el déficit de los reservorios superficiales (Chaudhari et al., 2019).

Un modo directo de estimar anomalías en el almacenamiento de aguas subterráneas (GWSA) es remover la contribución de los diferentes compartimentos hidrológicos de la TWSA, basada en GRACE, de la siguiente forma:

$$\Delta GW = \Delta TWS - \Delta SW - \Delta SM - \Delta CW - \Delta SWE \quad (1)$$



**Figura 9:** Mapas de la TWSA durante dos eventos extremos: (a) inundación en mayo de 2009, y (b) sequía en octubre de 2010. Media de cambios anuales en anomalías de almacenamiento de aguas subterráneas (*Groundwater Storage Anomaly* - GWSA) (c) y desviación estándar asociada (d) a lo largo de 2003-2010 (adaptado de Frappart et al., 2019). (e) Serie temporal de TWSA basada en GRACE ( $\text{km}^3$ ) sobre la cuenca amazónica entre 2003-2016. Las líneas verticales muestran los meses de valores máximos (mayo de 2009) y mínimo (octubre de 2010).

En la que  $\Delta$  representa la anomalía del almacenamiento de agua en los diferentes compartimentos hidrológicos, SW es el almacenamiento de agua superficial, SM es la humedad del suelo o agua contenida en la zona de raíces, CW es el agua contenida en el dosel, y SWE es el equivalente al agua en forma de nieve. Este último término fue desconsiderado en los estudios realizados en la cuenca amazónica, puesto que no había informaciones confiables sobre este tipo de almacenamiento de agua. En la mayoría de los casos, el agua proveniente de los otros compartimentos (SW y SM) es proporcionada por salidas de modelo y/o por mediciones *in situ*. Para la Amazonía, es necesario tener en cuenta, con precisión, el componente SW, ya que representa cerca de mitad de la TWSA (Frappart et al., 2019, 2012). Utilizando informaciones externas de modelos hidrológicos para SW, SM y CW, las anomalías de almacenamiento de aguas subterráneas (GWSA) fueron estimadas a lo largo del período 2003-2015, revelando una fuerte conexión entre propiedades geológicas y almacenamiento de GW: la mayor capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas en Brasil se encontró en regiones con mayor permeabilidad de las capas rocosas (por ejemplo, los acuíferos Guaraní y Alter do Chão; Hu et al., 2017). Pero en esos casos, el almacenamiento de SW se limitó al almacenamiento de los ríos, desconsiderando el almacenamiento en las extensas llanuras de inundación de la cuenca amazónica. Para considerar adecuadamente la contribución de los componentes del SW, se desarrollaron metodologías para estimar las variaciones de almacenamiento de SW a partir de observaciones de teledetección (Frappart et al., 2012, 2008; Ndehedehe y Ferreira, 2020). Las anomalías de almacenamiento de SW se obtuvieron con la combinación de la extensión de aguas superficiales (generalmente a partir de la base GIEMS, ver capítulo 5) y de la serie temporal basada en altimetría de los niveles de agua (ver capítulo 4) sobre ríos y llanuras de inundación. Frappart et al. (2012) estimaron las variaciones mensuales del almacenamiento de SW a escala de la cuenca durante la sequía de 2005 y constataron que la cantidad de agua que se almacenó en el río y las llanuras de inundación de la Amazonía durante ese evento extremo fue de 130 km<sup>3</sup> (70%) menos que su promedio de 2003-2007, lo que representa aproximadamente la mitad de la anomalía del TWS mínimo, según lo estimado por medio de las observaciones de GRACE.

Usando esas informaciones externas sobre las variaciones de almacenamiento de SW, junto con las estimaciones de almacenamiento de SM de modelos hidrológicos, las anomalías de almacenamiento de GW fueron estimadas por primera vez a lo largo del periodo 2003-2004 en la Cuenca del río Negro, uno de los mayores afluentes de la cuenca amazónica (Frappart et al., 2011). El patrón espacial de la amplitud anual

de las anomalías de GW se adecua bien a los mapas hidrogeológicos regionales y su amplitud es consistente con las observaciones del nivel del agua en pozos locales y series temporales basadas en altimetría de niveles de agua en dos áreas húmedas adyacentes donde el nivel del agua subterránea alcanza la superficie durante todo el ciclo hidrológico (Frappart et al., 2011).

Este enfoque fue entonces extendido a toda la cuenca amazónica a lo largo del periodo 2003-2010, usando cerca de 1000 estaciones virtuales de altimetría ENVISAT RA-2 de nivel del agua (Frappart et al., 2019). El almacenamiento de SW en toda la cuenca tuvo una amplitud anual que varió entre 900 y 1300 km<sup>3</sup> (Frappart et al., 2012). Las estimaciones de GW coincidieron con las observaciones de agua subterránea *in situ* y con los mapas de aguas bajas del nivel freático de GW (Frappart et al., 2008). A escala de cuenca los resultados tienen patrones espaciales realistas cuando se comparan con los mapas hidrogeológicos de Brasil (por ejemplo, mapas de porosidad, límites de acuíferos, recarga de GW). Se estima que la amplitud estacional de GW contribuya entre un 20% a un 35% de la amplitud del TWS proveniente de observaciones de GRACE en la cuenca amazónica (Frappart et al., 2019). Se observó también que el impacto de la sequía extrema de 2005 en el almacenamiento de GW también se dio por varios años (Frappart et al., 2019).

La altimetría por radar fue usada para estimar mapas de aguas bajas del nivel freático de GW en la parte central de la cuenca Amazónica (Frappart et al., 2008). Debido a la conexión entre la superficie y las aguas subterráneas durante el período de aguas bajas en las llanuras de inundación de la Amazonía central (54°-70°W, 0°-5°S), los niveles anuales de aguas bajas en 593 estaciones virtuales de altimetría fueron interpolados para generar mapas anuales del nivel de base de las aguas subterráneas (*Groundwater Base Level*, GWBL) entre 2003 y 2009. Los resultados muestran que el GWBL se rige por la topografía superficial y que fueron necesarios varios años para que el GWBL se recuperara de la sequía extrema del año 2005 (Pfeffer et al., 2014).

El reciente lanzamiento del GRACE *Follow-On* ofrece la oportunidad de extender el monitoreo de las alteraciones del TWS y del GWS a partir de 2018. A pesar de la falta de datos entre octubre de 2017 (fin de la operación de GRACE) y mayo de 2018 (lanzamiento de GRACE *Follow-On*), dos décadas de TWSA estarán disponibles en breve, permitiendo el análisis del impacto de eventos climáticos durante varios años, como el ENSO en el almacenamiento de agua terrestre y subterránea. Las

principales desventajas de estos datos son sus bajas resoluciones espacial (200-300 km) y temporal (1 mes), que no son suficientes para estudiar la dinámica de eventos hidrológicos rápidos (e.g. a escala diaria o sub-diaria). Para superar estos obstáculos, los sensores a bordo de GRACE son versiones avanzadas de los sensores presentes en GRACE, además de contar con un nuevo interferómetro a láser (LRI), que mide la distancia de satélite a satélite en paralelo con el instrumento de radar de banda K. Se espera que el LRI sea 26 veces más preciso que el radar de banda K a bordo del GRACE (Tapley et al., 2019). Este aumento de precisión probablemente mejorará la calidad y la resolución espacial de la estimación de la TWSA. Nuevos enfoques basados en el uso del filtro Kalman han sido desarrolladas para aumentar la resolución temporal de la TWSA para que se aproxime a valores casi diarios, sin disminuir su resolución espacial (Ramillien et al., 2020, 2015).



# Balance hídrico

Victor Pellet  
Filipe Aires  
Adriana Moreira  
Ayan Fleischmann

Para entender mejor los complejos procesos hidrológicos en la cuenca amazónica, es necesario monitorear cada componente del ciclo del agua y entender cómo se conectan e interactúan. Entonces, el cálculo del balance hídrico (BH) en la cuenca amazónica requiere el uso de una gran variedad de observaciones, especialmente porque la cuenca incluye ambientes complejos, como las llanuras de inundación, y procesos como flujo de agua en el suelo y transpiración de la vegetación difíciles de caracterizar por medio de observaciones de satélite.

Diversos estudios se dedicaron a analizar el BH en la cuenca amazónica entendiendo que ésta es una de las principales cuencas hidrográficas del mundo (Azarderakhsh et al., 2011; Builes-Jaramillo y Poveda, 2018; Moreira et al., 2019; Munier y Aires, 2018; Oliveira et al., 2014; Pan et al., 2012; Sahoo et al., 2011; Zhang et al., 2018). La mayoría de los estudios de BH usó un producto o sólo algunos productos de satélite para cada componente hídrico (Azarderakhsh et al., 2011; Builes-Jaramillo y Poveda, 2018; Maeda et al., 2015; Moreira et al., 2019; Oliveira et al., 2014; Rodell et al., 2011). El uso de una multiplicidad de productos de satélite para cada componente hídrico puede reducir las incertidumbres, por medio de un enfoque basado sólo en observaciones (Aires, 2014), o de una integración de modelos de simulaciones y Reanálisis (Pan et al., 2012; Zhang et al., 2018).

La mejoría continua de la calidad y el aumento del uso de productos de satélite, asociados a técnicas de integración más sofisticadas, han permitido una caracterización más adecuada del ciclo del agua. Los análisis de BH han sido utilizados para i) estimar directamente un componente determinado del ciclo del agua, como la *ET* (Maeda et al., 2017; Rodell et al., 2011), Escorrentía (*R*, *Runoff*) (Azarderakhsh et al., 2011; Oliveira et al., 2014) y cambio en el almacenamiento de agua terrestre *dS* (Moreira et al., 2019); ii) diagnosticar la coherencia hidrológica de una combinación de estimaciones basadas en teledetección e investigación de discrepancias (Builes-Jaramillo y Poveda, 2018; Moreira et al., 2019; Oliveira et al., 2014); e iii) optimizar las estimaciones basadas en teledetección para obtener un BH coherente en términos hidrológicos (Munier y Aires, 2018; Pan et al., 2012; Pan y Wood, 2006; Pellet et al., 2021; Sahoo et al., 2011). Los tres principales usos del cierre del BH se detallan en los siguientes párrafos.

Al estimar un componente del ciclo del agua, el objetivo puede ser investigar patrones estacionales (Azarderakhsh et al., 2011; Moreira et al., 2019) y características más complejas, como tendencias e impactos debido al uso del suelo y cambios en su

cobertura (Oliveira et al., 2014). Estos estudios dejan incertidumbres en sus estimaciones que provienen de las incertidumbres relativas de los otros componentes (Rodell et al., 2011). Cuando el foco es la *ET*, la literatura resalta que en la cuenca amazónica ésta es controlada tanto por la precipitación *P* como por la radiación, sin ser limitada por uno de los dos (Maeda et al., 2017). Sin embargo, la estacionalidad permanece incierta debido a la gran incertidumbre en la *ET*. Además, la estimación de *ET* como valor residual de la ecuación de BH demostró grandes incertidumbres en diversas cuencas a lo largo del globo cuando analizada a escala mensual. Por otro lado, cuando se evaluaron estas estimaciones en la escala anual, se observó una menor incertidumbre en las estimaciones de *ET* (Rodell et al. 2011). Así, a escalas temporales mayores (por ejemplo, anual), la *ET* obtenida como residuo de la ecuación de BH se presenta como una alternativa con alto potencial para la evaluación de los diversos productos de *ET* por teledetección.

El diagnóstico de la coherencia del BH por medio de la combinación de productos de teledetección es una herramienta útil para evaluar la calidad de esos productos. Moreira et al. (2019), por ejemplo, demostraron que los conjuntos de datos de precipitación del MSWEP y de *ET* del GLEAM proporcionan estimaciones de BH con incertidumbres menores con relación a los otros modelos probados. Oliveira et al. (2014) mostraron que versiones recientes de la TRMM *Multi-satellite Precipitation Analysis* (TMPA) también mejoran el cierre del BH en comparación con las versiones más antiguas. Builes-Jaramillo y Poveda (2018) evaluaron las estimaciones de *ET* por BH sobre la Amazonía, y verificaron discrepancias de dichas estimaciones con diversos productos de *ET* (basadas en teledetección y reanálisis). Sin embargo, los resultados demostraron que los productos de *ET* basados en teledetección presentaron una mayor concordancia con la *ET* de BH que con la *ET* proveniente de los modelos de reanálisis. Según lo relatado en Builes-Jaramillo y Poveda (2018) y Moreira et al. (2019), el desequilibrio del BH está relacionado a escala de subcuenca *r* con el área de drenaje y con las condiciones climáticas (o sea, tropicales o montañosas), que impactan la relación señal-ruido de cada componente hídrico.

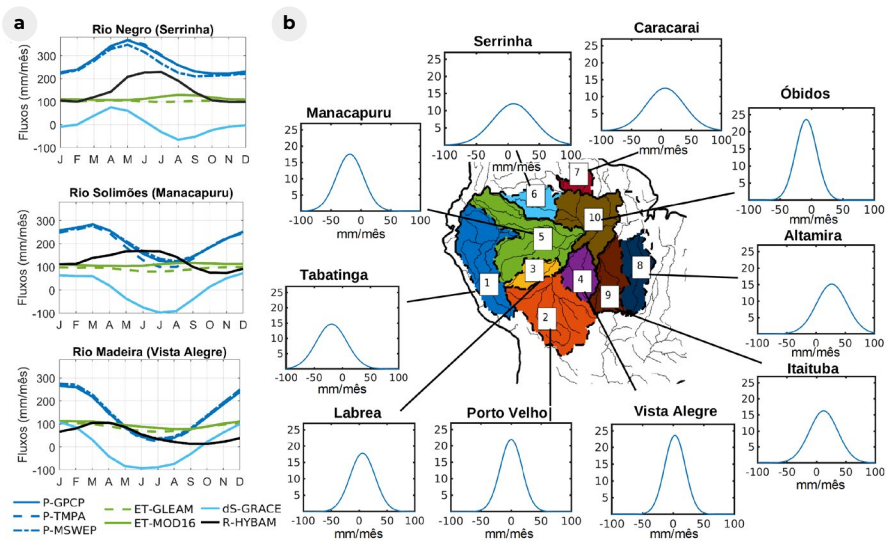
Varios estudios usaron el cierre del BH como una restricción para la optimización de las estimaciones por satélite, analizando de forma conjunta para cada componente hídrico. Pan y Wood (2006) desarrollaron una optimización de los productos por satélite utilizando un esquema de asimilación dentro de un modelo de superficie terrestre a escala de cuenca. Este método fue aplicado a la cuenca amazónica (Pan et

al., 2012; Sahoo et al., 2011). Zhang et al. (2018) extendieron ese esquema a la escala de píxel, considerando sólo la escorrentía R simulada. Del mismo modo, Aires (2014) describió varios enfoques para integrar la observación por satélite (ponderación simple, interpolación óptima, post filtrado y redes neuronales) con la restricción de cierre del BH, pero sin el uso de modelos de superficie o hidrológicos para obtener una base de datos observacional. Munier y Aires (2018) investigaron la hidrología amazónica usando ese enfoque, y Pellet et al. (2021) añadieron restricciones entre cuencas al cierre del BH usando escorrentías de varias estaciones *in situ* en la cuenca. Ese enfoque permitió la optimización de los conjuntos de datos de satélite y puede ser usada para desarrollar nuevas herramientas en hidrología, como la asimilación de datos GRACE (Zhang et al., 2018). Por ejemplo, en Pellet et al. (2021), los patrones espaciales de  $P$ ,  $ET$  y  $dS$  fueron usados para estimar las escorrentías a lo largo de la red fluvial.

Uno de los principales objetivos de un análisis de BH es la evaluación de la incertidumbre de cada componente del ciclo del agua. Estas caracterizaciones generalmente son específicas de componentes y de lugares. Por ejemplo, Moreira et al. (2019) evaluaron ampliamente la incertidumbre de la estimación por satélite de  $P$  y  $ET$  usando datos *in situ* (cerca de 300 pluviómetros y catorce lugares de monitoreo de flujo), sin embargo, ese enfoque es limitado debido a la escasez de la red de observación. Sahoo et al. (2011) usaron la diferencia con relación a estimaciones no realizadas por satélite, mientras Y. Zhang et al. (2018) y Pellet et al. (2021) usaron la variación de las estimaciones derivadas de observaciones de la Tierra como una aproximación para la incertidumbre. Azarderakhsh et al. (2011) y Munier y Aires (2018) utilizaron una revisión de literatura basada en el estado del arte en la teledetección para estimar las incertidumbres resultantes de los productos de satélite. Los estudios generalmente asumen un valor de entre el 5% al 10% de error para R, mientras que los errores  $dS$  del GRACE son frecuentemente computados de acuerdo con los errores de *leakage* (errores residuales después de filtrado y re-escalamiento) y errores de medición (Rodell et al., 2004). Todos estos estudios coinciden con la contribución relativamente alta de la estimación en el error en el cierre del BH (~40%). Moreira et al. (2019) y Oliveira et al. (2014) encontraron sesgo positivo para la  $P$  al compararlo con datos *in situ*, pero todos los enfoques de integración (Pan et al., 2012; Pelota et al., 2021; Sahoo et al., 2011) resultan en una sobreestimación de  $P$ . Además, Moreira et al. (2019) consideraron que  $dS$  es el segundo en contribuir para el error en el cierre del BH (~25%), mientras Sahoo et al. (2011) y Pellet et al. (2021) encontraron una contribución mayor de la  $ET$  (~30%). Todas las estrategias

de optimización han mostrado que el BH puede ser estimado dentro del intervalo de las incertidumbres basadas en teledetección.

La **Figura 10a** representa la climatología de los cuatro componentes del agua en tres cuencas, utilizando varios conjuntos de datos para cada componente. Las tres cuencas son: norte de la cuenca del río Negro, aguas abajo de la estación Serrinha, la cuenca amazónica aguas abajo de la estación de Manacapuru y la cuenca sur aguas arriba de la estación Hacienda (Fz) Vista Alegre. La estación climatológica (o sea, el ciclo anual) de todos los componentes del agua son representados en  $\text{mm mes}^{-1}$ . Todos los productos de satélite tienen sesgo e incertidumbres, pero este análisis multicomponente puede aislar los patrones espaciales a lo largo de la cuenca amazónica. Por ejemplo, los ciclos anuales del BH difieren en las cuencas norte y sur. Según relata la literatura (Espinoza et al., 2019b; Marengo, 2005), sobre la cuenca sur, la  $P$  es movida por los monzones con pico en enero y tiene mayores variaciones estacionales (por ejemplo, banda mínima-máxima) y promedio anual menor que en la cuenca norte, donde la  $P$  alcanza su pico en mayo. La estacionalidad de la  $P$  conduce  $R$  sobre todas las cuencas (norte y sur) con un intervalo de tiempo de uno a dos meses. Sobre la cuenca centro-oeste,  $R$  puede ser mayor que la  $P$  por un mes determinado y el pico es de cerca de 4 meses relacionado a la escorrentía y los tiempos de viaje de las aguas dentro de la cuenca (Sorribas et al., 2020).  $dS$  está en fase con  $a$   $P$  en la cuenca sur, pero muestra determinada estación sobre las cuencas de los ríos Negro y Blanco:  $dS$  es igual a cero durante la estación seca y existe una transición lineal entre el máximo y el mínimo. A lo largo de esas cuencas,  $dS$  se volvió negativo mientras  $R$  estaba aumentando y alcanzó su máximo 2 meses después. Esto ilustra el efecto del almacenamiento de agua en la llanura de inundación antes de liberarla en el río. La variación estacional de la  $ET$  es más débil, pero su pico parece estar en fase con la  $P$ , sobre la cuenca sur, presentando un comportamiento limitado por la disponibilidad de agua, mientras el pico de la  $ET$  sigue el mes mínimo de  $P$  en la cuenca norte de un sistema limitado por la energía (Maeda et al., 2017). En Pellet et al. (2021), la corrección de la  $ET$  basada en el cierre del balance hídrico aumenta el impacto de la limitación de  $ET$  por disponibilidad de agua sobre la cuenca central y la limitación por disponibilidad de energía sobre el norte de la Amazonía. En el sur de la cuenca, durante los meses secos (JJA), la  $ET$  es mayor que a  $P$  y el agua que evapotranspira proviene del almacenamiento del suelo que continúa perdiendo agua hasta noviembre. Para esta estación, el papel de la  $ET$  en el ciclo del agua es relativamente más importante en la estación seca que en la estación lluviosa (Marengo, 2005).



**Figura 10:** a) climatología estacional de todos los componentes del agua: precipitación (P), evapotranspiración (ET), cambio de almacenamiento de agua (dS) y escorrentía (R) descritos por uno o varios conjuntos de datos. b) Función de Densidad de Probabilidad (PDF) del cierre del BH se muestran a escala subcuenca (a la derecha). La PDF proporciona el sesgo y la varianza del error del cierre del BH.

Para investigar el error en el cierre del BH relacionado al sesgo y a la incertidumbre de todos los componentes del agua, la **Figura 10b** muestra la Función de Densidad de Probabilidad (PDF) de esos errores en la escala de subcuencas. Espacialmente, hay un gradiente en el promedio del PDF entre las subcuencas del oeste y del sur. Las subcuencas del oeste tienen falta de agua (sesgo negativo en el PDF), mientras las subcuencas del sur tienen exceso de agua (sesgo positivo). Este gradiente fue relatado por Builes-Jaramillo y Poveda (2018). Además, la varianza del desequilibrio del BH aumenta de sur a norte con el promedio anual de  $P$ , sugiriendo que gran parte del desequilibrio se debe a  $P$  (Moreira et al., 2019; Pelota et al., 2021). La estrategia de optimización basada en el cierre del BH lleva a una mayor corrección del componente hídrico sobre subcuencas del oeste y centrales (Pellet et al., 2021).

Las demás incertidumbres de precipitación de los productos de satélite calibrados globalmente se deben, principalmente, al aumento de los errores de medición de precipitación de los productos que registraron durante la estación lluviosa y a la falta de medidores in situ para la calibración (Moreira et al., 2019). La hidrología amazónica podría beneficiarse con el uso de una red pluviométrica consolidada, como la del sistema de monitoreo HYBAM (Espinoza Villar et al., 2009b; Guimberteau et al., 2012), para obtener un producto generado por satélite y calibrado regionalmente


para precipitación. Su densidad de pluviómetros sobre la cuenca amazónica es mayor que el conjunto global de datos pluviométricos generalmente usados para calibrar los productos generados por satélite (Guimberteau et al., 2012).

La estimación de la *ET* en la cuenca amazónica continúa siendo un desafío (ver capítulo 3). En la **Figura 10**, el uso de diferentes conjuntos de datos de *ET* puede llevar a una diferencia de 30-50 mm mes<sup>-1</sup>, que representan hasta un 50% del valor de la *ET*. De acuerdo con Moreira et al. (2019), la consolidación de un método sólido para estimar incertidumbres también es importante para mejorar nuestro entendimiento sobre las incertidumbres de los componentes del ciclo del agua obtenidos por teledetección. Con relación a la *P*, una de las fuentes de mejoría será con el uso extensivo y el aumento de una red de medición de flujos para profundizar nuestro conocimiento sobre las incertidumbres de los modelos de *ET*.

Una mejoría técnica en el enfoque de optimización basada en BH puede venir con la resolución espacial del análisis. El análisis del BH ha sido hecho, principalmente, en la escala de cuenca (Munier y Aires, 2018; Sahoo et al., 2011), aunque varios estudios hayan sido realizados en subcuencas (Azarderakhsh et al., 2011; Pellet et al., 2021). Con el uso de informaciones topográficas, debe ser posible considerar la escorrentía superficial y reducir la escala de los productos generados por satélite mientras se hace el cierre del BH en nivel de píxel.

Como se ha discutido en el capítulo 8, se han hecho tentativas de descomponer el TWS obtenido por el satélite GRACE para los componentes superficiales (Frappart et al., 2012; Papa et al., 2013) y subsuperficiales (Frappart et al., 2019). Sería posible también buscar esta descomposición en el contexto de un análisis terrestre completo del BH, especialmente cuando estimaciones por satélite confiables de humedad del suelo sobre la Amazonía estén disponibles. Como se ha mencionado en el capítulo 5, también serían necesarios los conjuntos de datos de largo plazo de extensión de agua superficial (Aires et al., 2017; Parrens et al., 2019; Prigent et al., 2020).

La misión GRACE *Follow-on* lanzada en 2018, la extensión del registro de datos TRMM con la misión GPM, y el lanzamiento de la misión SWOT proporcionarán un conjunto completo de nuevas observaciones oriundas de satélites. La continuidad de estas misiones que monitorean los componentes del agua es fundamental para mejorar nuestra comprensión de los patrones de hidrología por intermedio de análisis más precisos del BH, permitiendo la evaluación de tendencias de largo plazo.



10

# Modelado del *ciclo hidrológico* de la Amazonía y sus áreas húmedas

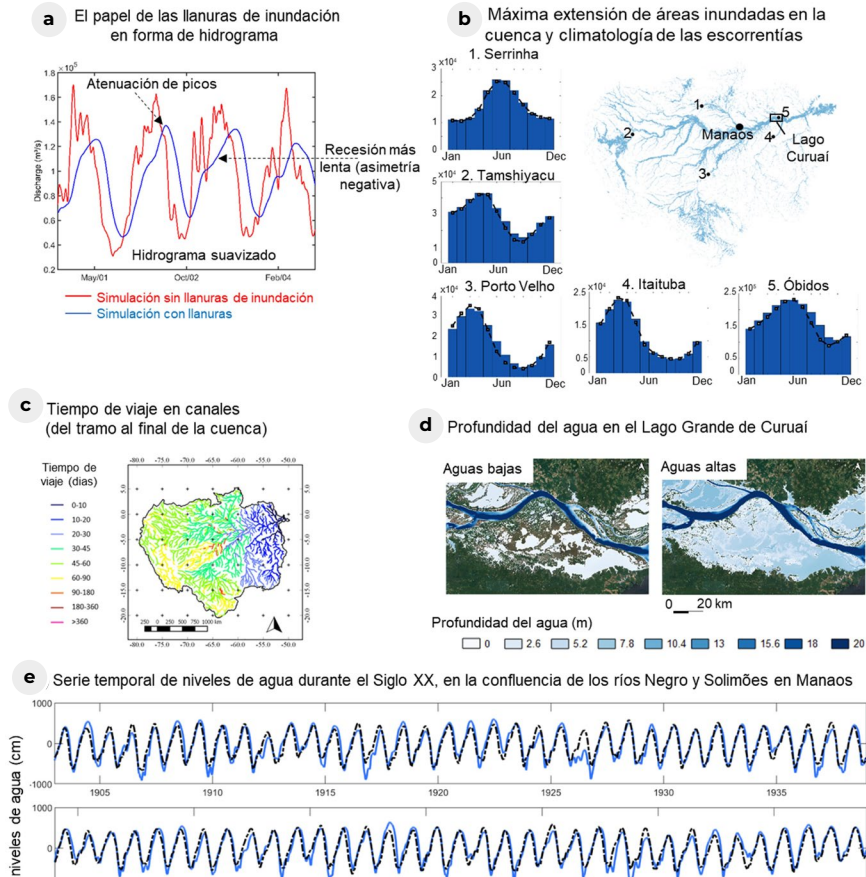
Ayan Fleischmann  
Sly Wongchuig  
Rodrigo Paiva  
Fabrice Papa  
John Melack  
Fabien Durand  
Alice Fassoni-Andrade

Existen modelos hidrológicos e hidráulicos que representan los almacenamientos y flujos del ciclo del agua por medio de un conjunto de ecuaciones matemáticas. Estos modelos son herramientas adecuadas para entender procesos hidrológicos amazónicos, como el cambio de agua entre ríos y llanuras de inundación, interacciones entre aguas subterráneas y superficiales (Miguez-Macho y Fan, 2012; Paiva et al., 2013a) y comportamientos de inundaciones y sequías pasadas (Wongchuig et al., 2017). También son bastante útiles para estimar variables en regiones sin datos *in situ* (por ejemplo, escorrentía de ríos de forma distribuida; Wongchuig et al., 2019) y comprender escenarios de alteración hidrológica debido a la deforestación, regularización de reservorios y cambios climáticos (Arias et al., 2020; Guimberteau et al., 2017; Júnior et al., 2015; Lima et al., 2014; Mohor et al., 2015; Pokhrel et al., 2014; Pontes et al., 2019; Sorribas et al., 2016; Zulkaffi et al., 2016).

Durante las últimas décadas, muchos modelos fueron aplicados en la Amazonía a diferentes escalas, desde una escala de tramo (o sea, estudios más detallados abordando algunos kilómetros a lo largo de los sistemas río-llanura) hasta una escala de toda la cuenca. Los datos de teledetección se adoptan generalmente como forzantes (por ejemplo, lluvia), también como informaciones auxiliares para estimar valores de parámetros (por ejemplo, datos topográficos), o para validación, calibración y asimilación en modelos (por ejemplo, escorrentía y niveles de agua del río). Se puede diferenciar entre (i) modelos hidrológicos que simulan procesos verticales como evapotranspiración, infiltración de agua en el suelo y mecanismos de generación de escorrentía superficial, y (ii) modelos hidráulicos de aguas superficiales, que representan la propagación de la escorrentía a lo largo de los ríos y las llanuras de inundación, mediante ecuaciones de base física y que permiten el cálculo de variables como la elevación y la pendiente del agua superficial, la escorrentía, y la extensión y almacenamiento de aguas superficiales (**Figura 11**).

Más recientemente, los llamados modelos hidráulicos-hidrológicos fueron desarrollados para unir los puntos fuertes de ambos enfoques (Fleischmann et al., 2020; Hoch et al., 2016; Paiva et al., 2013a), existiendo casos en que esquemas simplificados de inundación están representados dentro de modelos hidrológicos para estimar la dinámica de inundación de áreas húmedas. La **Tabla 6** resume las diferencias entre los dos enfoques.

La primera generación de modelos en la Amazonía contó con el desarrollo de modelos hidrológicos de gran escala, comenzando por los estudios de Vörösmarty



**Figura 11:** Aplicaciones recientes de modelos hidrológicos e hidráulicos en la cuenca Amazónica añadieron nuevas perspectivas sobre (a) el papel de las llanuras de inundación fluvial en la forma de hidrograma (Fleischmann et al., 2016), (b) estimación de escorrentías de largo plazo (Paiva et al., 2013a), (c) estimación de tiempos de viaje del agua (Sorribas et al., 2020), y proporcionó la estimación de (b) la climatología de la escorrentía de largo plazo (Paiva et al., 2013a), (d) las profundidades de agua de llanuras de inundación (ejemplo para el Lago Grande de Curuai, las temporadas de agua alta y baja del 2014; Rudorff et al., 2014a) y (e) la generación de series temporales de largo plazo de niveles de agua (ejemplo para la localización de Manaus; Wongchuig et al., 2019).

et al. (1989), Costa y Foley (1997) y Coe et al. (2002). Con el advenimiento de los conjuntos de datos de teledetección y mayor capacidad computacional, diversos modelos fueron desarrollados, mejorando la representación física de los procesos hidrológicos, aumentando la resolución espacial del modelo y pasando de estimaciones mensuales a diarias (Beighley et al., 2009; Coe et al., 2008; Luo et al., 2017; Miguez-Macho y Fan, 2012; Paiva et al., 2013a). Estos modelos generalmente adoptan los siguientes datos de entrada basados en teledetección: precipitación con

el producto TMPA (Collischonn et al., 2008; Getirana et al., 2012; Zubieta et al., 2015) y más recientemente GPM-IMERG (Zubieta et al., 2017) y MSWEP (Beck et al., 2017a); propiedades del paisaje que incluyen longitudes y pendientes del terrenos, basadas en MDEs (la mayoría de los estudios usando el SRTM); y mapas de uso de suelo y vegetación (mapas globales como los de la FAO, o regionales como los mapas de suelo del proyecto brasileño RadamBrasil). Los conjuntos de datos de validación más comunes que provienen de teledetección son el nivel del agua proveniente de altimetría por satélite (capítulo 4), la extensión de agua superficial (capítulo 5) y el almacenamiento total de agua (capítulo 8).

Estas aplicaciones de modelos permitieron profundizar nuestro conocimiento sobre

**TABLA 6**

Resumen de las principales diferencias entre modelos hidrológicos e hidráulicos de aguas superficiales, con ejemplos de aplicaciones de modelos en la cuenca Amazónica. Algunos ejemplos se presentan en ambas categorías, una vez que se refieren a modelos hidrológico-hidráulicos.

|                                                     | <b>MODELOS HIDROLÓGICOS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>MODELOS HIDRÁULICOS DE AGUAS SUPERFICIALES</b>                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Proceso principal simulado</b>                   | Procesos verticales (por ejemplo, evapotranspiración, infiltración de agua en el suelo y generación de escorrentía superficial) y dinámica de las aguas subterráneas.                                                                                                                                                        | Interacción entre ríos y llanuras de inundación (por ejemplo, almacenamiento en llanura de inundación, efectos de remanso).                                                                                                                                                                                            |
| <b>Forzante principal (condiciones de contorno)</b> | Precipitación (lluvia).                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Escorrentía, nivel del agua del río y precipitación.                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Principales variables de salida</b>              | Balance hídrico, evapotranspiración, almacenamiento de agua en el suelo y aguas subterráneas, escorrentía.                                                                                                                                                                                                                   | Áreas inundadas, profundidades del agua en las llanuras de inundación, perfiles longitudinales del nivel del agua en los ríos, escorrentía.                                                                                                                                                                            |
| <b>Resultados típicos</b>                           | Cuantificación de los componentes del balance hídrico, división de almacenamiento de agua entre reservorios superficiales y subterráneos, dinámica de evapotranspiración, impactos de la acción humana en los componentes del balance hídrico (por ejemplo, cambios en la partición de la precipitación en ET y escorrentía) | Almacenamiento de agua en las llanuras de inundación y tiempo de residencia, tiempo de viaje del agua a través de los sistemas de llanuras de inundación, curvas de calibración (relaciones entre nivel del agua y escorrentía) para uso operacional, impactos de la acción humana en la dinámica de las inundaciones. |
| <b>Ejemplos de estudios</b>                         | Beighley et al. (2009); Coe et al. (2002); Costa y Foley (1997); Cuartas et al. (2012); Miguez-Macho y Fan (2012); Paiva et al. (2013c); Vörösmarty et al. (1989).                                                                                                                                                           | Fleischmann et al. (2020); Garambois et al. (2017); Getirana et al. (2012); Miguez-Macho y Fan (2012); Paiva et al. (2013a); Paris et al. (2016); Pinel et al. (2019); Rudorff et al. (2014b); Sorribas et al. (2020); Trigg et al. (2009); Wilson et al. (2007); Yamazaki et al. (2012b).                             |

la partición del agua a nivel del suelo, agua superficial y agua subterránea, y actuaron como laboratorios para mejorar modelos hidrológicos globales, que por su parte son elementos fundamentales de los modelos del Sistema Terrestre. La evaluación de la superficie terrestre y de los modelos hidrológicos e hidrodinámicos globales en la Amazonía ha sido un procedimiento estándar en el desarrollo de modelos y proyectos de comparación de modelos (Alkama et al., 2010; Decharme et al., 2008; Getirana et al., 2017b, 2014, 2012; Guimberteau et al., 2017, 2014; Pilotto et al., 2015; Towner et al., 2019; Yamazaki et al., 2011, 2012a; Zulkaffi et al., 2013). A escala de cuenca, la fracción del almacenamiento total de agua correspondiente a las aguas superficiales fue estimada en un 56%, un 41% y un 27% por Paiva et al. (2013a), Getirana et al. (2017) y Pokhrel et al. (2013), respectivamente. Estos valores fueron comparados con las estimaciones basadas en teledetección (Frappart et al., 2019, 2012; Papa et al., 2013). Además, la *ET* promedio a escala de cuenca fue estimada entre 2,39 a 3,26 mm día<sup>-1</sup> por un conjunto de modelos (Getirana et al., 2014), y en 2,72 mm día<sup>-1</sup> (Paiva et al., 2013a), lo que es levemente inferior a los valores a escala de cuenca mediante el uso de teledetección (Paca et al., 2019) y una red *in situ* de torres de flujo (método de covarianza de vórtices turbulentos; Costa et al. (2010), que estimó valores de 3,11 a 3,58 mm día<sup>-1</sup> a través de un gradiente que va del sur del bosque Amazónico hasta el bosque húmedo ecuatorial. El papel del almacenamiento de agua en el suelo para sostener la *ET* de la estación seca en la Amazonía fue mostrado por experimentos de modelado a escala local (Fang et al., 2017) y de cuenca (Getirana et al., 2014). Algunos estudios abordaron el papel de las aguas subterráneas y del almacenamiento en el suelo en el balance hídrico, y la importancia de su representación en modelos hidrológicos. Las aplicaciones en las áreas de cabecera mostraron el predominio de las aguas subterráneas en el almacenamiento de agua (Cuartas et al., 2012; Niu et al., 2017), según estudios de monitoreo *in situ* (Hodnett et al., 1997). Miguez-Macho y Fan (2012) sugirieron el mismo patrón en toda la cuenca. Su modelo también indicó una importante retroalimentación en dos vías entre las áreas inundadas y las aguas subterráneas y la existencia de grandes áreas no sujetas a inundaciones superficiales en toda la cuenca donde un alto nivel de napa freática sería responsable por mantener el alto nivel de agua en el suelo durante todo el año. La simulación de múltiples capas de suelo en el modelo de superficie terrestre ORCHIDEE, en contraste con modelos simples del tipo *bucket* (“balde”) de dos capas, también fue demostrada para mejorar la representación de la dinámica del agua en el suelo y del almacenamiento total de agua en la Amazonía, especialmente para las regiones más secas en las subcuencas del sur (Guimberteau et al., 2014).

Entre los modelos hidráulicos de aguas superficiales, el estudio pionero de Wilson et al. (2007) es uno de los primeros experimentos de modelado hidráulico realizado en grandes dominios, lo que más tarde llevó al desarrollo de muchas aplicaciones globales de modelos hidrodinámicos (Bates et al., 2018). Los autores aplicaron el modelo LISFLOOD-FP en un tramo de 260 km del río Solimões y estimaron el intercambio de agua río-llanura en por lo menos un 40% del volumen del río en ese tramo. Para un tramo relativamente diferente en la Amazonía Central (de São Paulo, de Olivença a Óbidos), Richey et al. (1989) estimaron esa proporción en un 30% con base en un método de propagación hidráulica más simple, mientras Sorribas et al. (2020) estimaron un valor del 40% para el sistema amazónico, basándose en un modelado hidráulico a gran escala (ver más adelante). Los autores también constataron que la precisión del modelo fue mayor durante el período de aguas altas, como también ha sido relatado en estudios recientes (Pinel et al., 2019; Rudorff et al., 2014b), probablemente debido a la mala representación de las heterogeneidades del terreno y pequeños lagos desconectados durante la estación seca. Además, dado que el intercambio de agua río y la llanura ocurre frecuentemente a través de canales de la llanura de inundación y diques rotos, que dificultan su conceptualización como un simple flujo que se desborda del canal fluvial (Trigg et al., 2012), los modelos hidráulicos tienen el desafío de estimar parámetros efectivos del canal que representen esos procesos complejos (Fleischmann et al., 2018; Trigg et al., 2009). Hay esfuerzos recientes que vienen abordando este tema, considerando, por ejemplo, la incorporación en modelos de diferentes formas de sección transversal (Neal et al., 2015), así como la asimilación de la altimetría por satélite para inferir la batimetría de canales (Brêda et al., 2019; Garambois et al., 2020; Pujol et al., 2020). Otras aplicaciones a escala de lagos de várzea fueron desarrolladas por Bonnet et al. (2008, 2017), Ji et al. (2019), Trigg et al. (2009) y Wilson et al. (2007) y abordaron el papel relativo de la escorrentía local y la afluencia fluvial como el principal aporte de agua. Los estudios abordaron desde sistemas dominados por la escorrentía local en el Lago Calado (Ji et al., 2019; Lesack y Melack, 1995) a los dominados por el río en los sistemas del Lago Grande de Curuai (**Figura 11d**) y del Lago Janauacá (Bonnet et al., 2017, 2008; Pinel et al., 2019; Rudorff et al., 2014a, 2014b), por medio de patrones de flujo, a veces canalizados, a veces difusos. En el caso de los lagos Curuai y Janauacá, el río Amazonas o Solimões fue responsable del 82% y 93% de los flujos anuales que entran en la llanura de inundación, respectivamente (Bonnet et al., 2017; Rudorff et al., 2014a).

El primer modelo de inundación a escala de cuenca fue introducido por Coe et

al. (2002), y posteriormente se desarrollaron numerosos modelos hidrológicos que se acoplaron a esquemas de inundación (Coe et al., 2008; Getirana et al., 2017b, 2012; Hoch et al., 2016; Luo et al., 2017; Miguez-Macho y Fan, 2012; Paiva et al., 2013a; Yamazaki et al., 2012b, 2011). Los modelos presentan diversos grados de representación física, con la simulación de llanuras de inundación pasando de componentes de almacenamiento simples a esquemas hidráulicos dinámicos, que pueden representar procesos relevantes como efectos de remanso.

Para los modelos hidráulicos, la información adicional basada en teledetección requerida como datos de entrada incluye la geometría del canal del río, como el ancho y la topografía de llanura de inundación, obtenida generalmente por MDEs (principalmente SRTM y sus derivados con eliminación de vegetación para representar el terreno descubierto; ver Baugh et al. (2013), O'Loughlin et al. (2016), Yamazaki et al. (2019) y Fassoni-Andrade et al. (2020b)). Para modelos hidráulicos a escala local, la parametrización adicional suele implicar la definición de la rugosidad de la llanura de inundación basada en mapas de cobertura del suelo (Pinel et al., 2019; Rudorff et al., 2014b). Los conjuntos de datos de validación de la teledetección son generalmente la elevación y la extensión de las aguas superficiales (Hall et al., 2011; Schumann et al., 2009). Esas aplicaciones de modelos hidráulicos revelaron la combinación de efectos de remanso y almacenamiento en llanuras de inundación en el proceso de propagación de crecidas a lo largo de los ríos amazónicos (Paiva et al., 2013a), causando fuerte atenuación y retraso de hasta 2,5 meses. El almacenamiento en la llanura de inundación también es responsable por la asimetría negativa de los hidrogramas en los principales ríos de la Amazonía, con una crecida más lenta y una recesión más rápida (Fleischmann et al., 2016; **Figura 11a**). Sorribas et al. (2020) utilizaron métodos de rastreo de partículas para estimar los tiempos de viaje de las aguas superficiales a lo largo de la cuenca del Amazonas en 45 días (mediana), con un 20% de las aguas del río Amazonas fluyendo a través de llanuras de inundación (**Figura 11c**).

Aunque las aplicaciones a escala de cuenca hayan empleado modelos unidimensionales (dirección longitudinal a lo largo de los ríos), la necesidad de representar el flujo difuso bidimensional en llanuras de inundación, especialmente durante el retroceso de las aguas, fue destacada por Alsdorf et al. (2005), quienes combinaron datos de interferometría con un modelo simple basado en la continuidad para mostrar que los cambios en el almacenamiento en las llanuras de inundación disminuye con la distancia desde el canal principal. Generalmente, el nivel del agua en el sistema

río-llanura no es completamente horizontal y el río con la llanura de inundación no está homogéneamente mezclado (Alsdorf et al., 2007), como lo asumen varios modelos unidimensionales. Si bien se ha realizado una caracterización adecuada de las complejas interacciones río-llanura de inundación con modelos hidráulicos a escala local (Pinel et al., 2019; Rudorff et al., 2014b), esto aún está por desarrollarse a escala regional –por ejemplo, para poder inferir patrones de inundación en altísima resolución (por ejemplo, 30 metros de resolución espacial), para toda la Amazonía central, con una resolución semanal a mensual–. Por último, se ha sugerido el acoplamiento completo entre modelos hidrológicos e hidráulicos para mejorar la representación de las interacciones entre la llanura de inundación con la tierra firme, por ejemplo, por medio de una representación más adecuada de la evaporación en aguas abiertas en áreas inundadas (Getirana et al., 2017a). Sin embargo, estudios recientes han sugerido que este proceso tiene un impacto relativamente bajo en las estimaciones de *ET* total debido a que la *ET* está generalmente limitada por la energía (y no por disponibilidad de agua) en la Amazonía. Se espera una conclusión diferente para los humedales semiáridos (Fleischmann et al., 2018).

La validación a escala regional de los modelos de inundación fue realizada con las estimaciones de extensión de aguas superficiales (Getirana et al., 2012; Luo et al., 2017; Paiva et al., 2013b; Wilson et al., 2007; Yamazaki et al., 2011), basándose en los productos de Hess et al. (2003), GIEMS de Prigent et al. (2007) y, más recientemente, con la base de datos SWAF (Parrens et al., 2017) (ver capítulo 5 para una descripción de estos productos). Aunque el ciclo estacional de las inundaciones suele estar bien capturado por la mayoría de los modelos, las estimaciones divergen en términos de magnitud (Fleischmann et al., 2020), y la fusión entre diferentes técnicas probablemente sea la solución ideal. Sin embargo, son necesarios experimentos de validación más detallados, como por ejemplo con mapas basados en datos SAR, aunque ya hayan sido desarrolladas muchas clasificaciones de datos SAR para áreas húmedas individuales de la Amazonía (capítulo 5). Una aplicación reciente utilizó imágenes ALOS/PALSAR para validación de un modelo a escala local en el sistema de la llanura de inundación Janauacá (Pinel et al., 2019).

En lo que se refiere al nivel del agua, los modelos hidráulicos suelen ser capaces de representar las anomalías de forma satisfactoria. Sin embargo, las estimaciones de los valores absolutos son generalmente menos precisas (Fleischmann et al., 2019), aun habiéndose alcanzado buenos resultados (Wilson et al., 2007). Las centenas de estaciones virtuales disponibles (ver capítulo 7) proporcionaron mejoras revolucionarias de los sistemas de modelización, especialmente en términos de

validación de modelos distribuidos con docenas de estaciones virtuales (Fleischmann et al., 2020; Getirana et al., 2017b; Paiva et al., 2013a) y la reciente calibración y asimilación de modelos (Brêda et al., 2019; Oliveira et al., 2021). Los ejercicios de validación arrojaron coeficientes de Nash-Sutcliffe superiores a 0,6 para el 60% de las 212 estaciones virtuales ENVISAT evaluadas por Paiva et al. (2013a), y errores de amplitud inferiores a 0,8 m y sesgo absoluto inferior a 2,3 m para la mayoría de las estaciones analizadas por Yamazaki et al. (2012b). La combinación de la altimetría por satélite con un modelo hidráulico para un tramo sin datos *in situ* del río Xingú llevó a Garambois et al. (2017) a proponer el concepto de visibilidad hidráulica por medio de conjuntos de datos de teledetección, o sea, utilizar la capacidad de los datos de altimetría por satélite actuales y futuros para estimar correctamente las variables hidráulicas del río. Los datos de altimetría se mostraron relevantes para comprender el funcionamiento hidráulico de tramos complejos no aforados de los ríos Amazónicos, especialmente en los tramos con morfología heterogénea del lecho y fuerte control aguas abajo, lo que provoca grandes efectos en el nivel del agua y la pendiente de las aguas superficiales (Birkett et al., 2002).

Las principales variables de salida que han sido abordadas por los modelos hidrológico-hidráulicos son la *ET*, el almacenamiento de agua en el suelo, el caudal, el nivel del agua y la extensión del agua superficial. Sin embargo, otras variables también son importantes para una comprensión eficaz del ciclo del agua y es necesario que sean mejor limitadas dentro de los sistemas de modelización. Por ejemplo, sólo unos pocos estudios han abordado la velocidad simulada del agua (Días et al., 2011; Fassoni-Andrade, 2020; Pinel et al., 2019) y el almacenamiento de las inundaciones (Fleischmann et al., 2020; Getirana et al., 2017a; Paiva et al., 2013a) en las áreas húmedas Amazónicas, que son variables fundamentales para entender la dinámica de las inundaciones, aunque esta última (almacenamiento de inundaciones) ya haya sido estimada por diferentes métodos de teledetección (ver capítulo 9).

Dado que aún existen incertidumbres tanto en los modelos como en las estimaciones de teledetección, se han desarrollado algunas técnicas de calibración de modelos y asimilación de datos (AD) para mejorar la previsibilidad de los modelos, basándose en la combinación óptima de ambos. La calibración de un modelo fue realizada con altimetría por satélite por Getirana et al. (2013) y Oliveira et al. (2021), mostrando los beneficios del uso de tales conjuntos de datos para una mejoría general del modelo para la estimación del caudal. A su vez, la evaluación de las técnicas de AD (principalmente los métodos basados en el Filtro de Kalman) dentro de la

Amazonía incluyó muchos experimentos con datos de teledetección (por ejemplo, altimetría por satélite), desde una escala de tramo de río a una escala regional (Brêda et al., 2019; Emery et al., 2018; Garambois et al., 2017; Paiva et al., 2013b). Estos estudios mostraron la aplicabilidad de tales métodos para mejorar las estimaciones de los modelos y la representación del ciclo del agua en general. La utilidad de los esquemas de AD para estimar mejor el caudal fue demostrada para previsión (Paiva et al., 2013b), comprensión de eventos extremos pasados (Wongchuig et al., 2019) y estimación del caudal en tiempo casi real (Paris et al., 2016). El estudio de Wongchuig et al. (2019) fue el primero en estimar el caudal de forma espacialmente distribuido para los últimos 100 años, estimando eventos extremos de sequía e inundación en lugares no registrados (**Figura 11e**). Los mismos siguen un patrón general de tendencia significativa de eventos de sequía creciente en el sur y de inundación en las regiones oeste y noroeste de la Amazonía (Callède et al., 2004; Correa et al., 2017; Espinoza Villar et al., 2009a; Lopes et al., 2016; Molina-Carpio et al., 2017). Además del caudal y de niveles del agua, otras variables estimadas por teledetección pueden ser usadas por medio de la AD y podrían ser aplicadas en la Amazonía, por ejemplo, humedad del suelo (Baguis y Roulin, 2017; Crowley et al., 2008; Massari et al., 2015), cambio de almacenamiento de agua terrestre (Khaki et al., 2019, 2018) y extensión de áreas inundadas. Además, la futura misión SWOT proporcionará información innovadora para la modelización hidráulica de los ríos amazónicos. Muchos estudios han discutido la utilidad de la misión para estimar mejor las variables hidráulicas en la Amazonía, desde escalas de tramos de río (por ejemplo, en el bajo río Madera; Brêda et al., 2019) hasta la escala de toda la cuenca (Emery et al., 2020; Wongchuig et al., 2020). Nuevas formas de incorporar los niveles del agua de altimetría por satélite permitirán el desarrollo de la próxima generación de modelos hidráulicos para la Amazonía, con el objetivo de una mejor representación de procesos locales, como la heterogeneidad de la superficie del agua que responde a controles hidráulicos como reducciones de ancho de canal (Garambois et al., 2017; Montazem et al., 2019; Pujol et al., 2020).

La mayoría de las aplicaciones de modelos en áreas húmedas de la Amazonía se concentró en partes específicas de las llanuras de inundación de la Amazonía central o en estudios que contemplaron toda la cuenca amazónica. La simulación de las llanuras de inundación fluviales sigue enfrentando algunas limitaciones para poder ser realizada con precisión sobre sistemas fluviales complejos y dinámicos como los que ocurren al pie de los Andes, que están asociados a múltiples abanicos aluviales, áreas húmedas desconectadas del río principal en términos de aguas superficiales, pero

conectadas por aguas subterráneas (por ejemplo, bosques de pantanos alimentadas por aguas subterráneas; Hamilton et al., 2007), y dinámicas hidrológicas relativamente rápidas, que a la vez dificultan el monitoreo basado en teledetección de variables como la extensión de la inundación y los niveles de agua. Son necesarios más avances en la estimación de la topografía a lo largo de las áreas húmedas boscosas y los canales adyacentes, así como en técnicas de modelos acoplados entre aguas subterráneas y de superficie. Además de las llanuras de inundación fluviales, existen otros tipos de áreas húmedas en la cuenca amazónica, muchas veces denominadas áreas húmedas interfluviales (Junk et al., 2011). Éstas combinan procesos de inundación endógeno y exógeno en diferentes grados (Bourrel et al., 2009), y están más sujetas a precipitaciones locales y menos conectadas a los ríos adyacentes (Reyes et al., 2019). También están asociadas a diferentes tipos de vegetación y ecosistemas (por ejemplo, sabana, bosques, pastizales). Aunque los modelos hidráulicos unidimensionales se hayan mostrado satisfactorios para simular los procesos a lo largo de las llanuras de inundación fluviales (Trigg et al., 2009), las áreas húmedas interfluviales requieren una simulación bidimensional para capturar adecuadamente el flujo difuso en el área húmeda. Fleischmann et al. (2020) presentaron por primera vez una evaluación de un modelo centrado en las áreas húmedas interfluviales del río Negro, asociadas a eventos neotectónicos y a ambientes de campinas y campinaranas dentro del bosque amazónico (Rossetti et al., 2017), por lo tanto, difieren mucho de la Amazonía central en lo que se refiere a inundaciones, vegetación y características del suelo. Belger et al. (2011) utilizaron una serie temporal de imágenes Radarsat y mediciones *in situ* del nivel del agua y lluvia local para estimar cambios en la inundación de un área húmeda interfluvial de la cuenca del río Negro. Se demostró que los modelos unidimensionales no son realistas para simular la elevación de la superficie del agua en esas áreas. Futuros estudios deben abordar más a fondo la hidrología de estos sistemas complejos de áreas húmedas interfluviales, incluyendo los *Llanos de Moxos* (Hamilton et al., 2004; Ovando et al., 2018), Roraima (Hamilton et al., 2002) y las áreas húmedas interfluviales peruanas (Kvist y Nebel, 2001), buscando entender mejor las diferencias hidrológicas entre llanuras de inundación y áreas húmedas interfluviales y, a la vez, ayudando a comprender los diversos ecosistemas amazónicos particulares que dependen de ellos, así como las diferencias en cuanto a conectividad entre río y áreas húmedas.

La parte aguas abajo de la cuenca amazónica permanece relativamente inexplorada en términos de modelado hidráulico y teledetección. Esto puede ser explicado por la dinámica compleja del estuario, en el que influye una amplia gama de escalas de

tiempo, desde las mareas con variaciones intradiarias que se propagan río arriba a partir del Océano Atlántico, a través del delta del Amazonas, hasta las escalas temporales estacionales e interanuales conducidas por la hidrología de la cuenca. Además, los efectos de las mareas permanecen sensibles hasta cerca de 900 km aguas arriba de la desembocadura del río (Kosuth et al., 2009). Uno de los desafíos en el *continuum* hidráulico del tramo bajo del río Amazonas es comprender los papeles relativos del forzamiento aguas arriba y de la influencia oceánica en la formación de los patrones espaciales y temporales de variabilidad del nivel del agua, de la velocidad de flujo y de la extensión de la inundación a lo largo del curso del estuario. Iniciativas prometedoras se han llevado a cabo para modelar este complejo estuario, basándose principalmente en modelos de circulación oceánica costera, ya sea en configuraciones bidimensionales (Gabioux et al., 2005; Gallo y Vinzon, 2005) o, más recientemente, por medio de modelado tridimensional completo (Molinas et al., 2020). Estos estudios, en particular, arrojan luz sobre el comportamiento diferenciado de las mareas durante su propagación aguas arriba en el estuario amazónico. Sin embargo, hasta la fecha se carece de un marco de modelado hidráulico completo y de alta resolución, que contemple la compleja geometría de todo el *continuum* hidráulico del bajo Amazonas, y que tenga en cuenta toda la gama de interacciones existentes entre los factores de forzamiento oceánicos y fluviales. Esto se puede explicar, al menos parcialmente, por el hecho de que el monitoreo de la variabilidad del nivel del agua es fundamental para el éxito de un modelado hidráulico del tramo bajo del río Amazonas con fines de calibración/validación; la altimetría satelital ha sido poco utilizada en el estuario amazónico. Por último, los nuevos datos de observación de la Tierra por satélite, como en el caso de niveles del agua derivados de la misión SWOT (Biancamaria et al., 2016), ancho de los canales de agua (Allen y Pavelsky, 2018; Yamazaki et al., 2014), topografía de las llanuras de inundación (Fassoni-Andrade et al., 2020b), y estimaciones de humedad del suelo (SMOS, SMAP), así como nuevos conjuntos de datos de precipitación, por ejemplo los provenientes del uso de datos de humedad del suelo como el SM2RAIN Brocca et al., 2013, 2014), misiones de gravimetría (GRACE *Follow-On*), y técnicas para recuperar almacenamientos de aguas subterráneas (por ejemplo, Frappart et al., 2019), darán espacio a grandes oportunidades para la próxima década de desarrollo del modelado hidrológico e hidráulico en la cuenca amazónica.

Uno de los principales objetivos de la comunidad del modelado en el Amazonas debería ser avanzar hacia modelos de superresolución, capaces de proporcionar estimaciones localmente relevantes en todos los lugares (Bierkens et al., 2015;

Fleischmann et al., 2019; Wood et al., 2011), así como una mejor representación de todos los procesos dentro del ciclo del agua, incluyendo la dinámica de las aguas subterráneas que normalmente es poco representada en la mayoría de los modelos hidrológicos, normalmente enfocados en las aguas superficiales (Miguez-Macho y Fan, 2012; Sutanudjaja et al., 2018). El avance hacia modelos de superresolución se ha promovido a escala global debido al desarrollo de nuevos métodos numéricos, conjuntos de ecuaciones e ingeniería de *software*, así como por el aumento de la capacidad computacional (Bates et al., 2018). Dichos sistemas de modelado podrían, entonces, ser integrados a modelos de otros procesos, como se ha hecho recientemente por investigadores con el objetivo de comprender los impactos de las inundaciones en la fotosíntesis y la biosfera en general (Castro et al., 2018), las interacciones entre las aguas superficiales y la atmósfera (Santos et al., 2019), los transportes de sedimentos y su almacenamiento en llanuras (Fagundes et al., 2021; Rudorff et al., 2018), el almacenamiento y las emisiones de carbono a través de humedales y tierras altas (Hastie et al., 2019; Lauerwald et al., 2020), y la dinámica de los ciclos biogeoquímicos a escala de cuenca o sobre humedales (Guilhen et al., 2020). Todos estos esfuerzos requerirán datos adicionales de teledetección y harán que avance nuestra predictibilidad de los efectos de los cambios ambientales en curso en la cuenca amazónica.



# **Ecosistemas** *Acuáticos*

John Melack  
Jefferson Ferreira-Ferreira

Las áreas húmedas amazónicas contienen una biota diversificada y son importantes para la biogeoquímica y economía regional (Hess et al., 2015; Junk, 1997; Junk et al., 2011; Melack et al., 2009). Las llanuras de inundación amazónica contienen miles de lagos y kilómetros cuadrados de áreas cubiertas por vegetación y se caracterizan por grandes variaciones estacionales e interanuales de profundidad y extensión de la inundación. Las condiciones hidrológicas son esenciales para la estructura y función ecológica de estos ecosistemas acuáticos. La hidrología de las llanuras de inundación es compleja porque combina flujos de entrada locales y flujos regionales con gran variabilidad espacial. Las aplicaciones de las innovaciones en teledetección, mediciones hidrológicas y modelado para la investigación de las llanuras de inundación de la Amazonía han conquistado avances en la comprensión de la ecología de llanuras inundables.

Los principales aspectos de la hidrología relevantes para los ecosistemas de llanuras de inundación en la Amazonía y en otros lugares son: amplitud, duración, frecuencia y previsibilidad de las variaciones de escorrentía e inundación (Melack y Coe, 2021). Dos estructuras conceptuales de relevancia general para los sistemas fluviales han sido motivadas por estudios en la Amazonía. Junk et al. (1989) destacaron la importancia del pulso de inundación y definieron las llanuras de inundación en cuanto a nivel de la inundación, condiciones físicas y químicas asociadas y adaptaciones de organismos a esas condiciones; Junk (1997) elaboró esos conceptos para la Amazonía central. Mertes (1997) examinó aspectos hidrológicos de la inundación de los sistemas de llanuras de inundación utilizando teledetección y modelos simples, e introdujo el concepto de *perirheic zone*, la zona de mezcla de agua del río y de la captación local. Ambos desarrollos conceptuales han sido soportados por mediciones hidrológicas de los lagos de llanuras de inundación de la Amazonía, el primero por Lesack y Melack (1995), posteriormente modelado por Ji et al. (2019) y Bonnet et al. (2008, 2017). Las llanuras de inundación desempeñan un papel importante en el equilibrio del carbono y en la biogeoquímica del nitrógeno de la cuenca amazónica y son lugares de gran flujo de metano y de dióxido de carbono para la tropósfera, así como cuentan con altos índices de producción de plantas acuáticas. Existen estudios proyectados para estimar la magnitud y la variabilidad de flujos de gas y la productividad en la Amazonía han combinado la teledetección con datos de campo de formas innovadoras y aplicables a los ecosistemas acuáticos en general. Melack et al. (2004) usaron flujos de metano en hábitats específicos combinados con cambios estacionales en la extensión del agua superficial de los hábitats acuáticos, provenientes de teledetección por microondas activos y pasivos, para estimar flujos

regionales de metano. En el tramo principal del río Solimões-Amazonas y sus llanuras de inundación, se estima que las emisiones anuales de metano varían entre aproximadamente 0,7 y 2,4 Tg C por año (Melack et al., 2004). Además, los flujos de metano por m<sup>2</sup> fueron más elevados durante los niveles más bajos de agua que durante el período de aguas altas en un lago de llanura de inundación de la Amazonía, y los flujos en las proximidades de la vegetación fueron mayores que los que se presentaban en hábitats de aguas abiertas (Barbosa et al., 2020). Richey et al. (2002) y Melack (2016) también usaron estimaciones de extensión de agua superficial para calcular flujos de dióxido de carbono. Guilhen et al. (2020) estimaron las emisiones de N<sub>2</sub>O de la desnitrificación en las áreas húmedas de la Amazonía, adaptando un modelo simple de desnitrificación forzado por la extensión de aguas superficiales abiertas del satélite SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) y relataron un patrón de desnitrificación relacionado a la inundación.

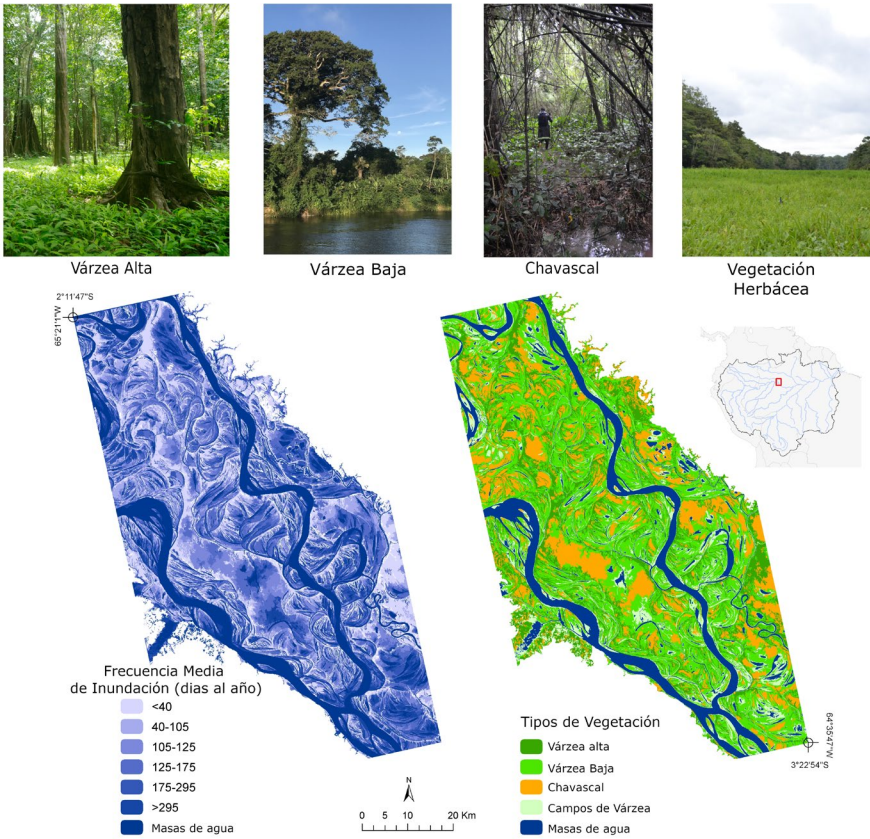
Enfoques pioneros con datos de teledetección han sido utilizados para delinear área inundada y extensión de bosques inundados, aguas abiertas y plantas herbáceas (por ejemplo, Hamilton et al., 2002; Hess et al., 1995, 2003, 2015; Capítulo 5), y han sido usadas para mejorar las estimaciones de variaciones estacionales e interanuales en los flujos de metano. Conforme descrito en el capítulo 5, nuevos sensores para satélites y productos de teledetección pueden ser usados ahora para actualizar tales enfoques (por ejemplo, Parrens et al., 2019; Prigent et al., 2020). Estos datos pueden ser combinados con cambios medidos por teledetección en hábitats acuáticos, mediciones de campo recientes (por ejemplo, Amaral et al., 2020; Barbosa et al., 2020) y modelado (por ejemplo, Potter et al., 2014) y así mejorar significativamente las estimaciones de emisiones. De un modo más general, el esquema de clasificación vegetativo-hidrológico utilizado en esos análisis atiende los criterios para una “parametrización funcional” de las áreas húmedas (Sahagian y Melack, 1998), con clases adecuadas para aplicaciones biogeoquímicas y de biodiversidad.

La productividad primaria de las plantas acuáticas es frecuentemente alta, pero medirlas es un desafío, especialmente las plantas herbáceas con grandes variaciones estacionales y espaciales. En las llanuras de inundación de la Amazonía, la productividad de las plantas acuáticas herbáceas sufre una fuerte influencia de las variaciones hidrológicas (Engle et al., 2008; Junk, 1997). Por ejemplo, el crecimiento de plantas acuáticas herbáceas en lagos de llanuras de inundación sigue la variación del nivel del agua. La extrapolación de mediciones de campo de la productividad vegetal para una escala regional la hizo por primera vez M. Costa

(2005) utilizando estimaciones de biomasa vegetal con imágenes SAR. Fueron encontrados valores menores en regiones donde las plantas se desarrollaron sólo al comienzo de la temporada de crecidas, y valores más elevados en áreas más cercanas al río Amazonas, donde la disponibilidad e influencia del agua rica en nutrientes es mayor. Otros trabajos de (T. S. F. Silva et al., 2010) y Silva et al. (2013) utilizaron datos SAR de banda C combinados y datos ópticos para investigar respuestas de expansión horizontal y crecimiento vertical de plantas herbáceas a variaciones en el área inundada y en el nivel del agua en dos grandes llanuras de inundación a lo largo del río Amazonas. En el período de 1970 a 2011, el crecimiento vertical varió por un factor de 2 y la cobertura anual máxima varió en un factor de 1,5. Años con cambios excepcionalmente grandes en el nivel del agua dieron como resultado una mayor productividad porque la expansión horizontal y el crecimiento vertical, ambos, tuvieron aumento.

La productividad de los ecosistemas acuáticos de la Amazonía también se relaciona al suministro de nutrientes y condiciones ópticas dentro del agua (Melack y Forsberg, 2001). Aplicaciones de espectrómetros a bordo de satélites para las aguas ópticamente complejas de la Amazonía revelaron niveles de clorofila y sedimentos en suspensión (por ejemplo, Barbosa et al., 2009; Novo et al., 2006; Capítulo 7), lo que está relacionado a la productividad planctónica. Otros estudios que emplean datos de sensores ópticos han sido usados para describir la vegetación acuática (por ejemplo, Josse et al., 2007; Novo y Shimabukuro, 1997; Wittmann et al., 2002) y la dinámica fluvial (Constantine et al., 2014; Mertes et al., 1995), ambos importantes aspectos de los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, las observaciones ópticas de teledetección son frecuentemente impedidas por la cobertura de nubes o de humo y las copas de los árboles muchas veces son muy densas para permitir el sensoramiento de inundaciones. Por otro lado, series temporales de datos SAR están disponibles para varias subregiones dentro de la cuenca amazónica y pueden ser usadas para generar mapas de alta resolución de vegetación e inundación. Ferreira-Ferreira et al. (2015), por ejemplo, utilizaron una serie temporal de datos SAR del sensor ALOS/PALSAR-1 para diferenciar entre los tipos de cobertura de la tierra y mapear la extensión de agua y la duración promedio de la inundación (**Figura 12**). Dichos autores ilustraron la distribución desigual de las áreas inundables en diferentes niveles de agua, o sea, algunas estadios del nivel del agua causan grandes expansiones de las áreas inundadas, mientras otras prácticas tienen menos efecto.

Los patrones de flujos complejos, revelados por análisis interferométricos de SAR



**Figura 12:** Principales tipos de vegetación y mapas de duración promedio estimado de la inundación en la Reserva de Desarrollo Sostenible Mamirauá, Amazonía Central, Brasil (Adaptado de Ferreira-Ferreira et al., 2015). Los mapas se han basado en una serie temporal de datos de imágenes ALOS/PALSAR-1 comprendiendo nueve fechas entre 2007 y 2010, seleccionadas para ofrecer la mayor y más uniforme gama de condiciones de nivel del agua dentro de las imágenes disponibles para el área. Los cuerpos de agua provienen del tipo de inundación de 365 días por año en media, o sea, cuerpos de agua permanentes. Más detalles en Ferreira-Ferreira et al. (2015).

(Alsdorf et al., 2007) y diferencias en las fuentes de agua, evidentes en modelos hidrológicos (Bonnet et al., 2017; Ji et al., 2019), explican, en parte, las variaciones de nutrientes, sedimentos en suspensión y productividad (Forsberg et al., 2017). Otro ejemplo de cómo los avances en el modelado hidrológico han contribuido para ayudar a comprender las llanuras de inundación de la Amazonía lo presentan Rudorff et al. (2014a, 2014b). Estos autores le agregaron un modelo simple de equilibrio hidrológico al modelo de inundación hidráulico LISFLOOD-FP y lo aplicaron a lo largo de 15 años de simulación. Este trabajo también enfatizó la importancia de la topografía detallada que obtuvieron a partir de una combinación de datos SRTM

con varios datos de batimetría. El modelo simuló bien los cambios en el nivel del agua, extensión de inundación y flujos de llanuras de inundación fluviales. Rudorff et al. (2017) combinaron esos resultados con mediciones de sedimentos en suspensión para demostrar variaciones en el aumento y la pérdida de sedimentos en la llanura de inundación.

Las variaciones en la distribución e inundación de los hábitat de las llanuras de inundación cumplen un papel fundamental en la ecología y para la producción de muchos peces con importancia comercial en la Amazonía. Lobón-Cerviá et al. (2015) demostraron que el número de especies de peces y su abundancia estaba directamente relacionado a la presencia de bosques inundados e inversamente relacionados a la distancia del río. Arantes et al. (2018) utilizaron datos Landsat y SAR para caracterizar hábitat acuáticos y descubrieron que patrones espaciales de biodiversidad de peces en las llanuras de inundación amazónicas estaban asociados a la cobertura forestal y a los gradientes de paisaje. Ejemplos adicionales de conexiones entre la pesca y la ecología de peces aparecen en Melack et al. (2009) y Melack et al. (2021).

La fenología de los árboles tanto en llanuras de inundación fértiles y eutróficas (bosques de várzea) como en llanuras de inundación pobres en nutrientes y oligotróficas (igapós) siguen las variaciones en la inundación (Junk et al., 2010). La inundación estacional también aporta conectividad, lo que es fundamental para la diversidad gama (Thomaz et al., 2007; Ward et al., 2002). La diversidad de aves varía entre los hábitat acuáticos (Cintra, 2015; Laranjeiras et al., 2021). En las grandes llanuras de inundación fluvial, las aves y peces tienen comunidades más estables en ambientes con inundaciones anuales rítmicas (Jardine et al., 2015; Luz-Agostinho et al., 2009). En un lago de llanura de inundación cerca de la confluencia de los ríos Amazonas y Negro, por ejemplo, Röpke et al. (2017) detectaron un cambio abrupto y persistente en la estructura de las asambleas de peces que duró más de una década después de la sequía extrema de 2005. Las perturbaciones de las variaciones naturales de áreas inundadas, conectividad hidrológica o cobertura terrestre son disruptivas para los sistemas de áreas húmedas.

Resende et al. (2019) utilizaron teledetección SAR para evaluar los impactos de la Represa de Balbina en los bosques de igapó, aguas abajo en el río Uatumã. Estos autores han mostrado que el 12% del bosque de la llanura de inundación murieron debido al pulso de inundación alterado y otro 29% de los bosques vivos

remanentes pueden estar en proceso de mortalidad. Schöngart et al. (2021) exhiben más evidencias de cambios en los bosques de las llanuras de inundación debajo de la Represa de Balbina a lo largo de 35 años. Castello et al. (2018) combinaron datos de pesca y cobertura de hábitat provenientes de análisis SAR para determinar los efectos del cambio de la cobertura de la tierra sobre la producción pesquera. Estos autores mostraron que la eliminación de los bosques inundados puede disminuir la producción de peces y que otros hábitats de las llanuras de inundación no pueden sustituir la eliminación de bosques para mejorar la producción de peces.

Diversos desafíos y lagunas de conocimiento aún existen en la relación entre hidrología y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos en la cuenca amazónica y en otros lugares. El suelo húmedo permanente puede tener altas tasas de procesos biogeoquímicos, como la liberación de metano. Aunque sea difícil de captar con teledetección, los modelos son promisoros, si se operan en las escalas correctas. Arroyos y pequeños ríos, así como lagunas, pueden liberar cantidades desproporcionadamente altas de dióxido de carbono, pero sus áreas superficiales raramente se conocen; productos de teledetección de alta resolución espacial ayudarán a atenuar este problema. Las áreas húmedas interfluviales y sabanas, muchas veces inundadas por la lluvia y no por los ríos, no son bien representadas por modelos hidrológicos a escala de cuenca y exigirán datos topográficos a escala fina combinados con datos de teledetección multitemporal de inundación. Dentro de la cuenca amazónica, existen lagunas de datos particularmente grandes en los Llanos de Moxos (Bolivia), en las turberas en la cuenca Pastaza-Marañón (Perú) y en las áreas húmedas costeras de agua dulce.



12  
**Cambios**  
*ambientales*

Gabriel Medeiros Abrahão  
Marcos Heil Costa

Durante las últimas décadas, la Amazonía pasó por grandes cambios ambientales. Extensas áreas del bosque tropical fueron deforestadas, siendo convertidas en pastaje, áreas de cultivo o de explotación minera. Esos cambios en la cobertura del suelo alteraron la distribución de la precipitación entre la evapotranspiración, la escorrentía superficial y el drenaje profundo. También modificaron el transporte de sedimentos, escorrentía, la coloración de los ríos y los procesos de formación de precipitaciones en la Amazonía. A la vez, áreas forestales fueron inundadas por represas artificiales para producir energía hidroeléctrica, afectando pulsos de inundación aguas abajo de las mismas, mientras la ecohidrología de los bosques tuvo que adaptarse a los patrones de inundación. La teledetección ha sido una importante herramienta para detectar y mapear esos cambios ambientales y sus impactos en el ciclo hidrológico.

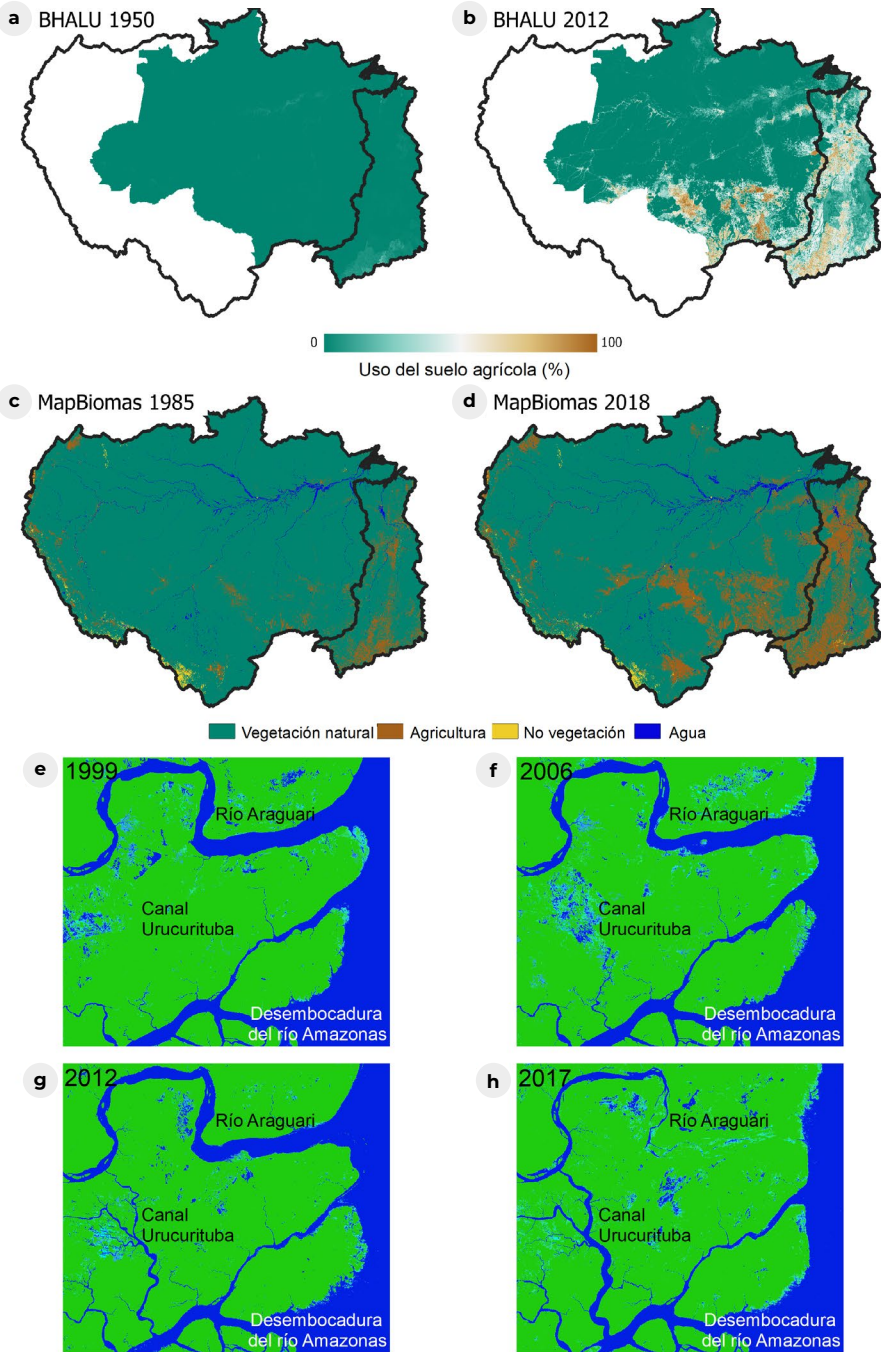
Solo después de un extenso mapeado del uso y la cobertura del suelo (*Land Use and Land Cover*, LULC) en la Amazonía fue posible comprender el impacto de la deforestación en su ciclo hidrológico. El primero de estos mapas fue elaborado por Cardille et al. (2002), quienes combinaron imágenes de teledetección del sensor AVHRR con información del censo agrícola para producir un mapa espacialmente explícito de LULC para las cuencas del Amazonas y Tocantins en 1995. Basándose en este conjunto de datos y en el censo agrícola de 1960, Costa et al. (2003) evaluaron cómo el aumento del uso del suelo en la parte alta de la cuenca del Tocantins afectó las escorrentías durante los períodos 1949-1969 y 1979-1999. Aunque la precipitación no presentó cambios significativos entre ambos períodos, la escorrentía promedio anual aumentó un 24% ( $P < 0,02$ ), mientras la escorrentía de la estación lluviosa aumentó un 28% ( $P < 0,01$ ), con picos estacionales que se adelantaron aproximadamente un mes. Estas variaciones podrían atribuirse tanto a la reducción de la *ET* como a la reducción de la infiltración durante el período lluvioso. La reducción de la *ET* se explica por tres factores relacionados con los cambios en la vegetación: el aumento del albedo, que reduce la radiación neta en la superficie; la menor rugosidad, que disminuye la turbulencia atmosférica y debilita los movimientos verticales; y la reducción de la profundidad de las raíces, lo que limita la humedad disponible en el suelo para las plantas. Otros factores que también pueden influir en la *ET* local incluyen la compactación del suelo, tanto en la superficie como en la subsuperficie, y la disminución del índice de área foliar debido al pastoreo (M. H. Costa, 2005).

Otros mapas de LULC se han producido para la Amazonía brasileña utilizando técnicas similares (Leite et al., 2011 para 1940-1995; Días et al., 2016 para 1940-2012,

**Figura 13ab).** Diversos productos generados exclusivamente mediante teledetección se encuentran disponibles para períodos más recientes, como el producto MODIS MOD44 *tree cover* (2002–presente), el PRODES basado en Landsat (1988–presente, <http://www.obt.inpe.br/prodes/>) y el TerraClass (2004–2014, <https://www.terraclass.gov.br/>). Todos estos son productos oficiales del gobierno para la Amazonía brasileña, y el MapBiomas para la Pan Amazonía (1985–reciente, <https://mapbiomas.org/> - **Figura 13cd**). Varios estudios han utilizado estos conjuntos de datos para estudiar los efectos de los cambios del LULC en el régimen hidrológico de distintos afluentes de la Amazonía y sobre el arco de deforestación Amazonía-Cerrado en su conjunto (Arias et al., 2018; Cavalcante et al., 2019; Coe et al., 2011; Levy et al., 2018; Panday et al., 2015; Silvério et al., 2015; Spera et al., 2016). En general, estos estudios encuentran un aumento de las escorrentías promedio y mínima, así como una disminución de la evapotranspiración en toda la cuenca, a causa de la deforestación.

Además de la escorrentía, los cambios en el uso y la cobertura del suelo también pueden influir en la precipitación, especialmente durante el inicio y el final de la estación lluviosa. La primera evidencia empírica de este efecto en la región la presentaron Butt et al. (2011). Compararon cuatro mapas de cobertura terrestre, de 1975 a 2005, elaborados a partir de imágenes Landsat, con las fechas del inicio de la estación lluviosa calculadas a partir de datos diarios de pluviómetros. Concluyeron que, en las estaciones ubicadas dentro de las regiones más deforestadas, el inicio de la estación lluviosa se retrasó significativamente durante las últimas tres décadas, con un promedio de 11 días y llegando hasta 18 días en algunos casos. En contraste, en las estaciones situadas en áreas menos deforestadas, el inicio de la estación lluviosa no presentó cambios significativos. Estudios más recientes han corroborado estos resultados. En un análisis similar realizado en el sur de la Amazonía, que abarcó el período de 1974 a 2012, Leite-Filho et al. (2019) confirmaron, tras eliminar las tendencias regionales y la variabilidad interanual, un retraso en el inicio de 1,2 a 1,7 días por cada aumento del 10% en la deforestación. Asimismo, se observó que la probabilidad de ocurrencia de veranillos al inicio y al final de la temporada lluviosa es mayor en áreas con mayor deforestación.

Sumado a esto y usando datos diarios de precipitación del producto TRMM 3B42 y datos de uso del suelo con una resolución de 1km, recopilados por Días et al. (2016), Leite-Filho et al. (2020) evaluaron los efectos de la deforestación sobre el inicio, el fin y la duración de la estación lluviosa en el sur de la Amazonía durante el



**Figura 13:** Ejemplos de cambios en la Amazonía documentados por teledetección. Las Figuras a-d muestran dos grupos diferentes de datos de uso del suelo basados en satélite para las cuencas amazónica y Tocantins-Araguaia. En la parte superior, se muestra el

conjunto de datos de Uso Histórico del Suelo Brasileño (BHALU, Días et al., 2016), que combina información satelital y censal para estimar la fracción de cada píxel de 1x1 km ocupado por diferentes usos del suelo de 1950 (a) a 2012 (b) en Brasil. Este conjunto de datos BHALU incluye áreas de vegetación natural, pastizales y diversos cultivos agrícolas. Sólo se muestra el uso total de la tierra agrícola (pastizales + cultivos). Las imágenes (c) y (d) corresponden al conjunto de datos MapBiomias Amazonia (Proyecto MapBiomias Amazonia, 2021; <https://mapbiomas.org/>), una clasificación detallada del uso del suelo del área combinada de bosque tropical de la Pan Amazonia y las cuencas amazónica y del Tocantins-Araguaia de 1985 (c) a 2018 (d).

Los cuatro recuadros inferiores muestran un importante evento hidrogeomorfológico reciente en la Amazonia: la captura de casi todo el flujo de agua del río Araguari por el río Amazonas. El Río Araguari solía desembocar directamente en el Océano Atlántico (y, f). Iniciado por un gran evento de inundación en 2011, el canal de Urucurituba creció hasta que el Río Araguari se conectó a la desembocadura del Amazonas alrededor del 2015 (g, h). Los paneles y-h fueron generados usando datos del *Global Surface Water Explorer* (<https://global-surface-water.appspot.com/>; Pekel et al., 2016).

período 1998-2012. Después de descartar los efectos de la posición geográfica y del año, los autores observaron la siguiente relación entre el inicio, el fin y la duración de la estación lluviosa y la deforestación: por cada 10% de aumento en la fracción deforestada, el inicio de la estación lluviosa se retrasa  $\sim 0,4 \pm 0,12$  día, el inicio se adelanta  $\sim 1,0 \pm 0,22$  día, y la duración se reduce  $\sim 0,9 \pm 0,34$  día ( $p < 10^{-5}$  en las tres tendencias).

Otro avance logrado gracias a la teledetección fue la identificación del efecto de la llamada “brisa de la deforestación”, que altera la distribución espacial de las precipitaciones. Khanna et al. (2017) combinaron datos de teledetección sobre uso del suelo, precipitación y cobertura de nubes con un modelo climático regional, y descubrieron que pequeños fragmentos de deforestación generan células de circulación atmosférica en Rondonia. Esta circulación genera un dipolo de anomalía de precipitación sobre el área deforestada, caracterizado por un aumento de precipitación en la dirección del viento y una disminución en sentido contrario, específicamente en la región descendente de la célula térmica. El dipolo observado en Rondonia es significativo, con un cambio de precipitación en las dos regiones de un  $\pm 25\%$  del promedio del área deforestada.

Estos fenómenos de circulación regional determinan que la relación entre la deforestación y los totales de lluvias dependa de la escala de análisis. Al combinar los datos de precipitación del producto TRMM 3B42 con información del uso del suelo del sistema PRODES, Leite-Filho et al., (2021) concluyeron que dicha relación no es lineal a escalas menores, pero que, a escalas mayores, siempre resulta en una disminución de la precipitación total anual en el sur de la Amazonia. En

la mesoescala (una grilla de TRMM de 28 km de resolución espacial), pequeñas fracciones deforestadas (hasta un límite de deforestación del 57%) generan un ligero aumento en la precipitación pluviométrica (2,2 mm por año por punto porcentual de área deforestada,  $p < 10^{-5}$ ). No obstante, para fracciones deforestadas por encima de este límite, la precipitación disminuye a un ritmo aproximadamente doble, alcanzando 5 mm por año por punto porcentual de deforestación ( $p < 10^{-5}$ ). Al considerar grillas de mayor resolución espacial (56 km, 112 km), tanto la deforestación como la precipitación muestran una disminución gradual en el límite no lineal para aumentar/disminuir los impactos pluviométricos. A la escala subsinóptica (224 km de resolución espacial, o 64 píxeles del TRMM 3B42), la deforestación genera consistentemente una reducción lineal en la precipitación de 4,1 mm por año por punto porcentual adicional de área deforestada ( $p < 10^{-5}$ ), incluso en pequeñas fracciones de deforestación.

Aunque en los últimos años se hayan desarrollado diversas técnicas de teledetección para inferir las propiedades del agua superficial y del canal (como se describe en los capítulos 4, 5, 6 y 7), relativamente pocos estudios han aplicado estas técnicas para analizar cómo los cambios ambientales, tanto antrópicos como naturales, han impactado y siguen afectando dichas propiedades en la cuenca amazónica. Latrubesse et al. (2017) utilizaron datos de cobertura arbórea de Hansen et al. (2013), imágenes satelitales de Landsat y estimaciones de TSS basadas en teledetección de Park y Latrubesse (2014) para investigar los impactos actuales y potenciales de las represas en la cuenca. Estos autores identificaron que las represas de Santo Antonio y Jirau causaron una reducción del 20% en la concentración promedio de sedimentos en suspensión superficial en el río Madera, a pesar de las escorrentías asociadas con crecidas excepcionalmente altas en los años analizados tras el inicio de su operación. Además, emplearon imágenes satelitales de Landsat para calcular las tasas de migración de canales en cada subcuenca, determinando una tasa promedio de migración equivalente al  $0,02 \pm 20\%$  del ancho de los canales por año.

La estimación del TSS mediante técnicas satelitales también se ha utilizado para documentar tendencias en el tramo principal del río Amazonas, aunque no existe un consenso claro sobre las causas de dichas tendencias observadas. Estas técnicas permiten expandir y extrapolar los conjuntos de datos obtenidos en campo, lo que resulta especialmente útil en la región amazónica. Esto se debe a que, en las partes bajas del río Amazonas, la escorrentía y el TSS presentan una baja correlación, causada por el desfase en los picos de escorrentía de los ríos Solimões, Madera y

Negro (Filizola y Guyot, 2009). Martínez et al. (2009) emplearon un muestreo de TSS a partir de 18 trabajos de campo realizados entre 1995-2003, junto con imágenes MODIS, para obtener una serie continua de TSS de 12 años (1995-2007) en la estación de Óbidos, que es la última estación de medición en el río Amazonas antes de su desembocadura en el Océano Atlántico. Se encontró un aumento del 20% en la descarga de sedimentos durante el período analizado, sin observar tendencias claras en la descarga de agua. Los autores citan cambios en el uso del suelo y en los patrones de precipitación como explicaciones probables. Recientemente, Li et al. (2020) utilizaron técnicas similares para obtener una serie temporal actualizada de TSS (1996-2018) y descubrieron que la carga de sedimentos aumentó hasta 2007, pero posteriormente disminuyó. Los autores infirieron que esa reversión se debe a la reducción de la contribución sedimentaria del río Madera tras la construcción de las represas de Santo Antonio y Jirau a finales de los años 2000, en concordancia con lo señalado por Latrubesse et al. (2017).

Montanher et al. (2018) emplearon técnicas similares para generar una serie temporal extendida de 32 años (1984-2016) del transporte de sedimentos en suspensión (SST, producto del TSS por escorrentía). Estos autores argumentaron que existe un patrón recurrente de aumento y disminución de la SST en ciclos, probablemente asociados a fluctuaciones climáticas, y que tendencias como las observadas por Martínez et al. (2009) son consecuencia del análisis de series temporales más cortas. No obstante, la SST depende directamente de la variabilidad de la escorrentía, y ni Martínez et al. (2009) ni Li et al. (2020) identificaron tendencias en la escorrentía en sus series temporales más cortas.

Algunos estudios también analizaron el impacto de la explotación minera en los sólidos en suspensión presentes en las subcuencas amazónicas. La minería artesanal y de pequeña escala, especialmente de oro, es común en regiones como la cuenca del río Tapajós. Estas operaciones suelen emplear técnicas de bajo costo, como chorros de agua y dragas, que pueden generar niveles significativamente altos de degradación del suelo y contaminación del agua (Lobo et al., 2018). Además, muchas veces estas actividades son ilegales y no registradas, lo que convierte a la teledetección en una herramienta clave para identificarlas y mapearlas. Hasta donde sabemos, el único conjunto de datos disponible públicamente sobre áreas de explotación minera en la cuenca amazónica es el proyecto TerraClass. Este proyecto se basa en la interpretación visual de imágenes Landsat y cubre solo algunos años entre 2004-2014. Lobo et al. (2018) combinaron varios conjuntos de datos para desarrollar un

método de clasificación automatizado capaz de diferenciar entre explotación minera industrial y de pequeña escala, así como identificar tipos de minerales a partir de imágenes del Sentinel-2. Estos autores infirieron que, en 2017, el 64% del área total de explotación minera, en algunas regiones clave de la cuenca correspondía a la extracción de oro y estaño en pequeña escala.

Lobo et al. (2015) estimaron la concentración de TSS en la cuenca del río Tapajós utilizando imágenes Landsat y encontraron que los aumentos de TSS están fuertemente asociados con los incrementos en la actividad minera a escalas de tiempo estacionales y decenales. Posteriormente, Lobo et al. (2016) actualizaron la identificación de áreas de explotación minera basada en imágenes Landsat del proyecto TerraClass, describiendo la evolución de estas áreas en la misma cuenca. Identificaron distintas épocas de impacto de la minería en el TSS, relacionadas con la adopción de nuevas tecnologías y las fluctuaciones en el precio del oro. Al comparar subcuencas con diferentes tipos de uso del suelo, concluyeron que las actividades mineras generan un impacto significativamente mayor en el TSS que la deforestación para usos agrícolas.

Las imágenes Landsat también se utilizaron para documentar y entender un importante evento hidrogeomorfológico en la Amazonía: la reciente captura de casi todo el flujo de agua del río Araguari por el río Amazonas (dos Santos et al., 2018). El Araguari, un río de gran tamaño con una escorrentía promedio anual superior a  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , solía desembocar directamente en el Océano Atlántico hasta la rápida formación del canal Urucurituba, que lo conectó al río Amazonas a principios de la década de 2010. La migración inicial del proto-canal Urucurituba hacia el río probablemente estuvo asociada con la deforestación para la cría de búfalos alrededor de 2007. La primera conexión con el Araguari se atribuyó a un evento de alto flujo en 2011. El rápido crecimiento del canal, cuyo ancho aumentó cerca de 5 m por mes hasta 2015, se considera una consecuencia de complejos procesos hidromorfodinámicos relacionados con corrientes de marea y deposición estuarina, que finalmente llevaron al bloqueo de la desembocadura del río Araguari. La formación de este canal provocó importantes cambios en el patrón hidráulico, la dinámica sedimentaria y los ecosistemas del estuario del Araguari, representando la primera observación conocida del desarrollo de una red de distribución estuarina por erosión en las cabeceras.

Las técnicas de teledetección también aportaron datos clave para la entrada,

calibración y validación de numerosos modelos que han motivado reflexiones significativas sobre las consecuencias de los cambios ambientales en la cuenca amazónica (ver capítulo 10). Estos modelos integran procesos hidrológicos, hidráulicos, climáticos y de uso del suelo, y constituyen herramientas fundamentales en estudios que analizan los impactos de cambios ambientales pasados y futuros. Una de sus principales aplicaciones es evaluar posibles escenarios futuros (como cambios climáticos y deforestación). Otra aplicación relevante es la atribución de los efectos de distintos procesos en la variabilidad de los datos observados.

Sorribas et al. (2016) analizaron las proyecciones de cambios climáticos sobre la escorrentía y la extensión de inundaciones en la cuenca amazónica, utilizando el modelo hidrológico regional MGB. Este modelo integra la simulación del almacenamiento de agua y la hidráulica fluvial unidimensional en llanuras de inundación, forzadas por cinco GCMs del Quinto Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos (CMIP5) del IPCC. La validación del modelo se realizó mediante una combinación de datos *in situ* y de teledetección. Los resultados indicaron un aumento en la escorrentía promedio y máxima en los grandes ríos que drenan los Andes al Noroeste, atribuido al cambio climático. Esto contribuye al incremento de la escorrentía y de la extensión promedio y máxima de las inundaciones en áreas húmedas del Perú, como la región de Pacaya-Samiria, así como en el río Solimões, ubicado al oeste de la Amazonía. Por otro lado, se proyecta una disminución de las escorrentías, principalmente durante la estación seca, en las cuencas del este y sur. Asimismo, se prevé una reducción de las inundaciones durante el período seco en la Amazonía central.


Con el creciente interés en la construcción de hidroeléctricas en la cuenca amazónica durante las últimas décadas (Castello y Macedo, 2016), numerosos estudios de modelado han intentado cuantificar los impactos ambientales de los proyectos de represas, tanto planeados como construidos. Forsberg et al. (2017) utilizaron diversos modelos para evaluar los impactos de seis represas planificadas para la región andina de la Amazonía. Dado que una parte significativa de la producción de sedimentos en la cuenca ocurre en esta región, se prevé que esas represas reduzcan el suministro de sedimentos, fósforo y nitrógeno en toda la cuenca en un 64%, 51% y 23%, respectivamente. Además de los cambios en el suministro de nutrientes y sedimentos, los autores calcularon que la dinámica del mercurio y la atenuación del pulso de inundación generarían importantes impactos en el medio acuático aguas abajo, en las llanuras de inundación y en la geomorfología del canal. De hecho,

Resende et al. (2019) documentaron una mortalidad masiva de árboles en los bosques de inundación (igapó) aguas abajo de la represa de Balbina mediante imágenes de SAR. Según su estudio, aproximadamente un 40% del igapó, ubicado hasta 49 km aguas abajo de la represa, estaba muerto o en proceso de mortalidad.

Los cambios ambientales esperados en la cuenca, como la deforestación y el cambio climático, también pueden impactar significativamente la generación de energía hidroeléctrica, a menudo resultando en una producción muy por debajo de la capacidad esperada de la represa. Los proyectos más recientes de represas siguen el concepto de “presa de pasada”, lo que evita los grandes impactos ambientales asociados con los enormes reservorios de proyectos más antiguos. Sin embargo, este enfoque hace que la generación de energía sea más dependiente de las variaciones naturales de la escurrentía (Costa, 2020). Arias et al. (2020) combinaron datos sobre cambios en el uso del suelo y un modelo hidrológico para evaluar los impactos directos del cambio climático y la deforestación en la producción de energía hidroeléctrica de las represas existentes y planeadas en la cuenca del Tapajós. Aunque la disminución de la evapotranspiración causada por la deforestación tiende a aumentar la escurrentía promedio anual, la reducción en la capacidad de retención de agua genera mayor escurrentía superficial y provoca crecidas rápidas durante la estación lluviosa, además de una disminución de la escurrentía durante la estación seca. Dado que las turbinas suelen operar a su capacidad máxima durante la estación lluviosa, este exceso de flujo se desperdicia, mientras que la generación durante la estación seca se ve reducida. Arias et al. (2020) encontraron que la combinación de proyecciones de cambio climático y la deforestación puede retrasar el pico de generación de energía en un mes (agravando el desajuste entre el pico de producción y el consumo), reducir la generación durante la estación seca entre un 4-7% y aumentar la variabilidad interanual de la producción de energía en un 50-69%.

La deforestación tiene el efecto indirecto de reducir la precipitación y retrasar el inicio de la estación lluviosa, lo que evidencia aún más la dependencia de la generación de energía hidroeléctrica de los bosques. Stickler et al. (2013) combinaron modelos de uso del suelo, hidrológicos y climáticos para evaluar los efectos directos e indirectos de la deforestación en la generación hidroeléctrica del complejo energético de Belo Monte, ubicado en la cuenca del río Xingú. Estos autores descubrieron que, considerando únicamente los efectos directos de la deforestación en el flujo del río, una deforestación del 20-40% de la cuenca provocaría un aumento del 4-12% en la escurrentía promedio con incrementos similares en la generación de energía. Sin

embargo, al incluir los efectos climáticos de la deforestación en la región amazónica, la disminución de las lluvias en la cuenca contrarrestó los efectos directos, resultando en una reducción del 6-36% de las escorrentías. En el escenario de deforestación proyectado para 2050 (un 40% del bosque amazónico perdido), simularon que la generación de energía se reduciría al 25% de la capacidad máxima de producción de la planta.



13

# *Síntesis* de los avances científicos, desafíos futuros y prioridades

Rodrigo Paiva  
Fabrice Papa  
Alice Fassoni-Andrade  
Ayan Fleischmann  
Sly Wongchuig  
John Melack

Las diversas conquistas de más de tres décadas de avances científicos en relación a la hidrología de la cuenca amazónica con datos de satélite, junto al desarrollo de nuevas técnicas de teledetección y algunas oportunidades de investigación seleccionadas, están resumidas en la **Tabla 7** y en la **Tabla 8**. La sección presenta los principales descubrimientos obtenidos en la Amazonía, que ha sido un laboratorio natural para la teledetección en el avance de la hidrología. La sección 13.2 destaca cómo estas experiencias pueden utilizarse para ayudar a comprender el ciclo del agua en otras grandes cuencas hidrográficas globales. La sección 13.3 discute sobre las lagunas de conocimiento y las oportunidades de investigación de los recursos hídricos de la Amazonía, gracias a un monitoreo sin precedentes y continuo de la cuenca amazónica gracias a las próximas y futuras misiones de satélites. Por último, la sección 13.4 discute cómo ir de los avances científicos hacia una gestión más sostenible de los recursos hídricos, finalmente, la sección 13.5 destaca algunas recomendaciones para futuros estudios sobre los recursos hídricos de la Amazonía a partir del espacio.

**TABLA 7**  
Síntesis de los avances científicos, desafíos futuros y oportunidades para comprender la hidrología de la Amazonía usando teledetección.

| VARIABLE                   | ESTUDIOS PIONEROS EN TELEDETECCIÓN REALIZADOS EN LA AMAZONÍA                                                                                                                                                                                                                                             | CONOCIMIENTOS INNOVADORES SOBRE LA AMAZONÍA Y DE LA HIDROLOGÍA GENERAL ADQUIRIDOS CON EL USO DE TELEDETECCIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | LAGUNAS DE CONOCIMIENTO Y NUEVAS OPORTUNIDADES PARA LA AMAZONÍA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Precipitación</b>       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Distribución espacial de las precipitaciones a escala regional (Espinoza et al., 2009).</li> <li>2) Tendencia de lluvia en las últimas décadas (Paca et al., 2020).</li> </ol>                                                                                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Distribución espacial de las áreas de hotspot (Chavez y Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015).</li> <li>2) Reducción de la precipitación sobre los principales ríos (Paiva et al., 2011).</li> <li>3) Inicio de la estación húmeda inducida prematuramente por el bosque tropical (Wright et al., 2017).</li> </ol>                                                                                                                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Mejoras en los algoritmos para estimar precipitaciones orográficas (Dinku et al., 2011; Toté et al., 2015).</li> <li>2) Red estratégica de pluviómetros.</li> <li>3) Constelación de satélites de bajo costo (Peral et al., 2019).</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Evapo-transpiración</b> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Estimaciones de flujo de agua en los trópicos a grandes escalas (Fisher et al., 2009).</li> <li>2) Datos observacionales para calibración y validación de modelos y evaluaciones con múltiples modelos (Gonçalves et al., 2013; Roca et al., 2009).</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Comprensión de los factores ambientales y de la estacionalidad de la ET en toda la cuenca, con mayor limitación energética y pequeña estacionalidad en las regiones más húmedas (Amazonia céntrica), y loopuesto en la región sur.</li> <li>2) Disminución de la ET debido a la deforestación y a la expansión de la agricultura (de Oliveira et al., 2019; Silvério et al., 2015; Spera et al., 2016; Zemp et al., 2017).</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Modelado de las estimaciones de ET en alta resolución espacial (&lt; 30 m) y durante series temporales largas (&gt; 40 años).</li> <li>2) Combinación de modelos de balance de energía en la superficie con modelos menos dependientes de la parametrización en la cobertura del suelo.</li> <li>3) Nuevas técnicas de fusión de datos usando varias fuentes de teledetección (multiespectrales, térmicas y de microondas) para reducir los efectos de la cobertura de nubes en los enfoques de balance de energía.</li> </ol> |

|                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Nivel del agua</b></p>                                                                      | <p>1) Estimaciones del nivel y de la declividad del agua a gran escala mediante radares altimétricos (Birkett et al., 2002; Guzkowska et al., 1990).</p> <p>2) Cambios en el nivel del agua en comparación con las estimaciones de interferometría (Alsdorf et al., 2007, 2000).</p> <p>3) Monitoreo del nivel del agua y de las curvas de calibración en ríos no monitoreados (Paris et al., 2016; Silva et al., 2014).</p>                   | <p>1) Caracterización de la variación del nivel del agua en ríos y bosques húmedos (Alsdorf et al., 2007; Birkett et al., 2002).</p> <p>2) Conectividad río-llanura de inundación (Alsdorf, 2003; Park, 2020).</p> <p>3) Almacenamiento del agua en sistemas fluviales y áreas húmedas (Alsdorf, 2003; Frappart et al., 2005).</p>                                          | <p>1) Caracterización bidimensional de los niveles del agua (SWOT) (Biancamaria et al., 2016).</p> <p>2) Resolución espacio-temporal más fina para el nivel del agua y la declividad.</p> <p>3) Nuevas técnicas de fusión con modelado de escala local a escala regional (Paiva et al., 2013b; Yamazaki et al., 2011).</p>                                                                                                                              |
| <p><b>Extensión de agua superficial</b></p>                                                       | <p>1) Primera estimación a gran escala de la extensión y variabilidad del agua superficial en llanuras de inundación (Hess et al., 2003; Sippel et al., 1994).</p> <p>2) Relación entre la extensión de las aguas superficiales y el caudal (Sippel et al., 1998).</p> <p>3) Dinámica de las llanuras de inundación en alta resolución y discriminación de tipos de vegetación acuática en grandes áreas (Ferreira-Ferreira et al., 2015).</p> | <p>1) Patrones estacionales e interanuales de la inundación en la cuenca Amazónica (Aires et al., 2017; Hamilton et al., 2004; Hess et al., 2015).</p> <p>2) Contribución de la variabilidad del agua continental y de las llanuras de inundación con el ciclo de emisiones de carbono en la Amazonia (Melack et al., 2004; Raymond et al., 2013; Richey et al., 2002).</p> | <p>1) Resolución espacio-temporal más fina del agua superficial y de la variabilidad de la extensión de inundación de la llanura mediante SWOT y NISAR.</p> <p>2) Desarrollo de técnicas de fusión con inteligencia artificial para combinar varias observaciones de teledetección (visible, IV, microondas pasivo y activo, GNSS-R).</p> <p>3) Garantizar las observaciones de largo plazo para monitorear los cambios climáticos/ antropogénicos.</p> |
| <p><b>Topografía de lagos y canales de la llanura de inundación</b></p>                           | <p>1) Corrección de Modelos Digitales de Elevación (Baugh et al., 2013; Yamazaki et al., 2012a).</p> <p>2) Estimaciones de la topografía en áreas estacionalmente inundadas (Fassoni-Andrade et al., 2020b).</p>                                                                                                                                                                                                                               | <p>1) Caracterización de los canales y los lagos de la llanura de inundación (Fassoni Andrade et al., 2020b; Sippel et al., 1998; Trigg et al., 2012).</p> <p>2) Evaluación de la migración del canal fluvial (Constantine et al., 2014; dos Santos et al., 2018).</p>                                                                                                      | <p>1) Caracterización de la topografía en los bosques inundados.</p> <p>2) Estimación a largo plazo para monitorear cambios geomorfológicos en la llanura de inundación y en los canales fluviales.</p>                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <p><b>Calidad del agua: sedimentos, clorofila y materia orgánica disuelta coloreada</b></p>       | <p>1) Estimaciones de la concentración de sedimentos en ríos (Bayley y Moreira, 1978; Mertes et al., 1993), clorofila en lagos de llanuras de inundación (Novo et al., 2006) y materia orgánica disuelta coloreada en lagos (M. P. da Silva et al., 2019).</p> <p>2) Algoritmos semianalíticos para las estimaciones de la calidad del agua (Bernini et al., 2019; de Carvalho et al., 2015; Maciel et al., 2020a).</p>                        | <p>1) Mapas dinámicos del campo de luz subacuático y de constituyentes ópticamente activos (Fassoni-Andrade y Paiva, 2019; Maciel et al., 2020a; Martínez et al., 2009; Novo et al., 2006).</p> <p>2) Series temporales extendidas de sedimentos en suspensión en la región Amazónica (Li et al., 2020; Martínez et al., 2009; Montanher et al., 2018).</p>                 | <p>1) Evaluación de la dinámica en las comunidades de fitoplancton usando teledetección como indicador de la biodiversidad en las aguas amazónicas.</p> <p>2) Algoritmos robustos para CDOM y estimación de la Clorofila-a en aguas continentales ópticamente complejas.</p>                                                                                                                                                                            |
| <p><b>Almacenamiento de Agua Terrestre (TWS) y Almacenamiento de Aguas Subterráneas (GWS)</b></p> | <p>1) Estimaciones a gran escala de TWS usando datos GRACE (Tapley et al., 2004).</p> <p>2) Determinación de cambios en el GWS usando productos de teledetección y salidas de modelos (Frappart et al., 2011).</p>                                                                                                                                                                                                                             | <p>1) Firmas espaciales de sequías e inundaciones en el TWS (Chen et al., 2009).</p> <p>2) Firmas espacio-temporales de sequías en el almacenamiento del agua superficial (Frappart et al., 2012; Papa et al., 2013).</p> <p>3) Variaciones temporales del CWS (Frappart et al., 2019).</p>                                                                                 | <p>1) Perfeccionamiento de las estimaciones de las anomalías de GWS con estimaciones perfeccionadas del almacenamiento del agua superficial mediante la misión SWOT.</p> <p>2) Monitoreo a largo plazo del TWS y GWS (GRACE y GRACE Follow-on).</p>                                                                                                                                                                                                     |

**TABLA 8**

Síntesis de los avances científicos sobre los esfuerzos multidisciplinarios e integradores para la comprensión de la hidrología y de los ecosistemas de la cuenca Amazónica.

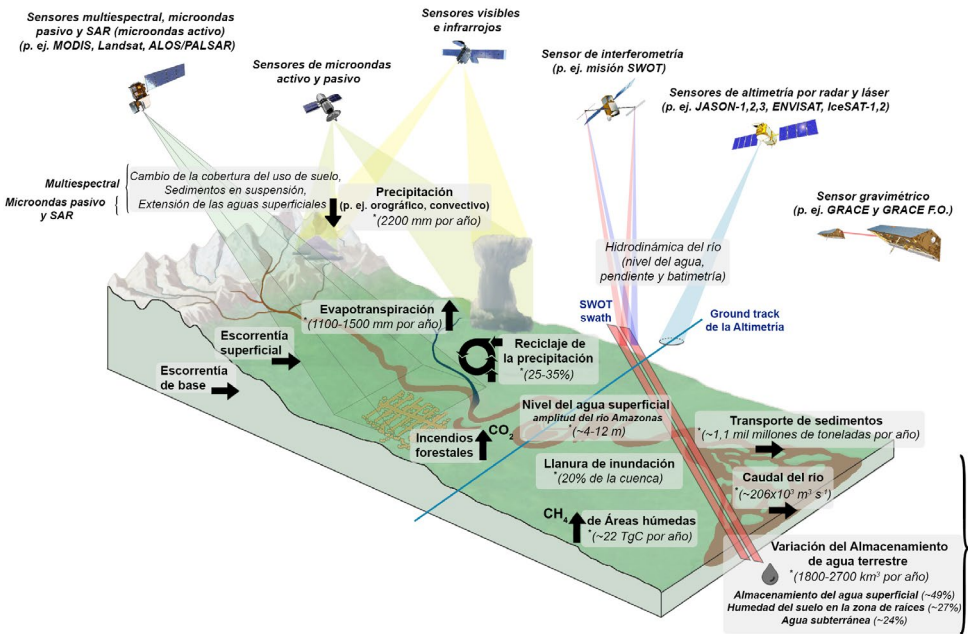
|                                                                          | CONOCIMIENTOS INNOVADORES SOBRE LA AMAZONÍA Y LA HIDROLOGÍA GENERAL ADQUIRIDOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | LAGUNAS DE CONOCIMIENTO Y NUEVAS OPORTUNIDADES PARA LA AMAZONÍA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Balance Hídrico</b>                                                   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Análisis del ciclo hidrológico a escala de subcuenca (Azarderakhsh et al., 2011).</li> <li>2) Realización del cierre del balance hídrico (Pan et al., 2012).</li> <li>3) Estimativa continua del caudal de los ríos con base en el cierre del balance hídrico usando informaciones de satélite.</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                               | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Resolución espacio-temporal más fina en los análisis del balance hídrico utilizando nuevas caracterizaciones de los ríos a partir de la teledetección.</li> <li>2) Sensibilidad del cierre debido al sesgo de diferentes componentes del balance, en especial de la ET.</li> <li>3) Estimaciones del intercambio entre aguas subterráneas y superficiales a escala fina a partir de métodos de balance hídrico corregidos en la superficie.</li> </ol>                                                                                                                                                      |
| <b>Modelado del ciclo hidrológico de la Amazonia y sus áreas húmedas</b> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Interacciones hidrodinámicas río-llanura en múltiples escalas (Paiva et al., 2013a; Rudorff et al., 2014b; Sorribas et al., 2020; Wilson et al., 2007).</li> <li>2) Dinámica de las aguas subterráneas en múltiples escalas y climas, e interacción agua subterránea - llanura de inundación (Miguez-Macho y Fan, 2012).</li> <li>3) Componentes TWS (superficie, subsuperficie) a escala de cuenca (Paiva et al., 2013a; Pokhrel et al., 2013).</li> </ol>                                                                                              | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Resolución espacio-temporal más fina de la dinámica de inundaciones, considerando procesos de sedimentación, en diversos tipos de áreas húmedas (llanuras de inundación e interfluviales).</li> <li>2) Mejor parametrización de los procesos de aguas subterráneas en toda la cuenca Amazónica.</li> <li>3) Falta de convergencia entre estimaciones de partición de almacenamiento de agua (por ejemplo, estimaciones divergentes de la fracción de agua superficial).</li> </ol>                                                                                                                          |
| <b>Ecosistemas Acuáticos</b>                                             | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Integración de las variaciones temporales y espaciales de las inundaciones y hábitats acuáticos asociados a la estimación de los flujos de dióxido de carbono y metano hacia la atmósfera (Melack et al., 2004; Richey et al., 2002).</li> <li>2) Estimación del área de los principales hábitats acuáticos en la Amazonia y sus variaciones estacionales e interanuales (Hess et al., 2015; Melack y Hess, 2010).</li> <li>3) Biomasa y crecimiento de las plantas acuáticas en llanuras de inundación (M. Costa, 2005; Silva et al., 2013).</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Extensión de suelos saturados bajo bosques y en pasillos riparios.</li> <li>2) Modelado de variaciones de inundación en áreas húmedas interfluviales y en sabanas.</li> <li>3) Extensión de arroyos y pequeños ríos, especialmente en la región Andina.</li> <li>4) Datos topográficos de alta resolución en llanuras de inundación.</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Cambios Ambientales</b>                                               | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Efectos de los cambios en el uso del suelo sobre la escorrentía (Costa et al., 2003).</li> <li>2) Influencia de los cambios por el uso del suelo en el inicio de la estación húmeda (Butt et al., 2011; Leite-Filho et al., 2019), la duración de la estación húmeda (Leite-Filho et al., 2020) y la precipitación total (Leite-Filho et al., 2021).</li> </ol>                                                                                                                                                                                          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Necesidad de entender mejor las interacciones entre los cambios locales en el uso del suelo y los mecanismos climáticos a gran escala en el ciclo del agua de la cuenca Amazónica.</li> <li>2) Iniciar el monitoreo de la degradación forestal en sus diferentes formas, para que los efectos a largo plazo sobre la hidrología forestal puedan ser estudiados.</li> <li>3) Aplicar las técnicas existentes para evaluar las alteraciones en las propiedades del agua y de la llanura de inundación causadas por alteraciones antrópicas (alteración del uso del suelo, represamiento, minería).</li> </ol> |



# **La cuenca amazónica como *laboratorio de teledetección* para la hidrología**

Como la mayor cuenca hidrográfica del mundo, caracterizada por fuertes señales hidrológicas como la precipitación, la evapotranspiración, el cambio en el almacenamiento del agua y escorrentías fluviales, la cuenca amazónica ha sido un laboratorio natural e ideal para el desarrollo pionero de múltiples técnicas de teledetección y sus aplicaciones, y así fomentar nuestra comprensión de los procesos hidrológicos. La **Tabla 7** resume, para múltiples variables

hidrológicas, los principales desarrollos realizados en el campo de teledetección sobre la cuenca, junto con los revolucionarios conocimientos adquiridos en relación al funcionamiento hidrológico de la Amazonía. Adicionalmente, la **Figura 14** ilustra las principales características de los componentes de almacenamiento hidrológico y de los flujos en la Amazonía, caracterizados por las observaciones y análisis mediante la teledetección. En las últimas décadas, la necesidad de entender los cambios ambientales en curso en la cuenca amazónica, y que podrían impactar los ciclos globales de agua, energía y carbono, motivó una serie de esfuerzos multidisciplinares e integradores que promovieron avances científicos en nuestra comprensión sobre la hidrología y los ecosistemas amazónicos (**Tabla 8**).



**Figura 14:** Ilustración esquemática de los procesos hidrológicos del ciclo del agua en la cuenca amazónica. Se muestran los principales sensores a bordo de los satélites en órbita que han ayudado a medir estos procesos. Se muestran las estimaciones anuales promedio de cada componente en toda la cuenca. Las referencias (\*) relacionadas a esas estimaciones se presentan con el texto en el capítulo 13.

Los avances en las estimaciones de la precipitación usando la teledetección permitieron la caracterización de la distribución espacial y temporal de las precipitaciones a escala local y regional sobre la cuenca amazónica y proporcionaron registros suficientemente extensos para evaluar las tendencias pluviométricas durante las últimas décadas (**Tabla 7** y **Tabla 2** para productos de precipitación desarrollados).

La precipitación promedio en la cuenca fue estimada en 2200 mm por año (**Figura 3**), y las lluvias más intensas ocurrieron en regiones de *hotspot* en la cordillera de los Andes iniciadas por procesos de convección alterados por la topografía, donde las precipitaciones pueden alcanzar valores superiores a 6000 mm por año (Chavez y Takahashi, 2017; Espinoza et al., 2015; **Figura 3**). El análisis a gran escala de la precipitación estimada por teledetección reveló el efecto de los vientos sobre grandes cuerpos de agua que causan la reducción de las precipitaciones en esas áreas (Paiva et al., 2011).

Las observaciones mediante teledetección fueron fundamentales para proporcionar las primeras estimaciones de la evapotranspiración a gran escala en regiones tropicales, especialmente en la Amazonía. Además, mostraron datos observacionales sin precedentes para la evaluación, calibración y validación de modelos (**Tabla 2**). La teledetección también ha permitido la caracterización de la variabilidad temporal y espacial de la *ET* sobre la cuenca amazónica (**Figura 4**) y a comprender los factores ambientales que la determinan, revelando regímenes contrastantes entre los más limitados por energía en la parte ecuatorial de la cuenca y los regímenes más limitados por disponibilidad hídrica en las áreas al sur (Maeda et al., 2017). La evapotranspiración promedio acumulada anual de la cuenca amazónica se estima en 1100 a 1500 mm por año (con base en los modelos globales SSEBOp, MOD16, PML y GLEAM - **Figura 4**, y el balance hídrico en Builes-Jaramillo y Poveda, 2018), con tasas más altas en las regiones norte, como en la cuenca del río Negro, disminuyendo hacia las regiones del sur (Baker et al., 2021; Maeda et al., 2017). Varios enfoques basados en teledetección arrojaron divergencias significativas en la estimación de la evapotranspiración sobre la cuenca (**Figura 4** y **Figura 10**). Por ejemplo, las tasas anuales de *ET* basadas en la teledetección a la escala de la cuenca fueron 15-37% más altas que las obtenidas a partir de balances hídricos (Baker et al., 2021).

La caracterización de las aguas superficiales continentales, incluyendo su elevación y extensión, fue posible gracias a adaptaciones de técnicas de satélite no proyectadas inicialmente para aplicaciones en la hidrología o el monitoreo de aguas interiores. Un ejemplo claro ocurrió con las misiones de altimetría espacial, inicialmente proyectadas para observar el océano, pero con aplicaciones prometedoras en los grandes ríos de la Amazonía (Guzkowska et al., 1990) y con potencial para estimar el nivel del agua superficial de ríos y lagos. Desde entonces, se desarrollaron varias bases de datos de altimetría para el monitoreo global de lagos y ríos (**Tabla 3**). La

técnica de interferometría diferencial SAR, originalmente desarrollada en el campo de la geofísica, también fue probada y aplicada por primera vez en las llanuras de inundación de la Amazonía central para caracterizar los cambios del nivel del agua (Alsdorf et al., 2000). Las técnicas de altimetría y SAR fueron importantes para caracterizar las variaciones del nivel de la superficie del agua en los ríos amazónicos y su conectividad con las llanuras de inundación (Park, 2020). El gradiente de la superficie del agua del río Amazonas varía tanto espacial como temporalmente, con valores que van de  $1,5 \text{ cm km}^{-1}$  (800–1020 km aguas arriba de la desembocadura) a  $4,0 \text{ cm km}^{-1}$  (2900–4000 km aguas arriba de la desembocadura; Birkett et al., 2002). El pulso de la inundación monomodal del río Amazonas se captura bien mediante la altimetría por radar (amplitud de 4-12 m; **Figura 5**). Ese pulso controla las variaciones de la superficie del agua en las llanuras de inundación de la Amazonía central. Durante el proceso anual de crecida, las variaciones en los ríos y llanuras de inundación adyacentes, obtenidas por SAR o altimetría, son similares (Alsdorf et al., 2007), pero la conectividad se reduce durante el período de aguas bajas (Park, 2020) ya que los flujos son controlados por la topografía local (Alsdorf et al., 2007) y el nivel del agua superficial en ambos ambientes no siempre es equivalente (Alsdorf, 2003).

El primer mapeo por teledetección a gran escala de la extensión de las aguas superficiales también fue realizado para la cuenca amazónica (Sippel et al., 1994) usando observaciones de sensores de microondas pasivos. A partir de varios sensores, muchas estimaciones y bases de datos fueron desarrolladas a diferentes escalas espaciales y temporales (**Tabla 4**). Esos sensores incluyen un mapeo innovador de alta resolución espacial de áreas húmedas y vegetación inundada usando SAR en la banda L (Hess et al., 2003), lo que proporcionó las primeras estimaciones de la extensión de la inundación en la cuenca amazónica, variando entre 285 mil y 635 mil  $\text{km}^2$  durante los períodos de aguas bajas (Oct-Dic) y altas (Abr-Jun), respectivamente (Hess et al., 2015; **Figura 6**). Existen diferencias significativas entre las varias estimaciones de la extensión de las aguas superficiales basadas en teledetección sobre la cuenca (**Figura 6**), en general, con menor área máxima inundada encontrada por productos a escala grosera con relación a los mapas derivados de SAR. Se realizaron enfoques seminales con datos de teledetección para delinear el área de aguas superficiales de la Amazonía a gran escala y la extensión de los bosques inundables, aguas abiertas y plantas herbáceas, revelando sus complejos patrones estacionales e interanuales influenciados por la variabilidad local y regional (Aires et al., 2017; Hamilton et al., 2004; Hess et al., 2015; Melack y Hess, 2010). Mientras el ancho de la llanura

de inundación del río Amazonas es similar en toda la Amazonía central, el área del bosque inundable disminuye de aguas arriba hacia aguas abajo, donde tanto el número como el tamaño de los lagos (áreas de agua abierta) aumentan (Hess et al., 2015; Mertes et al., 1996).

En combinación con los datos de campo, el mapeo de la extensión de las aguas superficiales en la cuenca amazónica permitió estimaciones regionales pioneras en las emisiones de metano (**Tabla 7**), con una estimación de  $\sim 22$  Tg C por año para la llanura (Melack et al., 2004). La configuración espacial de los hábitat de la llanura de inundación de la Amazonía en relación a los tipos de vegetación está relacionada a sus patrones de inundación (**Figura 14**; Ferreira-Ferreira et al., 2015). Las plantas acuáticas herbáceas en las llanuras de inundación de la Amazonía central tienen un crecimiento vinculado a la variación del nivel del agua y a la extensión de la inundación (M. Costa, 2005; Silva et al., 2013). Además, el efecto creciente de las represas en la cuenca amazónica ha sido evaluado por medio del análisis de la dinámica de la extensión de las crecidas (Li et al., 2020; Souza et al., 2019) y de sus impactos en la mortalidad de los árboles (Resende et al., 2019).

La primera caracterización morfométrica en la cuenca amazónica utilizando datos de teledetección mostró que un 11% de la llanura de inundación a lo largo del río Amazonas y de sus afluentes más bajos está cubierta por lagos (Sippel et al., 1992). La topografía de la llanura de inundación a lo largo del río Amazonas es compleja, con varios canales y lagos conectados al río (Latrubesse, 2012; Mertes et al., 1996). Los anchos de los canales de la llanura de inundación varían bastante (10-1000 m), y las profundidades de los canales están extremadamente conectadas a la amplitud local del pulso de inundación del río Amazonas (8-12 m, Trigg et al., 2012; **Figura 7**). La reciente captura de casi todo el flujo de agua del río Araguari por el río Amazonas, que se trata de la primera observación conocida del desarrollo de redes de distribución estuarinas por erosión de las cabeceras, también ha sido documentada mediante técnicas de teledetección (dos Santos et al., 2018). La necesidad de usar datos topográficos precisos para aplicaciones hidrológicas ha sido enfatizada en varios estudios de la Amazonía central (Baugh et al., 2013; Wilson et al., 2007; Yamazaki et al., 2012a), en los que se hicieron mejoras importantes, como la remoción de la vegetación. Los MDEs globales aún no representan con precisión la topografía de la llanura de inundación, pero los datos de extensión de agua superficial combinados con el nivel del agua superficial permitieron el primer mapeo topográfico en áreas estacionalmente inundadas en la Amazonía central con

una precisión de 0,89 m (Fassoni-Andrade et al., 2020b). En esas áreas, un 75% de las áreas de aguas abiertas tienen una profundidad inferior a 2 m (8 m) en el período de aguas bajas (altas) (Fassoni-Andrade et al., 2020b).

El Río Amazonas exporta el mayor caudal de sedimentos hacia el océano, en el mundo (1,1 mil millones de toneladas por año); (Armijos et al., 2020; **Figura 14**). Varios estudios precursores como el desarrollo de algoritmos usando la teledetección para caracterizar la composición del agua de ríos y lagos han sido realizados principalmente en la Amazonía (ver **Tabla 5**), como en el caso de las estimaciones pioneras de concentración de sedimentos en ríos (Bayley y Moreira, 1978; Mertes et al., 1993), clorofila en lagos de llanuras (Novo et al., 2006), materia orgánica disuelta coloreada (M. P. da Silva et al., 2019). El patrón espacio-temporal de esos componentes está vinculado a las variaciones del pulso de inundación del río y a los procesos de mezcla de diferentes fuentes. Las profundidades someras durante el período de aguas bajas y la gran área de lagos de llanura de inundación favorecen las condiciones de resuspensión de los sedimentos (Bourgoin et al., 2007; Fassoni-Andrade y Paiva, 2019; **Figura 8**). El mapeo de la clorofila en lagos de llanura mostró mayores concentraciones de pigmento durante la estación de las aguas bajas (Novo et al., 2006). Tendencias crecientes en la concentración de sedimentos en los ríos fueron vinculadas a los cambios en el uso del suelo (Martinez et al., 2009; río Amazonas) y al impacto de la explotación minera (Lobo et al., 2015, 2016; río Tapajós). Por otro lado, la construcción de las represas de Santo Antônio y Jirau parece haber contribuido con una reducción en la concentración de los sedimentos del río Madera (Latrubesse et al., 2017; Li et al., 2020).

Debido a los grandes cambios espaciales y temporales del agua dulce almacenada en la superficie, en la zona radicular del suelo y en los acuíferos, la cuenca amazónica es el laboratorio ideal para explorar las mediciones de las variaciones del campo de gravedad de la misión del satélite GRACE, que causan cambios en el TWS por causa de la redistribución de la masa de agua sobre las superficies continentales (**Figura 9**). Las primeras estimaciones provenientes de GRACE en las variaciones del TWS (Tapley et al., 2004) y en los cambios en el almacenamiento de las aguas subterráneas (Frappart et al., 2011) fueron presentadas para la cuenca amazónica. El cambio del TWS en la Amazonía se estima en  $\sim 1800\text{--}2700\text{ km}^3$  por año (**Figura 14**) con diferentes contribuciones del almacenamiento de agua superficial ( $\sim 49\%$ ), de la humedad del suelo de la zona radicular ( $\sim 27\%$ ), y del agua subterránea ( $\sim 24\%$ ) (Frappart et al., 2019). El tiempo de residencia del agua almacenada en la cuenca

amazónica, o sea, el tiempo promedio en que el agua permanece en la cuenca antes de salir por escorrentía o por evapotranspiración se estimó en dos meses (Tourian et al., 2018). Los datos de GRACE ayudaron a monitorear períodos de inundaciones (por ejemplo, 2009) y de sequías extremas (por ejemplo, 2005, 2010; Chen et al., 2009), y así cuantificar el déficit del agua durante esos eventos (Frappart et al., 2012), comprender la dinámica de las aguas subterráneas en diferentes escalas y climas, y la interacción entre las llanuras de inundación y las aguas subterráneas (Miguez-Macho y Fan, 2012).

La teledetección probó ser un gran complemento para las observaciones *in situ* que han sido tradicionalmente usadas para calibración, asimilación y validación de modelos hidrológicos e hidrodinámicos (Tabla 6 y Figura 11). En el caso de la cuenca amazónica el desarrollo pionero o la aplicación de modelos proporcionó un entendimiento mucho mayor de los sistemas río-llanura en toda la cuenca (Coe et al., 2002; Paiva et al., 2013a; Rudorff et al., 2014b; Sorribas et al., 2020; Trigg et al., 2009; Wilson et al., 2007; Yamazaki et al., 2011), del papel de las aguas subterráneas en la amortiguación hidrológica y en la dinámica de las cuencas hidrográficas (Cuartas et al., 2012), y de la distribución del almacenamiento total del agua (Paiva et al., 2013a; Pokhrel et al., 2013). Por otra parte, Wilson et al. (2007) desarrollaron uno de los primeros modelos hidráulicos a gran escala. El modelo hidrológico e hidrodinámico a gran escala de toda la cuenca por Paiva et al. (2013a) permitió la representación de procesos físicos como los efectos de remanso en el río principal y la atenuación del pulso de inundación debido al almacenamiento del agua en las llanuras de inundación. Estas aplicaciones a gran escala, que abrieron el camino para aplicaciones de modelos hidrodinámicos globales, se utilizan hoy día para comprender el riesgo de inundación desde la escala continental hasta la escala terrestre (Bates et al., 2021, 2018). Las aplicaciones de modelos bidimensionales en un tramo del río Amazonas mostraron que la llanura de inundación recibe grandes cantidades de agua del río, y pequeños aumentos en los picos del caudal promueven grandes cambios en ese flujo (Rudorff et al., 2014a). Recientemente, Sorribas et al. (2020) estimaron, utilizando un modelo innovador de rastreo hidrológico, los tiempos de viaje de las aguas superficiales a lo largo de la cuenca amazónica en 45 días (mediana), con un 20% de las aguas del río Amazonas fluyendo a través de las llanuras de inundación. Además, con la integración de datos de teledetección y modelado hidrológico, ha sido posible evaluar las inundaciones y las sequías históricas (Frappart et al., 2012; Wongchuig et al., 2019).

Las técnicas de teledetección también fueron importantes para entender cómo responde el ciclo hidrológico a los cambios ambientales. Cambios a largo plazo en la escorrentía de los ríos podrían ser atribuidos a cambios en la cobertura del suelo por causa de las variaciones en la evapotranspiración, como se mostró por primera vez para el río Tocantins (Costa et al., 2003). La escorrentía promedio anual aumentó un 24% entre 1949-1986 y 1979-1998, asociada al aumento del uso del suelo para la agricultura en la cuenca (del 30% hacia el 49%). La presencia de bosque fue considerada importante para determinar los patrones de precipitación, tanto dentro como fuera de la región. Las raíces profundas, el bajo nivel de albedo y las altas tasas de *ET* del bosque tropical llevan a que el inicio de la estación húmeda ocurra varias semanas antes de lo que sería sin ella, en un mecanismo denominado “bomba de humedad por convección rasa” (*shallow convection moisture pump*) (Wright et al., 2017). Se constató que los cambios en los flujos de la superficie terrestre motivados por la deforestación causaron reducciones en el volumen total de precipitación, atrasos en el inicio de la estación húmeda y períodos más largos de sequía durante la misma, con consecuencias negativas para la generación de energía hidroeléctrica, la agricultura regional y la resiliencia del propio bosque (Arias et al., 2020; Butt et al., 2011; Costa, 2020; Leite-Filho et al., 2020; Spera et al., 2014; Stickler et al., 2013).



132

**Las ventajas *de*  
*los conocimientos*  
*adquiridos* en la  
Amazonía para  
entender la hidrología  
de otras grandes  
cuencas hidrográficas  
tropicales**

La cuenca amazónica puede ser vista como un laboratorio de teledetección para ayudar a comprender el ciclo del agua y la hidrología en general. Aunque estos avances han impulsado el entendimiento científico de la hidrología amazónica, también han incentivado el desarrollo de modelos, técnicas y análisis que han contribuido para una mejor comprensión de los ciclos hidrológicos de otras grandes cuencas a escala global. Sin ser exhaustivos, hemos discutido aquí algunos estudios clave que se han beneficiado de esos avances y hemos observado cómo estos han contribuido al estudio de la hidrología en otras regiones. En particular, como la segunda mayor cuenca hidrográfica del mundo, con características ambientales similares a las de la cuenca amazónica, con extensas llanuras de inundación y bosques densos, la Cuenca del río Congo se ha convertido en la nueva frontera de la investigación hidrológica tropical (Alsdorf et al., 2016), atrayendo considerable atención de la comunidad científica en los últimos años y beneficiándose de los conocimientos adquiridos en la hidrología amazónica. La conferencia *Hydrologic Research in the Congo Basin* en Washington, D.C (EE. UU.), en 2018, delineó nuevas oportunidades de investigación para esta cuenca. Este esfuerzo de reunir comunidades africanas e internacionales en torno al objetivo común de una mejor comprensión de la respuesta de la cuenca del Congo debido a los cambios climáticos, ha llevado a la elaboración de un extenso documento (Alsdorf et al., 2021) que indica la utilidad de las metodologías de teledetección y de modelos construidos para la cuenca amazónica.

El primer desarrollo de conjuntos de datos de altimetría por satélite (capítulo 4) en la cuenca amazónica fue transformado en conjuntos de datos globales de acceso libre, proporcionando una estimación a largo plazo de la elevación de la superficie del agua en miles de estaciones virtuales (Tabla 3), permitiendo así la caracterización de la variabilidad de la hidrología superficial a partir de la altimetría en la cuenca del Congo (Paris et al., 2020), en las aguas continentales de la India (Ghosh et al., 2017) y en la cuenca del río Níger (Normandin et al., 2018). La integración de la altimetría por satélite y el modelado hidrológico ha logrado avances destacados en la Amazonía, los que incluyen la validación de modelos y el desarrollo de curvas de calibración (relación entre el nivel del agua y el caudal) para el monitoreo casi en tiempo real del caudal desde el espacio (capítulo 10), y que posteriormente han sido aplicadas en otras cuencas tropicales como la del Congo (Kim et al., 2021, 2019; Paris et al., 2020), del Tsiribihina (Andriambelason et al., 2020), del Níger (Fleischmann et al., 2018) y del Ogooué (Bogning et al., 2020).

Estudios basados en los desarrollos iniciales de la teledetección en la Amazonía

también han adoptado enfoques hidrológicos comparativos, por ejemplo, estudiando de manera conjunta la dinámica de las llanuras de inundación en la Amazonía central y el Congo, y en las áreas húmedas del Brahmaputra mediante SAR (H. C. Jung et al., 2010) y GRACE (Lee et al., 2011), destacando las características únicas de cada uno de esos sistemas fluviales. La cuenca amazónica, con sus extensas llanuras de inundación, contrasta considerablemente con la *Cuvette Centrale* del Congo, dominada principalmente por áreas húmedas interfluviales, con menor interacción entre el río y las áreas húmedas (H. C. Jung et al., 2010). Después de realizar estudios a partir de observaciones mediante SAR para mapear la extensión de las inundaciones y de las áreas húmedas, y así distinguir los tipos de vegetación en la Amazonía (capítulo 5), se logró generar la dinámica de inundaciones estacionales, las variaciones del nivel del agua, el almacenamiento del agua y los tipos de vegetación sobre la cuenca del Congo por medio de datos de altimetría de las misiones JERS-1 (Rosenqvist y Birkett, 2002), ALOS/PALSAR SAR y Envisat (Kim et al., 2017; Lee et al., 2015; Yuan et al., 2015), y mediante GRACE (Yuan et al., 2017).

El desarrollo de técnicas de teledetección mediante el uso de múltiples satélites a gran escala para monitorear la variabilidad del almacenamiento de agua superficial, usando técnicas y análisis desarrollados y evaluados inicialmente para la cuenca amazónica (capítulos 5 y 8), fueron luego aplicados al río Orinoco en América del Sur (Frappart et al., 2015), al estudio de sequías en el río Ganges-Brahmaputra (Papa et al., 2015) y a la cuantificación de la contribución relativa de las variaciones de las aguas superficiales y subterráneas en los ríos Mekong (Pham-Duc et al., 2019), Chad (Pham-Duc et al., 2020) y Congo (Becker et al., 2018; Yuan et al., 2017).

Muchos avances en el desarrollo de modelos hidrológicos fueron evaluados por primera vez en la cuenca amazónica dada la relevancia global en términos de clima y ecosistemas, y la presencia de grandes llanuras de inundación y de dimensiones que coinciden con la resolución adoptada en modelos de escala gruesa (capítulo 10), llevando posteriormente al desarrollo de modelos a escala global (Yamazaki et al., 2011; Bates et al., 2018). Algunos ejemplos incluyen la introducción de esquemas de inundación a escala de cuenca que luego fueron replicados en otras cuencas hidrográficas (Andriambeloson et al., 2020; Paris et al., 2020), a escala continental (Siqueira et al., 2018) y global (Alkama et al., 2010; Decharme et al., 2012; Yamazaki et al., 2011). Avances recientes en el transporte de sedimentos a gran escala, usando observaciones de teledetección y modelado, siguieron un camino similar, con trabajos pioneros en la Amazonía, (capítulo 7) seguidos por avances para toda América del Sur (Fagundes et al., 2021).



# 133

## **Enfrentando las *lagunas del* *conocimiento actuales* con futuras misiones de satélite**

Esta revisión ha destacado los avances significativos logrados durante más de tres décadas de avance científico en la hidrología y en el ciclo del agua de la cuenca amazónica mediante la ayuda de la teledetección. También identifica las principales lagunas de conocimiento que restan

para llegar a una comprensión global de la hidrología amazónica. En este sentido, se resumen dichas lagunas de conocimiento (Tabla 7 y Tabla 8) y se discuten las oportunidades de investigación asociadas a las futuras misiones de observación de la Tierra.

En lo que se refiere a la precipitación basada en la teledetección, entre los desafíos actuales a nivel del algoritmo se encuentran la definición de umbrales dinámicos de brillo de temperatura en los sensores infrarrojos y el procesamiento de datos de microondas para evitar confundir la cima de los picos nevados de los Andes con nubes frías (Dinku et al., 2011; Toté et al., 2015). Se necesitan mejores algoritmos en el sensoramiento de la precipitación sólida para una comprensión más exacta de los procesos locales en las cabeceras de la cuenca amazónica, localizadas principalmente en la cordillera de los Andes (Hurley et al., 2015; Levizzani et al., 2011; Peng et al., 2014). Las observaciones *in situ* son fundamentales para la calibración de sensores remotos. Por lo tanto, una red estratégica de estaciones convencionales y radares terrestres en puntos clave de la Amazonía debe necesariamente formar parte de una agenda futura. Por último, nuevas tecnologías de bajo costo, como los nanosatélites, probaron ser viables, manteniendo los requisitos científicos y deben continuar siendo incentivadas en las futuras misiones (Peral et al., 2019).

Los modelos de teledetección pueden estimar razonablemente las tasas promedio de la *ET* en la cuenca amazónica, pero aún continúa siendo un desafío representar correctamente la estacionalidad de la *ET*, así como comprender las diferencias entre los componentes individuales de la *ET* como la evaporación del suelo, la transpiración y la interceptación vegetal. Se precisarán más estudios para separar los controles de *ET* a lo largo de la cuenca (la limitación de agua y energía, y la fenología de la vegetación), una vez que múltiples factores operan simultáneamente (Maeda et al., 2017). Además, existe una gran laguna de conocimiento sobre la diferencia entre *ET* en tierras altas y húmedas de la Amazonía, y el efecto de la evaporación de las aguas abiertas sobre el clima regional. Los modelos actuales basados en satélite necesitan minimizar el uso de parametrizaciones (o mejor dicho, limitarlas) y mejorar la precisión de los datos de entrada. Una gran limitación de los modelos SEB es que requieren condiciones de cielo despejado, lo que puede ser mejorado con el uso de datos de microondas (Holmes et al., 2018) y por medio de la combinación con otros tipos de modelos de *ET* como los basados en índices de vegetación. Las mediciones *in situ* son fundamentales para alcanzar este objetivo, pero hoy existen sólo ocho torres de flujo con datos disponibles públicamente en

la cuenca amazónica. Para modelos basados en índices de vegetación (por ejemplo, MOD16, GLEAM), también es necesario aumentar la comprensión del control del déficit hídrico del suelo sobre la *ET* en toda la cuenca, dada la alta dependencia de esos productos con relación al índice de humedad del suelo.

Algunas misiones en marcha y futuras proporcionarán un nuevo entendimiento de la dinámica de la *ET* en la cuenca amazónica. La misión ECOSTRESS aborda la respuesta de la vegetación al déficit de agua con detalles sin precedentes, mientras que VIIRS recoge imágenes visibles e infrarrojas, extendiendo la serie temporal de su predecesor MODIS y mejorando sus estimaciones. La misión FLEX mapeará la fluorescencia de la vegetación, un *proxy* de la actividad fotosintética y del estrés y la salud de la vegetación. La continuidad de las misiones Landsat garantizará el análisis de la *ET* a largo plazo a gran escala espacial, mientras la misión GRACE-FO proporcionará nuevos datos para enfoques de balance hídrico que estimen la *ET*. Esto nos permitirá finalmente modelar la *ET* en alta resolución espacial (< 30 metros) y por largos períodos (> 40 años).

El mapeo de cuerpos de agua superficiales y ecosistemas acuáticos de la Amazonía aún es un desafío para las observaciones de teledetección actualmente disponibles. A pesar del progreso sustancial en las últimas décadas, aún existen limitaciones. Hoy en día, hay un *trade-off* en la cuenca amazónica entre resoluciones espaciales y temporales en observaciones por satélite, generalmente con alto muestreo temporal asociado a una menor resolución espacial y viceversa. Por lo tanto, se necesita una resolución espacio-temporal más fina para monitorear adecuadamente la extensión, el nivel y la pendiente de las aguas superficiales y la inundación de áreas húmedas. También existe la necesidad de mejorar la precisión de esas estimaciones para comprender mejor los fenómenos locales, como los cambios y las dinámicas entre ríos y llanuras, o los complejos procesos de inundación en extensas áreas interfluviales. Del mismo modo, sólo algunos lagos y reservorios de la Amazonía son monitoreados rutinariamente a partir del espacio, usando altimetría. La vegetación densa y la cobertura de nubes en la cuenca amazónica aún dificultan el monitoreo de las aguas superficiales, así como bosques permanentes o estacionalmente inundados y plantas herbáceas flotantes.

La futura misión NASA/ISRO, SAR de banda L, con su combinación de longitud de onda del radar y polarizaciones y pasajes orbitales de 12 días, ayudará a medir con precisión pequeños cambios en la extensión de las aguas superficiales en la cuenca

amazónica, incluyendo áreas con bosque. Además, la misión SWOT, a ser lanzada a fines de 2022, permitirá un monitoreo sin precedentes de las aguas superficiales de la Amazonía y de los ríos con una resolución de 100 m, gracias a su tecnología basada en la altimetría de tipo *swath* (bandas anchas) del instrumento KaRIn, con cobertura casi global y observación conjunta de la elevación de la superficie del agua, extensión, ancho del río y declividad. La precisión centimétrica del nivel del agua y de la pendiente (Desai, 2018) ayudará a caracterizar mejor los flujos de agua dulce en la cuenca amazónica. Las actuales misiones de altimetría por satélite, especialmente las del programa Copernicus, están marcando la era del monitoreo operacional del espacio a gran escala para las próximas décadas, con claros beneficios para grandes cuencas transfronterizas tropicales, como la cuenca amazónica. Con casi dos mil estaciones virtuales distribuidas por toda la cuenca, y potencialmente centenares más disponibles gratuitamente en varios lugares, la altimetría convencional por satélite puede complementar favorablemente la tradicional y también necesaria red *in situ*. Debido a que la principal limitación para el uso más amplio de la altimetría satelital actual continúa siendo su muestreo temporal relativamente bajo, futuras misiones que se encuentran en desarrollo, como SMASH (Blumstein et al., 2019), lanzado junto con la constelación actual, debe ayudar a resolver este problema. Sin embargo, el desarrollo de más observaciones mediante la teledetección es necesario para caracterizar completamente la extensión y elevación de la superficie del agua de la Amazonía. En el futuro estos deben combinar las ventajas de las mediciones globales SWOT con un alto muestreo temporal proporcionado por satélites tipo SMASH, integrados en una red de satélites que permita obtener datos globales y diarios.

Además de los conceptos innovadores involucrados en estas nuevas misiones de observación de la Tierra, es importante también destacar que la disponibilidad sin precedentes de información sobre la extensión y la elevación de la superficie del agua de la Amazonía desafiará las actuales capacidades de análisis. El desarrollo de nuevas herramientas de análisis o técnicas de fusión con inteligencia artificial para combinar varias observaciones de teledetección (visible, IV, MW, GNSS-R) serán necesarios. Del mismo modo, nuevas técnicas de fusión de modelado local a regional y la asimilación de datos también deben aumentar significativamente nuestra capacidad para modelar la cuenca amazónica y las variaciones de su ciclo hidrológico.

La topografía y batimetría de la llanura de inundación y del canal fluvial aún no

han sido totalmente caracterizadas en la cuenca amazónica, a pesar de los esfuerzos recientes con estimaciones locales y regionales, impidiendo una mejor comprensión de los hábitats vinculados al pulso de inundación y limitando la precisión de los modelos hidráulicos. Además, la relación entre la concentración de sedimentos en los ríos y la migración de los canales sigue siendo poco comprendida (Constantine et al., 2014). Se necesitará el desarrollo de nuevas técnicas y datos de teledetección para el mapeo topográfico. El principal desafío es la remoción de la vegetación, pues muchas bandas y sensores no consiguen penetrar en la misma. Datos LiDAR y altimétricos, como el ICESat-2 (lanzado en 2018), que permiten el mapeo del terreno por debajo del dosel, aún han sido poco explorados en la cuenca amazónica.

Los datos de interferometría y altimetría han sido utilizados en la cuenca del Congo para estimar la topografía de la llanura de inundación (Yuan et al., 2019), sin embargo aún no han sido capaces de proporcionar la topografía de toda el área. Por su parte, los satélites NISAR y SWOT abrirán oportunidades con estimaciones más precisas de la extensión del agua superficial y la distribución del nivel sobre los cuerpos de agua. Así, se pueden aplicar nuevas metodologías para mapeos topográficos, como el método de la línea del agua (Salameh et al., 2019) y el Flood2Topo (Fassoni-Andrade et al., 2020a). De cualquier modo, la observación de la batimetría de ríos y llanuras de inundación desde el espacio continuará siendo un desafío permanente, ya que aún faltan soluciones adecuadas para su medición directa, aún cuando futuras observaciones altimétricas parecen abrir nuevos caminos hacia el futuro.

Los ríos de agua blanca, negra y clara de la cuenca amazónica tienen características particulares, con grandes variaciones de COAs (sedimentos, clorofila y CDOM). A pesar del desarrollo de muchos algoritmos para estimar estos componentes, como Topp et al. (2020) han relatado, pocos han sido utilizados para responder las cuestiones científicas a nivel global. Además, la caracterización de procesos naturales, como la variación espacio-temporal del fitoplancton en lagos, no fue ampliamente estudiada. Las estimaciones de la concentración de sedimentos podrían ser mejor aprovechadas para evaluar los efectos de las represas, la explotación minera y los cambios en el uso del suelo en la cuenca amazónica. Por otro lado, aún existen desafíos técnicos a enfrentar sobre las estimaciones que usan datos de teledetección, como la alta cobertura de nubes en la cuenca. El principal reto es la discretización de los espectros de los COAs, que puede ser parcialmente superado con nuevos sensores de alta resolución radiométrica y espectral.

El reciente lanzamiento de la misión GRACE *Follow-on*, en 2018, ofrece la oportunidad de extender el monitoreo de los cambios del TWS y GWS por más de dos décadas, permitiendo analizar el impacto de los eventos climáticos plurianuales como el ENSO, tanto en la suelo como en el almacenamiento de aguas subterráneas en toda la cuenca amazónica. Las principales desventajas de estos datos continúan siendo sus bajas resoluciones espaciales y temporales (200-300 km y 1 mes), que no son suficientes para estudiar la dinámica de eventos hidrológicos más locales y rápidos. Para superarlo, los sensores a bordo de la misión GRACE *Follow-on* cuentan con versiones más avanzadas de los sensores que se usaron en la misión predecesora GRACE, los que permiten una mayor precisión para mejorar la calidad y resolución espacial del TWSA estimado. La combinación de nuevos enfoques metodológicos basados en filtro de Kalman debe aumentar la resolución temporal del TWSA para valores casi diarios, sin degradar la resolución espacial (Ramillien et al., 2020, 2015). Con la futura disponibilidad de observaciones SWOT, estimaciones sin precedentes y más puntuales de almacenamiento de agua superficial en grandes áreas van a mejorar la determinación de anomalías GWS. Éstas permitirán comprender mejor las interacciones entre la dinámica de las crecidas y la recarga de acuíferos en la cuenca amazónica. El cambio de aguas subterráneas en la cuenca, que permanece poco caracterizada por los satélites, también debe beneficiarse con la integración de estas nuevas observaciones y podría ser mejor estimada para delimitar el balance hídrico en la superficie. Es imprescindible que se realice un conjunto global de observaciones dedicadas a la hidrología, con la continuidad de las misiones actuales de los satélites, para mejorar la comprensión de los patrones de hidrología con análisis más precisos del balance hídrico y para evaluar las tendencias de largo plazo.

Dadas las incertidumbres tanto de los modelos hidrológicos como en las estimaciones de teledetección, las técnicas de calibración de modelos y asimilación de datos fueron recientemente desarrolladas incorporando principalmente datos del nivel del agua (altimetría por satélite) y, en menor grado, el TWS de la misión GRACE. Otras variables que deben ser mejor comprendidas son la extensión y el almacenamiento de aguas superficiales, la humedad del suelo y la evapotranspiración. Mientras la mayoría de las aplicaciones de modelos hidrológicos e hidráulicos ha sido usada para estimar variables como la *ET*, el almacenamiento del agua del suelo, el caudal, el nivel del agua y extensión del agua superficial, nuevos estudios investigarán otras variables, como la velocidad del agua y el almacenamiento de aguas superficiales. Existe también una falta de convergencia entre los componentes de almacenamiento total de agua (por ejemplo, estimaciones divergentes de la fracción de agua superficial), lo

que debe ser abordado por medio de modelos más restrictivos con datos de satélites y mediante la realización de proyectos de intercomparación de modelos. Por otro lado, las áreas húmedas de la Amazonía fueron estudiadas principalmente para las llanuras de inundación de la Amazonía central, pero también existen otros tipos de áreas húmedas, como las grandes áreas interfluviales en los Llanos de Moxos en Bolivia, Pacaya-Samiria en Perú y en la cuenca del río Negro en Brasil que merecen más esfuerzos de la comunidad de hidrología, especialmente considerando su dinámica particular de inundación, que depende principalmente de las precipitaciones locales.

Además, el modelado bidimensional de alta resolución de los campos de velocidad del agua en toda la Amazonía y las complejas interacciones entre ríos y llanuras de inundación aún no han sido exploradas. Las partes más hacia río abajo de la cuenca amazónica permanecen relativamente inexploradas en lo referente a modelado hidrodinámico y teledetección, como es el caso del papel de la forzante hidrológica aguas arriba y la influencia oceánica en la dinámica del *continuum* río-estuario-oceano. Además, es necesaria una mejor representación de los procesos hidrológicos, por ejemplo, de la dinámica de las aguas subterráneas que es actualmente mal representada en los modelos orientados hacia la hidrología de superficie. Podríamos inferir que el futuro de los modelos hidrológico-hidrodinámicos depende de la creciente disponibilidad de nuevas bases de datos de observación de la Tierra por satélites. Estos datos incluyen informaciones de niveles y caudales derivadas de SWOT, anchos del canal, topografía de la llanura de inundación, humedad del suelo (por ejemplo, SMOS, SMAP), precipitación (por ejemplo, SM2RAIN), gravimetría (GRACE *Follow-On*), y técnicas para la estimación del almacenamiento de las aguas subterráneas (por ejemplo, Frappart et al., 2019). Estos ofrecerán la base para las estimaciones del modelado en alta resolución temporal y espacial, con el objetivo, en última instancia, de proporcionar estimaciones hidrológicas localmente relevantes en todos los ambientes (Bierkens et al., 2015; Wood et al., 2011).

Aunque los principales componentes del ciclo del agua han sido en su mayoría relativamente bien abordados en la literatura científica, como se ha mostrado en esta revisión, la humedad del suelo se destaca como el componente menos confiable en las estimaciones. Esta baja confiabilidad está relacionada a la dificultad de estimar esta variable en áreas cubiertas por vegetación densa (Prigent et al., 2005). El desempeño relativamente bajo de los actuales conjuntos de datos de humedad del suelo (por ejemplo, SMAP, AMSR-E y SMOS) en esos ambientes es muy conocido, incluso cuando los productos se combinan (Liu et al., 2011) o se fusionan (Aires

et al., 2005; Kolassa et al., 2016). La mayoría de los estudios sobre la humedad del suelo se han realizado mediante el uso de modelos hidrológicos y de datos *in situ* en algunas áreas de cabeceras de cuenca. Además, hay una ambigüedad inherente a las observaciones mediante microondas pasivo entre los suelos saturados de agua y las aguas superficiales. Consecuentemente, la gran extensión del agua superficial en la cuenca amazónica afecta la estimación de la humedad del suelo a partir de este tipo de observación. Esta ambigüedad en las observaciones por satélite llevó al desarrollo del *SMOS-based surface water product* (Parrens et al., 2017). De esta forma, hay una necesidad urgente por monitorear mejor la humedad del suelo en diferentes resoluciones espacio-temporales en la cuenca amazónica, especialmente considerando su papel preponderante en el control de la dinámica y fenología del bosque amazónico, de la *ET* y del ciclo del agua en general. Esa observación incentiva el desarrollo del *SMOS-HR*, una misión de alta resolución espacial que sucederá al satélite *SMOS* y que está actualmente en estudio de viabilidad por la Agencia Espacial Francesa (CNES), y cuyo objetivo es asegurar la continuidad de las mediciones de la banda L mientras aumenta la resolución espacial a 10 km, sin degradar la sensibilidad radiométrica y manteniendo inalterado el tiempo de revisita de 3 días.

Del mismo modo, el caudal de los ríos, históricamente una de las primeras variables hidrológicas que se observaron *in situ*, aún no se mide adecuadamente desde el espacio. Esta revisión enfatiza la necesidad de estimar con precisión la escorrentía usando la teledetección en la Amazonía con alta resolución espacial y temporal. El caudal de los ríos ya fue estimado indirectamente con datos de teledetección (p. ej., Brakenridge et al., 2007; LeFavour y Alsdorf, 2005; Tarpanelli et al., 2013; Zakharova et al., 2006), pero actualmente aún es imposible complementar satisfactoriamente la actual red *in situ* de la cuenca amazónica. Futuras misiones, como la de *SWOT*, en combinación con las actuales misiones, en breve ayudarán a avanzar en dirección a un monitoreo más global de las escorrentías a lo largo de la cuenca amazónica.

Las alteraciones ambientales en la cuenca amazónica, tanto las actuales como las futuras, hacen con que se requiera de un entendimiento de la hidrología de la cuenca desde una perspectiva como un sistema en transición. Los efectos a largo plazo de los múltiples impactos humanos (cambios en el uso del suelo, cambios climáticos, represas, explotación minera, incendios) sobre la Amazonía deben ser mejor comprendidos. Los cambios en la interacción tierra-atmósfera debido a la deforestación afectarán el ciclo del agua en la Amazonía, pero la magnitud de este

cambio aún está en debate. Hay relativamente poco entendimiento de cómo se da esta interacción, especialmente en lo que se refiere a cómo el impacto del uso del suelo afecta el clima local y que puede ser diferente en condiciones meteorológicas de gran escala, que están cambiando conjuntamente con el clima global (por ejemplo, Leite-Filho et al., 2020), y cómo esto afectaría los ecosistemas terrestres y acuáticos de la cuenca. Además, las técnicas para mapear la degradación del bosque, y diferenciar así la vegetación primaria de la secundaria, aún son relativamente nuevas. Los impactos de estos cambios más sutiles, pero generalizados en el uso del suelo, en la hidrología amazónica aún no son bien comprendidos. Por último, aunque la influencia del bosque amazónico sobre el clima y los recursos hídricos fuera de la Amazonía y esté siendo cada vez más documentada, aún no se conocen las consecuencias de su deforestación y degradación fuera de la cuenca.

Además, la proliferación de represas en cuencas tropicales como la amazónica, la del Congo y la del Mekong requieren herramientas de planificación y análisis a escala de cuenca para promover beneficios mutuos en el entendimiento de esos cambios (por ejemplo, Biswas et al., 2021; Latrubesse et al., 2017; Schmitt et al., 2019; Winemiller et al., 2016). Los datos de teledetección se destacan como poderosas herramientas para monitorear los impactos a gran escala de los reservorios existentes construidos por el hombre (por ejemplo, Resende et al., 2019), e inferir así sus características, como el nivel del agua y las relaciones entre cota-área-volumen (Fassoni-Andrade et al., 2020a; Gao et al., 2012; Hoek et al., 2019). Mejores datos y mejor conocimiento de estos impactos también son la base para mejores modelos hidrogeomorfológicos, que podrían cuantificar los impactos esperados de los reservorios planeados y, por lo tanto, ayudar a la creación de proyectos que minimicen los impactos ambientales.



# 134

**¿Cómo usar los avances científicos basados en teledetección para *promover la gestión eficiente de los recursos hídricos en la cuenca amazónica?***

La cuenca amazónica ha servido como un importante laboratorio natural para la evolución de la teledetección, generando avances científicos significativos en relación con sus procesos hidrológicos durante las últimas décadas (Tabla 7 y Tabla 8). Sin embargo, actualmente, la Amazonía enfrenta intensas presiones antropogénicas (capítulo 12), lo que sugiere urgentemente una mejor planificación de los recursos hídricos a escala de cuenca y la generación de nuevas herramientas para el monitoreo ambiental. La teledetección tiene el potencial para democratizar información esencial para los tomadores de decisión como, por ejemplo, monitorear regiones que no cuentan con datos *in situ*, o en lugares en donde la información no está disponible públicamente (Gleason y Durand, 2020). Aunque la teledetección sea ahora una realidad y el conocimiento documentado sobre la cuenca amazónica sea mucho mayor que en décadas atrás, aún hay un largo camino por recorrer para llevar estos avances hacia aplicaciones más eficaces en las tomas de decisión y la gestión de recursos hídricos.

El monitoreo de la deforestación y de los incendios pueden ser los ejemplos más avanzados y prometedores en el contexto de la gestión ambiental de la Amazonía. Desde 1988, los sistemas de monitoreo por satélite usando imágenes MODIS, Landsat y CBERS, así como DETER (Diniz et al., 2015, <http://www.obt.inpe.br/OBT/asuntos/programas/amazonia/deter/>), PRODES (<http://www.obt.inpe.br/OBT/asuntos/programas/amazonia/prodes>), Imazon (<https://imazon.org.br/categorias/boletim-do-desmatamento/>) y Queimadas (<http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>) han apoyado sistemáticamente a los gobiernos locales y múltiples organizaciones en el monitoreo y en el control de la deforestación y los incendios. Estos avances técnicos hicieron posible monitorear la deforestación en tiempo casi real, a escala de días, semanas o meses. Sin embargo, el fortalecimiento institucional y la participación de la sociedad civil aún son necesarios para promover acciones efectivas dentro de estructuras gubernamentales complejas y establecer el puente entre la tecnología y la política para la reducción de la deforestación (Finer et al., 2018).

Los países de la Amazonía cuentan con agencias de recursos hídricos, geología y servicios hidrometeorológicos consolidados como ANA, los Servicios Nacionales de Meteorología e Hidrología de Perú y Bolivia (SENAMHIs), y el Servicio Geológico Brasileño (CPRM). Estas instituciones han dedicado grandes esfuerzos a la tarea desafiante de monitorear sistemáticamente el vasto territorio y los ríos de la Amazonía, así como de incentivar el libre acceso a los datos hidrológicos.

En este sentido, la teledetección está comenzando a ser incorporada al monitoreo operacional (por ejemplo, SIPAM <http://hidro.sipam.gov.br/>, Hidrosat, Carvalho et al., 2015; simulaciones de inundaciones casi en tiempo real a escala subdiaria, Llauca et al., 2021). En particular, la precipitación ha sido ampliamente monitoreada por medio del uso de datos de teledetección por varias agencias meteorológicas, mientras otras variables del ciclo de agua han recibido menos atención. Esas organizaciones han desarrollado informes técnicos sobre la situación nacional y sobre la planificación de los recursos hídricos, que incluyen a la cuenca amazónica (como el *Relatório da Situação dos Recursos Hídricos* (Informe de la Situación de los Recursos Hídricos), la *Agência Nacional de Águas*, 2019a; (Agencia Nacional de Aguas, 2019a), el *Plano Nacional de Segurança da Água* (Plan Nacional de Seguridad del Agua), *Agência Nacional de Águas*, 2019b (Agencia Nacional de Aguas, 2019b); y las previsiones de flujo a nivel nacional y a escala horaria y diaria, proporcionadas por el SENAMHI Perú, disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/?§p=pronostico-caudales>). Actualmente, estas instituciones son apoyadas principalmente por las redes hidrometeorológicas nacionales, las cuales aún son escasas y podrían ser ampliamente mejoradas con los datos y conocimientos producidos gracias a la teledetección. Algunos de estos países también tienen leyes y reglamentaciones avanzadas sobre los recursos hídricos, como la *Política Nacional de Recursos Hídricos do Brasil* (Política Nacional de Recursos Hídricos de Brasil), creada por la Ley 9433/1997 (Brasil, 1997). Sin embargo, la mayoría de los esfuerzos para el desarrollo y la implementación de esta reglamentación se centran en las cuencas hidrográficas de las regiones más densamente pobladas, y no en la complejidad de la mayor cuenca hidrográfica del mundo, y en su contexto internacional y transfronterizo. Además, aunque la cuenca amazónica esté en el epicentro de la discusión científica internacional, parece no ser el foco principal de las acciones técnicas y científicas en el campo de los recursos hídricos en los países amazónicos, como revela la reciente síntesis de los avances de la comunidad hidrológica brasileña (Paiva, 2020).

La mayoría de los estudios sobre inundaciones en la Amazonía han buscado comprender los servicios ecosistémicos y el sistema natural (capítulos 5 y 10). Aun así, muchos centros urbanos amazónicos están bajo riesgo de inundación (por ejemplo, el río Amazonas en Iquitos, el río Madera en Porto Velho, el río Acre en Rio Branco, el río Juruá en Cruzeiro do Sul), y sufren anualmente con el desborde de ríos (Fleischmann et al., 2020). Mientras este documento estaba siendo redactado, el estado brasileño de Acre estaba recuperándose de una crisis humanitaria causada por las inundaciones del río Acre en Rio Branco, en el río Juruá en Cruzeiro do Sul y en el

río Negro en Manaus, reforzada por la pandemia de la COVID-19. Así, las diversas herramientas de monitoreo de inundación desarrolladas podrían ser traducidas en un mapeo eficaz del riesgo de inundación y del monitoreo en tiempo real para la gestión de desastres. Iniciativas internacionales como el *Copernicus Emergency Management Service* (<https://emergency.copernicus.eu/>) y la iniciativa *International Charter "Space and Major Disasters"* (<https://disasterscharter.org/>) tienen el potencial para proporcionar importantes datos de observación de la Tierra por satélite para la gestión de desastres en tiempo real. Además, el carácter transfronterizo de muchas subcuencas amazónicas (como el río Madera, con inundaciones en Porto Velho en Brasil siendo parcialmente generadas en los tramos aguas arriba de Bolivia), torna los datos de observación de la Tierra por satélite una herramienta fundamental para reducir la disparidad en la disponibilidad de datos entre los países. Por otro lado, en muchas áreas de la Amazonía, las sequías tienen un impacto social mayor que las inundaciones, debido a la interrupción del suministro de mercadería y del transporte en general a través de los ríos durante períodos extremadamente secos (Zeng et al., 2008). Esfuerzos técnicos recientes incluyen la evaluación de previsiones hidrológicas a partir de modelos hidrológicos de base física que se apoyan en la teledetección, el desarrollo de previsiones estadísticas específicas y sistemas de monitoreo en tiempo real (por ejemplo, sistema SACE/CPRM de <http://www.cprm.gov.br/sace/>; sistemas disponibles para los ríos Madera, Acre, Xingú, Branco y algunos tramos del río Amazonas), prototipos de sistemas de monitoreo basados en modelos hidrológicos (por ejemplo, *South America River Discharge Monitor - SARDIM* <https://sardim.herokuapp.com/>; Reyes et al., 2020), sistemas globales de previsión de inundaciones (por ejemplo, GLOFAS, Alfieri et al., 2013) y esfuerzos de monitoreo y alertas de peligros naturales por centros como el CEMADEN – *Centro Nacional de Alerta e Monitoramento de Desastres Naturais* (Centro Nacional de Alerta y Monitoreo de Desastres Naturales) del Brasil. Sistemas de monitoreo de sequías basados en observaciones in situ y teledetección, con apoyo de la comunidad local (por ejemplo, ANA Monitor de Sequías <http://monitordesecas.ana.gov.br/>), están evolucionando, pero aún no hay sistemas operativos de previsión hidrológica en la cuenca amazónica, a escala nacional o continental (Fan et al., 2016).

Los impactos de las actividades humanas pueden propagarse a través de los ríos amazónicos a lo largo de los múltiples países que componen la cuenca, una vez que el desarrollo continuo de proyectos hidroeléctricos y la expansión agrícola alteran las dinámicas hidrológica, sedimentaria y ecosistémica (Anderson de Castro et al., 2018; Forsberg et al., 2017). Investigaciones recientes han explorado la planificación

integrada procurando mejores soluciones para la expansión de la energía hidroeléctrica (Almeida et al., 2020; Winemiller et al., 2016), mientras organizaciones como la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA) buscan promover el desarrollo sostenible en la cuenca amazónica con la participación de todos los países amazónicos. Sin embargo, las políticas y reglamentaciones actuales a escala nacional no promueven una planificación de los recursos hídricos totalmente integrada, ya que los nuevos proyectos generalmente se evalúan de manera individual. El uso de la teledetección puede incentivar la búsqueda por un entendimiento común y transparente entre los aspectos relacionados al agua en la Amazonía..

La comunidad científica de la teledetección tiene ahora el desafío de promover el conocimiento, los conjuntos de datos y aplicaciones sobre cambios hídricos y ambientales, hacia una mejor gestión y planificación de los recursos hídricos. Estos potenciales caminos incluyen: (i) capacitación de los tomadores de decisión y múltiples interesados en el lenguaje de la teledetección (por ejemplo, *Programa de Treinamento de Sensoriamento Remoto Aplicado* (Programa de Entrenamiento de Teledetección Aplicada) - ARSET <https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/capacity-building/arset>); (ii) fomento de la participación de la comunidad local, haciendo el puente entre la ciencia basada en teledetección y el conocimiento *in situ* y tradicional (Runde et al., 2020); (iii) iniciativas de divulgación científica y ciencia ciudadana (Buytaert et al., 2014; por ejemplo [www.amazoniacienciaciudadana.org/](http://www.amazoniacienciaciudadana.org/), <https://conexoesamazonicas.org/>, <https://ipam.org.br/biblioteca/?biblioteca=artigos-cientificos>, <https://amazon.org.br/categorias/outros/>, <https://infoamazonia.org/>) (iv) desarrollo de conjuntos de datos de acceso abierto con foco en aplicaciones específicas (por ejemplo, la conservación de los ecosistemas acuáticos, Venticinque et al., 2016); (v) desarrollo de sistemas de monitoreo con foco en los cambios ambientales y en los desastres relacionados al agua; (vi) desarrollo de repositorios hidrológicos de libre acceso (por ejemplo, HYBAM, <https://hybam.obs-mip.fr/>, SERVIR-Amazonía, <https://servir.ciat.cgiar.org/>); (vii) desarrollo de una agenda de investigación a escala de cuenca centrada en el apoyo directo a la toma de decisiones sobre recursos hídricos (por ejemplo, escenarios de expansión hidroeléctrica; Almeida et al., 2020).



# 4 Recomendaciones

Con base en las lagunas de conocimiento y las perspectivas presentadas en las secciones anteriores, ofrecemos las siguientes recomendaciones para futuros estudios sobre la hidrología de la Amazonía a partir del espacio.

## Recomendación 1:

# Observaciones

Las limitaciones actuales de los datos de satélite para la cuenca amazónica están frecuentemente relacionadas con la resolución espacio-temporal (por ejemplo, para variables como nivel y pendiente del agua, extensión del agua superficial, *ET*), al intervalo de tiempo (por ejemplo, extensión de las aguas superficiales, *TWS*, *GWS*, *ET*, topografía), y a la precisión (por ejemplo, extensión de las aguas superficiales, *GWSA*). Las principales limitaciones en el monitoreo de la hidrología de la Amazonía a partir del espacio están relacionadas con la humedad del suelo y al caudal de los ríos, que han sido poco abordadas debido a la interferencia de la vegetación en los sensores o por la naturaleza de la variable en sí, respectivamente, lo que dificulta sus estimaciones mediante la teledetección. Del mismo modo, la batimetría de los canales de los ríos y de las llanuras de inundación ofrece grandes desafíos que se pueden resolver mediante la técnica de asimilación de datos de altimetría en modelos matemáticos. Las agencias espaciales nacionales y las autoridades del agua deben garantizar una creciente disponibilidad de bases de datos de teledetección de largo plazo, complementando las redes de monitoreo *in situ*, que también son fundamentales para calibrar y validar correctamente las estimaciones mediante teledetección. El tiempo de latencia en la distribución de datos de teledetección (por ejemplo, precipitación y nivel del agua) debería reducirse a algunas horas para poder ser usado en la gestión de desastres en tiempo real. A la vez, garantizar que las observaciones por satélite se archiven en bases de datos climáticos, promoviendo así la comprensión de los impactos de los cambios climáticos y las actividades humanas en la cuenca

## Recomendación 2:

# Modelos, algoritmos e integración

Las limitaciones técnicas están relacionadas al desarrollo de algoritmos (por ejemplo, para la estimación de las lluvias orográficas, CDOM y clorofila, cierre del balance hídrico, y modelos hidrodinámicos) y la fusión de datos (por ejemplo, *ET*, nivel y extensión de las aguas superficiales). El reconocimiento de las incertidumbres en múltiples datos de teledetección y el costo-beneficio entre resolución temporal y espacial señalan la necesidad de enfoques más integrativos, por ejemplo, la inteligencia artificial desempeñará un papel importante en el mapeo de patrones de inundación y evapotranspiración a largo plazo en altas resoluciones espacio-temporales. El mejor acoplamiento entre las bases de datos de observaciones de la Tierra con modelos hidrológicos-hidráulicos, así como modelos de superficie terrestre (como la asimilación de datos y la interpolación espacio-temporal), es también un paso necesario en el modelado del Sistema Terrestre, considerando el aspecto dinámico de la hidrología amazónica.



## Recomendación 3:

# Caracterización de los procesos hidrológicos en una Amazonía en tiempos de cambios

El desarrollo de bases de datos de largo plazo ha sido fundamental para comprender los procesos hidrológicos de la Amazonía durante varias décadas. Aunque los datos de teledetección se enfocan actualmente en un conjunto limitado de variables hidrológicas, existen muchas otras que requieren mayor atención por parte de la comunidad que estudia la hidrología, como en el caudal de los ríos y la velocidad del agua, el almacenamiento de las aguas superficiales y subterráneas, la humedad del suelo, el CDOM y la Clorofila-a. La mayoría de los estudios en la cuenca amazónica también se concentran solamente en algunas áreas (como los bosques de várzea de las llanuras de inundación de la Amazonía central), pero muchos otros sistemas fluviales complejos, de áreas húmedas e incluso de igarapés y pequeños ríos, especialmente en la región andina, también requieren atención. Las futuras observaciones por satélite traerán nuevas oportunidades para caracterizar procesos naturales de la cuenca amazónica, lo que incluye el fitoplancton en las aguas, la topografía de las llanuras de inundación, los ecosistemas acuáticos, la dinámica de las aguas subterráneas y el monitoreo de los cambios ambientales antropogénicos.

## Recomendación 4:

# Utilizando la teledetección para promover el desarrollo sostenible de la cuenca amazónica

La cuenca amazónica alberga una biodiversidad increíblemente grande y aún poco conocida, y que proporciona servicios ecosistémicos fundamentales para el planeta y para algunos de los sistemas fluviales y de áreas húmedas más complejos e intrigantes del mundo. Aunque las observaciones satelitales han proporcionado avances científicos revolucionarios para la comprensión del ciclo del agua de la Amazonía en las últimas décadas, las nuevas misiones orientadas a la hidrología en los próximos años, proporcionarán un nuevo marco en el monitoreo de las aguas de la Amazonía a partir del espacio. El conocimiento avanzado de la teledetección debe traducirse en información e indicadores valiosos que apoyen la gobernanza ambiental y la ciencia sostenible en la cuenca amazónica. La teledetección tiene el potencial de democratizar informaciones esenciales para los tomadores de decisión, avanzando hacia un futuro más sostenible para la mayor cuenca del mundo.





# Referencias

Abe, C.A., Lobo, F.L., Novo, E.M.L. de M., Costa, M., Dibike, Y., 2019. Modeling the effects of land cover change on sediment concentrations in a gold-mined Amazonian basin. *Reg. Environ. Chang.* 19, 1801–1813. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01513-8>

Abril, G., Martinez, J.M., Artigas, L.F., Moreira-Turcq, P., Benedetti, M.F., Vidal, L., Meziane, T., Kim, J.H., Bernardes, M.C., Savoye, N., Deborde, J., Souza, E.L., Albéric, P., Landim De Souza, M.F., Roland, F., 2014. Amazon River carbon dioxide outgassing fuelled by wetlands. *Nature* 505, 395–398. <https://doi.org/10.1038/nature12797>

Acetuno, P., 1988. On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Mon. Weather Rev.* 116, 505–524. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<0505:OTFOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<0505:OTFOTS>2.0.CO;2)

Adderio, L.P.D., Puca, S., Vulpiani, G., Petracca, M., San, P., Dietrich, S., 2020. RAINBOW : An Operational Oriented Combined IR-Algorithm 1–21.

Adler, R.F., Huffman, G.J., Keehn, P.R., 1994. Global tropical rain estimates from microwave-adjusted geosynchronous IR data. *Remote Sens. Rev.* <https://doi.org/10.1080/02757259409532262>

Ahmed, J., Constantine, J.A., Dunne, T., 2019. The role of sediment supply in the adjustment of channel sinuosity across the Amazon Basin. *Geology* 47, 807–810. <https://doi.org/10.1130/G46319.1>

Aires, F., 2014. Combining Datasets of Satellite-Retrieved Products. Part I: Methodology and Water Budget Closure. *J. Hydrometeorol.* 15, 1677–1691. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0148.1>

Aires, F., Miolane, L., Prigent, C., Pham, B., Fluet-Chouinard, E., Lehner, B., Papa, F., 2017. A global dynamic long-term inundation extent dataset at high spatial resolution derived through downscaling of satellite observations. *J. Hydrometeorol.* 18, 1305–1325. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0155.1>

Aires, F., Papa, F., Prigent, C., 2013. A long-term, high-resolution wetland dataset over the amazon basin, downscaled from a multiwavelength retrieval using SAR data. *J. Hydrometeorol.* 14, 594–607. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-093.1>

Aires, F., Prigent, C., Fluet-Chouinard, E., Yamazaki, D., Papa, F., Lehner, B., 2018. Comparison of visible and multi-satellite global inundation datasets at high-spatial resolution. *Remote Sens. Environ.* 216, 427–441. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.015>

Aires, F., Prigent, C., Rossow, W.B., 2005. Sensitivity of satellite microwave and infrared observations to soil moisture at a global scale: 2. Global statistical relationships. *J. Geophys. Res. Atmos.* 110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004JD005094>

Alcântara, E., Barbosa, C., Stech, J., Novo, E., Shimabukuro, Y., 2009. Improving the spectral unmixing algorithm to map water turbidity Distributions. *Environ. Model. Softw.* 24, 1051–1061. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.02.013>

Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., Pappenberger, F., 2013. GloFAS - global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 1161–1175. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1161-2013>

Alkama, R., Decharme, B., Douville, H., Becker, M., Cazenave, A., Sheffield, J., Voldoire, A., Tyteca, S., Le Moigne, P., 2010. Global evaluation of the ISBA-TRIP continental hydrological system. Part I: Comparison to GRACE terrestrial water storage estimates and in situ river discharges. *J. Hydrometeorol.* <https://doi.org/10.1175/2010JHM1211.1>

Allen, G.H., Pavelsky, T., 2018. Global extent of rivers and streams. *Science (80-.)*. 361, 585–588. <https://doi.org/10.1126/science.aat063>

Allen, R.G., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J.M.H., Bastiaanssen, W., Kjaersgaard, J., 2011. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrol. Process.* 25, 4011–4027. <https://doi.org/10.1002/hyp.8408>

Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133, 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(380))

Almeida, R.M., Hamilton, S.K., Rosi, E.J., Barros, N., Doria, C.R.C., Flecker, A.S., Fleischmann, A.S., Reisinger, A.J., Roland, F., 2020. Hydropeaking Operations of Two Run-of-River Mega-Dams Alter Downstream Hydrology of the Largest Amazon Tributary. *Front. Environ. Sci.* 8, 120. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00120>

Almeida, R.M., Tranvik, L., Huszar, V.L.M., Sobek, S., Mendonça, R., Barros, N., Boemer, G., Arantes, J.D., Roland, F., 2015. Phosphorus transport by the largest Amazon tributary (Madeira River, Brazil)

and its sensitivity to precipitation and damming. *Inl. Waters* 5, 275–282. <https://doi.org/10.5268/IW-5.3.815>

Alsdorf, D., 2003. Water Storage of the Central Amazon Floodplain Measured with GIS and Remote Sensing Imagery. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 93, 55–66. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.93105>

Alsdorf, D., Bates, P., Melack, J., Wilson, M., Dunne, T., 2007. Spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. *Geophys. Res. Lett.* 34, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL029447>  
Alsdorf, D., Beighley, E., Laraque, A., Lee, H., Tshimanga, R., O'Loughlin, F., Mahé, G., Dinga, B., Moukandi, G., Spencer, R.G.M., 2016. Opportunities for hydrologic research in the Congo Basin. *Rev. Geophys.* 54, 378–409. <https://doi.org/10.1002/2016RG000517>

Alsdorf, D., Birkett, C., Dunne, T., Melack, J., Hess, L., 2001a. Water level changes in a large Amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry. *Geophys. Res. Lett.* 28, 2671–2674. <https://doi.org/10.1029/2001GL012962>

Alsdorf, D., Dunne, T., Melack, J., Smith, L., Hess, L., 2005. Diffusion modeling of recessional flow on central Amazonian floodplains. *Geophys. Res. Lett.* 32, 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL024412>

Alsdorf, D., Han, S.C., Bates, P., Melack, J., 2010. Seasonal water storage on the Amazon floodplain measured from satellites. *Remote Sens. Environ.* 114, 2448–2456. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.020>

Alsdorf, D., Melack, J.M., Dunne, T., Mertes, L.A.K., Hess, L.L., Smith, L.C., 2000. Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain. *Nature* 404, 174–177. <https://doi.org/10.1038/35004560>

Alsdorf, D., Smith, L.C., Melack, J.M., 2001b. Amazon floodplain water level changes measured with interferometric SIR-C radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39, 423–431. <https://doi.org/10.1109/36.905250>

Alsdorf, D., Tshimanga, R.M., Moukandi, G.D. (Eds.), 2021. *Congo Basin Hydrology, Climate, and Biogeochemistry: A Foundation for the Future*. Wiley-AGU.

Amaral, J.H.F., Melack, J.M., Barbosa, P.M., MacIntyre, S., Kasper, D., Cortés, A., Silva, T.S.F., Nunes de Sousa, R., Forsberg, B.R., 2020. Carbon Dioxide Fluxes to the Atmosphere From Waters Within Flooded Forests in the Amazon Basin. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 125. <https://doi.org/10.1029/2019JG005293>

Anderson, A.B., May, P.H., Balick, M.J., 1991. The subsidy from nature: palm forests, peasantry, and development on an Amazon frontier, in: *The subsidy from nature: palm forests, peasantry, and development on an Amazon frontier*. Columbia University Press. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(92\)90157-7](https://doi.org/10.1016/0169-5347(92)90157-7)

Anderson de Castro, A., Cuartas, L.A., Coe, M.T., Von Randow, C., Castanho, A., Ovando, A., Nobre, A.D., Koumrouyan, A., Sampaio, G., Costa, M.H., 2018. Coupling the terrestrial hydrology model with biogeochemistry to the integrated LAND surface model: Amazon Basin applications. *Hydrol. Sci. J.* 63, 1954–1966. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1538592>

Anderson, M.C., Norman, J.M., Diak, G.R., Kustas, W.P., Mecikalski, J.R., 1997. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sens.*

Environ. 60, 195–216. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5)

Andriambelason, J.A., Paris, A., Calmant, S., Rakotondraompiana, S., 2020. Re-initiating depth-discharge monitoring in small-sized ungauged watersheds by combining remote sensing and hydrological modelling: a case study in Madagascar. *Hydrol. Sci. J.* 65, 2709–2728. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1833013>

Angelis, C.F., McGregor, G.R., Kidd, C., 2004. Diurnal cycle of rainfall over the Brazilian Amazon. *Clim. Res.* 26, 139–149. <https://doi.org/10.3354/cr026139>

Aragão, L.E.O., Malhi, Y., Barbier, N., Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., Saatchi, S., 2008. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia, in: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. p. 1779–1785. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0026>

Arantes, C.C., Winemiller, K.O., Petreire, M., Castello, L., Hess, L.L., Freitas, C.E.C., 2018. Relationships between forest cover and fish diversity in the Amazon River floodplain. *J. Appl. Ecol.* 55, 386–395. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12967>

Arias, M.E., Farinosi, F., Lee, E., Livino, A., Briscoe, J., Moorcroft, P.R., 2020. Impacts of climate change and deforestation on hydropower planning in the Brazilian Amazon. *Nat. Sustain.* 3, 430–436. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0492-y>

Arias, M.E., Lee, E., Farinosi, F., Pereira, F.F., Moorcroft, P.R., 2018. Decoupling the effects of deforestation and climate variability in the Tapajós river basin in the Brazilian Amazon. *Hydrol. Process.* 32, 1648–1663. <https://doi.org/10.1002/hyp.11517>

Arias, P.A., Fu, R., Vera, C., Rojas, M., 2015. A correlated shortening of the North and South American monsoon seasons in the past few decades. *Clim. Dyn.* 45, 3183–3203. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2533-1>

Arias, P.A., Garreaud, R., Poveda, G., Espinoza, J.C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., Scaff, L., van Oevelen, P.J., 2021. Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate Variability and Sub-Continental Patterns. *Front. Earth Sci.* 8, 666. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.505467>

Armijos, E., Crave, A., Espinoza, J.C., Filizola, N., Espinoza-Villar, R., Ayes, I., Fonseca, P., Fraizy, P., Gutierrez, O., Vauchel, P., Camenen, B., Martinez, J.M., Dos Santos, A., Santini, W., Cochonneau, G., Guyot, J.L., 2020. Rainfall control on amazon sediment flux: Synthesis from 20 years of monitoring. *Environ. Res. Commun.* 2, 051008. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab9003>

Arnesen, A.S., Silva, T.S.F.F., Hess, L.L., Novo, E.M.L.M.L.M., Rudorff, C.M., Chapman, B.D., McDonald, K.C., 2013. Monitoring flood extent in the lower Amazon River floodplain using ALOS/PALSAR ScanSAR images. *Remote Sens. Environ.* 130, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.035>

Arvor, D., Funatsu, B.M., Michot, V., Dubreui, V., 2017. Monitoring rainfall patterns in the southern amazon with PERSIANN-CDR data: Long-term characteristics and trends. *Remote Sens.* 9. <https://doi.org/10.3390/rs9090889>

Ashouri, H., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Braithwaite, D.K., Knapp, K.R., Cecil, L.D., Nelson, B.R., Prat,

O.P., 2015. PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, 69–83. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>

Asner, G.P., 2001. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *Int. J. Remote Sens.* 22, 3855–3862. <https://doi.org/10.1080/01431160010006926>

Avila-Diaz, A., Benezoli, V., Justino, F., Torres, R., Wilson, A., 2020. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Clim. Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>

Azarderakhsh, M., Rossow, W.B., Papa, F., Norouzi, H., Khanbilvardi, R., 2011. Diagnosing water variations within the Amazon basin using satellite data. *J. Geophys. Res.* 116, n/a--n/a. <https://doi.org/10.1029/2011JD015997>

Baguis, P., Roulin, E., 2017. Soil moisture data assimilation in a hydrological model: A case study in Belgium using large-scale satellite data. *Remote Sens.* 9, 1–26. <https://doi.org/10.3390/rs9080820>

Baker, J., Garcia-Carreras, L., Gloor, M., Marsham, J.H., Buermann, W., da Rocha, H.R., Nobre, A.D., de Araujo, A.C., Spracklen, D. V., 2021. Evapotranspiration in the Amazon: spatial patterns, seasonality, and recent trends in observations, reanalysis, and climate models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, 2279–2300. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2279-2021>

Baker, J., Spracklen, D. V., 2019. Climate Benefits of Intact Amazon Forests and the Biophysical Consequences of Disturbance. *Front. For. Glob. Chang.* 2, 1–13. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00047>

Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dec, D., Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., Pappenberger, F., De Rosnay, P., Stockdale, T., Vitart, F., 2015. ERA-Interim/Land: A global land surface reanalysis data set. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 389–407. <https://doi.org/10.5194/hess-19-389-2015>

Barahona, D., Molod, A., Kalesse, H., 2017. Direct estimation of the global distribution of vertical velocity within cirrus clouds. *Sci. Rep.* 7, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07038-6>

Barbosa, C.C.F., 2005. Sensoriamento Remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas. *Dissertação* 255.

Barbosa, C.C.F., de Moraes Novo, E.M.L., Melack, J.M., Gastil-Buhl, M., Filho, W.P., 2009. Geospatial analysis of spatiotemporal patterns of pH, total suspended sediment and chlorophyll-a on the Amazon floodplain. *Limnology* 11, 155–166. <https://doi.org/10.1007/s10201-009-0305-5>

Barbosa, C.C.F., Novo, E., Ferreira, R., Carvalho, L., Cairo, C., Lopes, F., Stech, J., Alcantara, E., 2015. Brazilian inland water bio-optical dataset to support carbon budget studies in reservoirs as well as anthropogenic impacts in Amazon floodplain lakes: Preliminary results. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* 40, 1439–1446. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1439-2015>

Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L. de M., Melack, J.M., Freitas, R.M. de, Pereira, W., 2006. A methodology for analysis of volume and flooded area dynamics: Lago Grande de Curuai várzea as an example. *Rev. Bras. Cartogr.* 58, 201–210.

Barbosa, P.M., Melack, J.M., Amaral, J.H.F., MacIntyre, S., Kasper, D., Cortés, A., Farjalla, V.F., Forsberg, B.R., 2020. Dissolved methane concentrations and fluxes to the atmosphere from a tropical floodplain lake. *Biogeochemistry* 148, 129–151. <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00650-1>

Barichivich, J., Gloor, E., Peylin, P., Brienen, R.J.W., Schöngart, J., Espinoza, J.C., Pattayak, K.C., 2018. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Sci. Adv.* 4. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat8785>

Bastiaanssen, W.G.M., 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Dr. thesis, Wageningen Agric. Univ. Wageningen Netherlands.

Bates, P.D., Neal, J., Sampson, C., Smith, A., Trigg, M., 2018. Chapter 9 - Progress Toward Hyperresolution Models of Global Flood Hazard, in: Michel, G.B.T.-R.M. for H. and D. (Org.), Elsevier, p. 211–232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804071-3.00009-4>

Bates, P.D., Quinn, N., Sampson, C., Smith, A., Wing, O., Sosa, J., Savage, J., Olcese, G., Neal, J., Schumann, G., Giustarini, L., Coxon, G., Porter, J.R., Amodeo, M.F., Chu, Z., Lewis-Gruss, S., Freeman, N.B., Houser, T., Delgado, M., Hamidi, A., Bolliger, I., E. McCusker, K., Emanuel, K., Ferreira, C.M., Khalid, A., Haigh, I.D., Couasnon, A., E. Kopp, R., Hsiang, S., Krajewski, W.F., 2021. Combined Modeling of US Fluvial, Pluvial, and Coastal Flood Hazard Under Current and Future Climates. *Water Resour. Res.* 57, e2020WR028673. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020WR028673>

Baugh, C.A., Bates, P.D., Schumann, G., Trigg, M.A., 2013. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy. *Water Resour. Res.* 49, 5276–5289. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20412>

Bailey, P.B., Moreira, J.C., 1978. Preliminary interpretations of aquatic resources in the central Amazon Basin using Landsat multispectral imagery, in: Parada, N. de J. (Org.), Anais... Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, p. 854–865.

Beck, H.E., Pan, M., Roy, T., Weedon, G.P., Pappenberger, F., van Dijk, A.I.J.M., Huffman, G.J., Adler, R.F., Wood, E.F., 2018. Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–23. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-481>

Beck, H.E., Van Dijk, A.I.J.M., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D.G., Martens, B., De Roo, A., 2017a. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 589–615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>

Beck, H.E., Vergopolan, N., Pan, M., Levizzani, V., van Dijk, A.I.J.M., Weedon, G.P., Brocca, L., Pappenberger, F., Huffman, G.J., Wood, E.F., 2017b. Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 6201–6217. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6201-2017>

Beck, H.E., Wood, E.F., Pan, M., Fisher, C.K., Miralles, D.G., Van Dijk, A.I.J.M., McVicar, T.R., Adler, R.F., 2019. MSWep v2 Global 3-hourly 0.1° precipitation: Methodology and quantitative assessment. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 100, 473–500. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>

Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., Ziese, M., 2013. A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. *Earth Syst.*

Sci. Data 5, 71–99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>

Becker, M., Papa, F., Frappart, F., Alsdorf, D., Calmant, S., da Silva, J.S., Prigent, C., Seyler, F., 2018. Satellite-based estimates of surface water dynamics in the Congo River Basin. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 66, 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.11.015>

Behnamian, A., Banks, S., White, L., Brisco, B., Milard, K., Pasher, J., Chen, Z., Duffe, J., Bourgeau-Chavez, L., Battaglia, M., 2017. Semi-automated surfacewater detection with synthetic aperture radar data: A wetland case study. *Remote Sens.* 9, 1209. <https://doi.org/10.3390/rs9121209>

Beghley, R.E., Eggert, K.G., Dunne, T., He, Y., Gummadi, V., Verdin, K.L., 2009. Simulating hydrologic and hydraulic processes throughout the Amazon River Basin. *Hydrol. Process.* 23, 1221–1235. <https://doi.org/10.1002/hyp>

Belger, L., Forsberg, B.R., Melack, J.M., 2011. Carbon dioxide and methane emissions from interfluvial wetlands in the upper Negro River basin, Brazil. *Biogeochemistry* 105, 171–183. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9536-0>

Bercher, N., Dinardo, S., Lucas, B., Fleury, S., Calmant, S., Femenias, P., Boy, F., Picot, N., Benveniste, J., 2013. A review of Cryosat-2/SIRAL applications for the monitoring of river water levels. *ESA Living Planet Symp.* 1, 1–30.

Bernini, H., Borges, H.D., Martinez, J., 2019. Quasi-Analytical Algorithm Calibration for Retrieval of Inherent Optical Properties from Extremely Turbid Waters: The Case of Madeira River Basin, in: *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. p. 6150–6153. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8897766>

Berry, P.A.M., Garlick, J.D., Freeman, J.A., Mathers, E.L., 2005. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophys. Res. Lett.* 32. <https://doi.org/10.1029/2005GL022814>

Biancamaria, S., Lettenmaier, D.P., Pavelsky, T.M., 2016. The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology. *Surv. Geophys.* 37, 307–337. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9346-y>

Bierkens, M.F.P., Bell, V.A., Burek, P., Chaney, N., Condon, L.E., David, C.H., de Roo, A., Döll, P., Drost, N., Famiglietti, J.S., Flörke, M., Gochis, D.J., Houser, P., Hut, R., Keune, J., Kollet, S., Maxwell, R.M., Reager, J.T., Samaniego, L., Sudicky, E., Sutanudjaja, E.H., van de Giesen, N., Winsemius, H., Wood, E.F., 2015. Hyper-resolution global hydrological modelling: What is next?: “Everywhere and locally relevant” M. F. P. Bierkens et al. Invited Commentary. *Hydrol. Process.* 29, 310–320. <https://doi.org/10.1002/hyp.10391>

Birkett, C.M., Mertes, L.A.K., Dunne, T., Costa, M.H., Jasinski, M.J., 2002. Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry. *J. Geophys. Res. D Atmos.* 107. <https://doi.org/10.1029/2001JD000609>

Birkett, C.M., Ricko, M., Beckley, B.D., Yang, X., Tetrault, R.L., 2017. G-REALM: A lake/reservoir monitoring tool for drought monitoring and water resources management, in: *AGU Fall Meeting Abstracts*. p. H23P-02.

Biswas, N.K., Hossain, F., Bonnema, M., Lee, H., Chishtie, F., 2021. Towards a global Reservoir Assessment Tool for predicting hydrologic impacts and operating patterns of existing and planned reservoirs. *Environ.*

Model. Softw. 140, 105043. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105043>

Blumstein, D., Biancamaria, S., Guérin, A., Maisongrande, P., 2019. A potential constellation of small altimetry satellites dedicated to continental surface waters (SMASH mission), in: AGU Fall Meeting Abstracts. p. H43N-2257.

Bogning, S., Frappart, F., Blarel, F., Niño, F., Mahé, G., Bricquet, J.-P., Seyler, F., Onguéné, R., Etamé, J., Paiz, M.-C., Braun, J.-J., 2018. Monitoring Water Levels and Discharges Using Radar Altimetry in an Ungauged River Basin: The Case of the Ogooué. *Remote Sens.* 10. <https://doi.org/10.3390/rs10020350>

Bogning, S., Frappart, F., Paris, A., Blarel, F., Niño, F., Saux Picart, S., Lanet, P., Seyler, F., Mahé, G., Onguene, R., Bricquet, J.-P., Etame, J., Paiz, M.-C., Braun, J.-J., 2020. Hydro-climatology study of the Ogooué River basin using hydrological modeling and satellite altimetry. *Adv. Sp. Res.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.045>

Bonnet, M.P., Barroux, G., Martinez, J.M., Seyler, F., Moreira-Turcq, P., Cochonneau, G., Melack, J.M., Boaventura, G., Maurice-Bourgoin, L., León, J.G., Roux, E., Calmant, S., Kosuth, P., Guyot, J.L., Seyler, P., 2008. Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaí). *J. Hydrol.* 349, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.055>

Bonnet, M.P., Pinel, S., Garnier, J., Bois, J., Resende Boaventura, G., Seyler, P., Motta Marques, D., 2017. Amazonian floodplain water balance based on modelling and analyses of hydrologic and electrical conductivity data. *Hydrol. Process.* 31, 1702–1718. <https://doi.org/10.1002/hyp.11138>

Bookhagen, B., Strecker, M.R., 2008. Orographic barriers, high-resolution TRMM rainfall, and relief variations along the eastern Andes. *Geophys. Res. Lett.* 35, L06403. <https://doi.org/10.1029/2007GL032011>

Borma, L.S., Da Rocha, H.R., Cabral, O.M., Von Randow, C., Collicchio, E., Kurzatkowski, D., Brugger, P.J., Freitas, H., Tannus, R., Oliveira, L., Rennó, C.D., Artaxo, P., 2009. Atmosphere and hydrological controls of the evapotranspiration over a floodplain forest in the Bananal Island region, Amazonia. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 114. <https://doi.org/10.1029/2007JG000641>

Bosilovich, M.G., Chern, J.D., 2006. Simulation of water sources and precipitation recycling for the MacKenzie, Mississippi, and Amazon River basins. *J. Hydrometeorol.* 7, 312–329. <https://doi.org/10.1175/JHM501.1>

Bouchez, J., Lupker, M., Maurice, L., Perez, M., Gaillardet, J., 2011. Prediction of depth integrated fluxes of suspended sediment in the Amazon River: particle aggregation as a complicating factor. *Hydrol. Process.* 794, 778–794. <https://doi.org/10.1002/hyp.7868>

Bourgoin, L.M., Bonnet, M.P., Martinez, J.M., Kosuth, P., Cochonneau, G., Moreira-Turcq, P., Guyot, J.L., Vauchel, P., Filizola, N., Seyler, P., 2007. Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River, Brazil. *J. Hydrol.* 335, 140–156. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.11.023>

Bourrel, L., Phillips, L., Moreau, S., 2009. The dynamics of floods in the Bolivian Amazon Basin. *Hydrol. Process.* 23, 3161–3167. <https://doi.org/10.1002/hyp.7384>

Bradley, J., 1980. Remote sensing of suspended sediment in Amazonian rivers using satellite multispectral

imagery. Royal Holloway, University of London.

Brakenridge, G.R., Nghiem, S. V., Anderson, E., Mic, R., 2007. Orbital microwave measurement of river discharge and ice status. *Water Resour. Res.* 43. <https://doi.org/10.1029/2006WR005238>

Brasil, 1997. Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1o da Lei no 8.001, de 13. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília.*

Brêda, J.P.L.F., Paiva, R.C.D., Bravo, J.M., Passaia, O.A., Moreira, D.M., 2019. Assimilation of Satellite Altimetry Data for Effective River Bathymetry. *Water Resour. Res.* 55, 7441–7463. <https://doi.org/10.1029/2018wr024010>

Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Moramarco, T., Hahn, S., Hasenauer, S., Kidd, R., Dorigo, W., Wagner, W., Levizzani, V., 2014. Soil as a natural rain gauge: Estimating global rainfall from satellite soil moisture data. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119, 5128–5141. <https://doi.org/10.1002/2014JD021489>

Brocca, L., Filippucci, P., Hahn, S., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., Schüller, L., Bojkov, B., Wagner, W., 2019. SM2RAIN-ASCAT (2007-2018): Global daily satellite rainfall data from ASCAT soil moisture observations. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 1583–1601. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1583-2019>

Brocca, L., Moramarco, T., Melone, F., Wagner, W., 2013. A new method for rainfall estimation through soil moisture observations. *Geophys. Res. Lett.* 40, 853–858. <https://doi.org/10.1002/grl.50173>

Builes-Jaramillo, A., Poveda, G., 2018. Conjoint Analysis of Surface and Atmospheric Water Balances in the Andes-Amazon System. *Water Resour. Res.* 54, 3472–3489. <https://doi.org/10.1029/2017WR021338>

Butt, N., De Oliveira, P.A., Costa, M.H., 2011. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. *J. Geophys. Res. Atmos.* 116, 2–9. <https://doi.org/10.1029/2010JD015174>

Buayaert, W., Zulkaffi, Z., Grainger, S., Acosta, L., Alemie, T.C., Bastiaensen, J., De Bièvre, B., Bhusal, J., Clark, J., Dewulf, A., Foggin, M., Hannah, D.M., Hergarten, C., Isaeva, A., Karpouzoglou, T., Pandeya, B., Paudel, D., Sharma, K., Steenhuis, T., Tilahun, S., Van Hecken, G., Zhumanova, M., 2014. Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. *Front. Earth Sci.* 2, 26. <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00026>

Callède, J., Cochonneau, G., Alves, F.V., Guyot, J.-L., Guimarães, V.S., De Oliveira, E., 2010. The River Amazon water contribution to the Atlantic Ocean. *Rev. des Sci. l'Eau* 23, 247–273.

Callède, J., Guyot, J.L., Ronchail, J., L'Hôte, Y., Niel, H., De Oliveira, E., 2004. Evolution of the River Amazon's discharge at Óbidos from 1903 to 1999. *Hydrol. Sci. J.* 49, 85–98. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.85.53992>

Callède, J., Moreira, D.M., Calmant, S., 2013. Détermination de l'altitude du zéro des stations hydrométriques en amazonie brésilienne. Application aux lignes d'eau des Rios Negro, Solimões et Amazone. *Rev. des Sci. l'Eau* 26, 153–171. <https://doi.org/10.7202/1016065ar>

Calmant, S., Crétaux, J.F., Rémy, F., 2016. Principles of Radar Satellite Altimetry for Application on

Inland Waters. *Microw. Remote Sens. L. Surfaces Tech. Methods* 175–218. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-159-8.50004-9>

Calmant, S., Da Silva, J.S., Moreira, D.M., Seyler, F., Shum, C.K., Crétaux, J.F., Gabalda, G., 2013. Detection of Envisat RA2/ICE-1 retracked radar altimetry bias over the Amazon basin rivers using GPS. *Adv. Sp. Res.* 51, 1551–1564. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.07.033>

Calmant, S., Seyler, F., 2006. Continental surface waters from satellite altimetry. *Comptes Rendus - Geosci.* 338, 1113–1122. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.05.012>

Campos-Silva, J.V., Hawes, J.E., Freitas, C.T., Andrade, P.C.M., Peres, C.A., 2020. Community-Based Management of Amazonian Biodiversity Assets, in: Baldauf, C. (Org.), *Participatory Biodiversity Conservation: Concepts, Experiences, and Perspectives*. Springer International Publishing, Cham, p. 99–111. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-41686-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41686-7_7)

Cao, N., Lee, H., Jung, H.C., Yu, H., 2018. Estimation of Water Level Changes of Large-Scale Amazon Wetlands Using ALOS2 ScanSAR Differential Interferometry 10. <https://doi.org/10.3390/rs10060966>

Cardille, J.A., Foley, J.A., Costa, M.H., 2002. Characterizing patterns of agricultural land use in Amazonia by merging satellite classifications and census data. *Global Biogeochem. Cycles* 16, 18–1–18–14. <https://doi.org/10.1029/2000gb001386>

Carvalho, J.C., Cochoneau, G., Piscocya, R. de C.C.C. de, Martinez, J., Souza, E.A. De, Antunes, M.A., Ventura, D.T., Oliveira, E., Lopes, W.T.A., Guimarães, V.S., 2015. HIDROSAT - Sistema Integrado para Gerenciamento, Processamento e Difusão de Dados Hidrológicos Obtidos a Partir de Monitoramento por Satélites, in: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Brasília, DF.

Carvalho, L.M. V., Jones, C., Liebmann, B., 2004. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. *J. Clim.* 17, 88–108. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2)

Castello, L., Hess, L.L., Thapa, R., McGrath, D.G., Arantes, C.C., Renó, V.F., Isaac, V.J., 2018. Fishery yields vary with land cover on the Amazon River floodplain. *Fish Fish.* 19, 431–440. <https://doi.org/10.1111/faf.12261>

Castello, L., Macedo, M.N., 2016. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* 22, 990–1007. <https://doi.org/10.1111/gcb.13173>

Cavalcante, R.B.L., Ferreira, D.B. da S., Pontes, P.R.M., Tedeschi, R.G., da Costa, C.P.W., de Souza, E.B., 2020. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. *Atmos. Res.* 238, 104879. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104879>

Cavalcante, R.B.L., Pontes, P.R.M., Souza-Filho, P.W.M., de Souza, E.B., 2019. Opposite Effects of Climate and Land Use Changes on the Annual Water Balance in the Amazon Arc of Deforestation. *Water Resour. Res.* 55, 3092–3106. <https://doi.org/10.1029/2019WR025083>

Chapman, B., McDonald, K., Shimada, M., Rosenqvist, A., Schroeder, R., Hess, L., 2015. Mapping Regional Inundation with Spaceborne L-Band SAR. *Remote Sens.* 7, 5440–5470. <https://doi.org/10.3390/rs70505440>

Chaudhari, S., Pokhrel, Y., Moran, E., Miguez-Macho, G., 2019. Multi-decadal hydrologic change and variability in the Amazon River basin: Understanding terrestrial water storage variations and drought characteristics. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, 2841–2862. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2841-2019>

Chavez, S.P., Takahashi, K., 2017. Orographic rainfall hot spots in the Andes–Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1002/2016JD026282>

Chen, J.L., Wilson, C.R., Tapley, B.D., 2010. The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resour. Res.* 46, 1–10. <https://doi.org/10.1029/2010WR009383>

Chen, J.L., Wilson, C.R., Tapley, B.D., Yang, Z.L., Niu, G.Y., 2009. 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 114, 1–9. <https://doi.org/10.1029/2008JB006056>

Chen, M., Shi, W., Xie, P., Silva, V.B.S., Kousky, V.E., Wayne Higgins, R., Janowiak, J.E., 2008. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *J. Geophys. Res.* 113, D04110. <https://doi.org/10.1029/2007JD009132>

Chew, C., Small, E., 2020. Estimating inundation extent using CYGNSS data: A conceptual modeling study. *Remote Sens. Environ.* 246, 111869. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111869>

Choudhury, B.J., 1991. Passive microwave remote sensing contribution to hydrological variables. *Surv. Geophys.* 12, 63–84. <https://doi.org/10.1007/BF01903412>

Christoffersen, B.O., Restrepo-Coupe, N., Arain, M.A., Baker, I.T., Cestaro, B.P., Ciais, P., Fisher, J.B., Galbraith, D., Guan, X., Gulden, L., van den Hurk, B., Ichii, K., Imbuzeiro, H., Jain, A., Levine, N., Miguez-Macho, G., Poulter, B., Roberti, D.R., Sakaguchi, K., Sahoo, A., Schaefer, K., Shi, M., Verbeeck, H., Yang, Z.L., Araújo, A.C., Kruijt, B., Manzi, A.O., da Rocha, H.R., von Randow, C., Muza, M.N., Borak, J., Costa, M.H., Gonçalves de Gonçalves, L.G., Zeng, X., Saleska, S.R., 2014. Mechanisms of water supply and vegetation demand govern the seasonality and magnitude of evapotranspiration in Amazonia and Cerrado. *Agric. For. Meteorol.* 191, 33–50. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.02.008>

Ciabatta, L., Massari, C., Brocca, L., Gruber, A., Reimer, C., Hahn, S., Paulik, C., Dorigo, W., Kidd, R., Wagner, W., 2018. SM2RAIN-CCI: A new global long-term rainfall data set derived from ESA CCI soil moisture. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 267–280. <https://doi.org/10.5194/essd-10-267-2018>

Cintra, R., 2015. Spatial distribution and composition of waterbirds in relation to limnological conditions in the Amazon basin. *Hydrobiologia* 747, 235–252. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2148-2>

Claverie, M., Ju, J., Masek, J.G., Dungan, J.L., Vermote, E.F., Roger, J., Skakun, S.V., Justice, C., 2018. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sens. Environ.* 219, 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>

Cleugh, H.A., Leuning, R., Mu, Q., Running, S.W., 2007. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sens. Environ.* 106, 285–304. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.007>

Coe, M.T., Costa, M.H., Botta, A., Birkett, C., 2002. Long-term simulations of discharge and floods in

- the Amazon Basin. *J. Geophys. Res. Atmos.* 107, 1–17. <https://doi.org/10.1029/2001JD000740>
- Coe, M.T., Costa, M.H., Howard, E.A., 2008. Simulating the surface waters of the Amazon River basin: Impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. *Hydrol. Process.* 22, 2542–2553. <https://doi.org/10.1002/hyp.6850>
- Coe, M.T., Costa, M.H., Soares-Filho, B.S., 2009. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River - Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>
- Coe, M.T., Latrubesse, E.M., Ferreira, M.E., Amsler, M.L., 2011. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry* 105, 119–131. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9582-2>
- Cogley, J.G., 2013. GGHYDRO - Global Hydrographic Data, Release 2.3.1 Trent Technical Note 2003-1.
- Collischonn, B., Collischonn, W., Tucci, C.E.M., 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *J. Hydrol.* 360, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.032>
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J.D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J.J., López, F., Villacis, M., 2020. Climatological and Hydrological Observations for the South American Andes: In situ Stations, Satellite, and Reanalysis Data Sets. *Front. Earth Sci.* 8, 1–20. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00092>
- Constantine, J.A., Dunne, T., Ahmed, J., Legleiter, C., Lazarus, E.D., 2014. Sediment supply as a driver of river meandering and floodplain evolution in the Amazon Basin. *Nat. Geosci.* 7, 899–903. <https://doi.org/10.1038/ngeo2282>
- Cooley, S.W., Smith, L.C., Ryan, J.C., Pitcher, L.H., Pavelsky, T.M., 2019. Arctic-Boreal Lake Dynamics Revealed Using CubeSat Imagery. *Geophys. Res. Lett.* 46, 2111–2120. <https://doi.org/10.1029/2018GL081584>
- Correa, S.W., Paiva, R.C.D. de, Espinoza, J.C., Collischonn, W., 2017. Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. *J. Hydrol.* 549, 667–684. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.019>
- Coss, S., Durand, M., Yi, Y., Jia, Y., Guo, Q., Tuozzolo, S., Shum, C.K., Allen, G.H., Calmant, S., Pavelsky, T., 2020. Global River Radar Altimetry Time Series (GRRATS): New river elevation earth science data records for the hydrologic community. *Earth Syst. Sci. Data* 12, 137–150. <https://doi.org/10.5194/essd-12-137-2020>
- Costa, M., 2005. Estimate of net primary productivity of aquatic vegetation of the Amazon floodplain using Radarsat and JERS-1. *Int. J. Remote Sens.* 26, 4527–4536. <https://doi.org/10.1080/01431160500213433>
- Costa, M.H., 2020. When more trees mean more power. *Nat. Sustain.* 3, 410–411. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0511-z>
- Costa, M.H., 2005. Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion, in: Bonell, M., Bruijnzeel, L.A.S. (Orgs.), *Forests, Water and People in the Humid Tropics*. Cambridge University Press, p. 590–597. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9780511535666>

Costa, M.H., Biajoli, M.C., Sanches, L., Malhado, A.C.M., Hutyrá, L.R., da Rocha, H.R., Aguiar, R.G., de Araújo, A.C., 2010. Atmospheric versus vegetation controls of Amazonian tropical rain forest evapotranspiration: Are the wet and seasonally dry rain forests any different? *J. Geophys. Res.* 115, G04021. <https://doi.org/10.1029/2009JG001179>

Costa, M.H., Botta, A., Cardille, J.A., 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *J. Hydrol.* 283, 206–217. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00267-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00267-1)

Costa, M.H., Foley, J.A., 1997. Water balance of the Amazon Basin: Dependence on vegetation cover and canopy conductance. *J. Geophys. Res. Atmos.* 102, 23973–23989. <https://doi.org/10.1029/97JD01865>

Costa, M.H., Pires, G.F., 2010. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *Int. J. Climatol.* 30, 1970–1979. <https://doi.org/10.1002/joc.2048>

Costa, M.P.F., Novo, E.M.L.M., Telmer, K.H., 2013. Spatial and temporal variability of light attenuation in large rivers of the Amazon. *Hydrobiologia* 702, 171–190. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1319-2>

Crétaux, J.F., Birkett, C., 2006. Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus - Geosci.* 338, 1098–1112. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.08.002>

Crétaux, J.F., Jelinski, W., Calmant, S., Kouraev, A., Vuglinski, V., Bergé-Nguyen, M., Gennero, M.C., Nino, F., Abarca Del Rio, R., Cazenave, A., Maisongrande, P., 2011. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Adv. Sp. Res.* 47, 1497–1507. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.01.004>

Crowley, J.W., Mitrovica, J.X., Bailey, R.C., Tamisiea, M.E., Davis, J.L., 2008. Annual variations in water storage and precipitation in the Amazon Basin: Bounding sink terms in the terrestrial hydrological balance using GRACE satellite gravity data. *J. Geod.* 82, 9–13. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0153-1>

Cuartas, L.A., Tomasella, J., Nobre, A.D., Nobre, C.A., Hodnett, M.G., Waterloo, M.J., Oliveira, S.M. de, Randow, R. de C. von, Trancoso, R., Ferreira, M., 2012. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. *J. Hydrol.* 462–463, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.047>

da Silva, E.F.F., Novo, E.M.L. de M., Lobo, F. de L., Barbosa, C.C.F., Noernberg, M.A., Rotta, L.H. da S., Cairo, C.T., Maciel, D.A., Flores Júnior, R., 2020. Optical water types found in Brazilian waters. *Limnology*. <https://doi.org/10.1007/s10201-020-00633-z>

Davidson, E.A., Artaxo, P., 2004. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: Results of the large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment. *Glob. Chang. Biol.* 10, 519–529. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00779.x>

Davidson, E.A., De Araújo, A.C., Artaxo, P., Balch, J.K., Brown, I.F., Mercedes, M.M., Coe, M.T., Defries, R.S., Keller, M., Longo, M., Munger, J.W., Schroeder, W., Soares-Filho, B.S., Souza, C.M., Wofsy, S.C., 2012. The Amazon basin in transition. *Nature* 481, 312–328. <https://doi.org/10.1038/nature10717>

de Carvalho, L.A.S., Faria Barbosa, C.C., Leão de Moraes Novo, E.M., de Moraes Rudorff, C., 2015. Implications of scatter corrections for absorption measurements on optical closure of Amazon floodplain lakes using the Spectral Absorption and Attenuation Meter (AC-S-WETLabs). *Remote Sens. Environ.* 157, 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.018>

de Oliveira Campos, I., Mercier, F., Maheu, C., Cochonneau, G., Kosuth, P., Blitzkow, D., Cazenave, A., 2001. Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon basin. *Comptes Rendus l'Académie des Sci. IIA-Earth Planet. Sci.* 333, 633–643.

de Oliveira, G., Brunsell, N.A., Moraes, E.C., Shimabukuro, Y.E., dos Santos, T. V., von Randow, C., de Aguiar, R.G., Aragao, L.E.O.C., 2019. Effects of land-cover changes on the partitioning of surface energy and water fluxes in Amazonia using high-resolution satellite imagery. *Ecohydrology* 12. <https://doi.org/10.1002/ecco.2126>

De Souza, E.B., Ambrizzi, T., 2006. Modulation of the intraseasonal rainfall over tropical Brazil by the Madden-Julian oscillation. *Int. J. Climatol.* 26, 1759–1776. <https://doi.org/10.1002/joc.1331>

Debortoli, N.S., Dubreuil, V., Funatsu, B., Delahaye, F., de Oliveira, C.H., Rodrigues-Filho, S., Saito, C.H., Fetter, R., 2015. Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). *Clim. Change* 132, 251–264. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1415-1>

Decharme, B., Alkama, R., Papa, F., Faroux, S., Douville, H., Prigent, C., 2012. Global off-line evaluation of the ISBA-TRIP flood model. *Clim. Dyn.* 38, 1389–1412. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1054-9>

Decharme, B., Douville, H., Prigent, C., Papa, F., Aires, F., 2008. A new river flooding scheme for global climate applications: Off-line evaluation over South America. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JD009376>

Dekker, A.G., 1993. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing, *Management*.

Delahaye, F., Kirstetter, P.E., Dubreuil, V., Machado, L.A.T., Vila, D.A., Clark, R., 2015. A consistent gauge database for daily rainfall analysis over the Legal Brazilian Amazon. *J. Hydrol.* 527, 292–304. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.012>

Desai, S., 2018. Surface Water and Ocean Topography Mission Project - Science Requirements Document. JPL documentD-61923., Jet Propulsion Laboratory.

Dias, C.M., Pastore, D.H., Borma, L.S., Bevilacqua, L., 2011. Modelling and numerical simulation of the velocity field in the Parque Estadual do Cantão (TO), Brazil. *Math. Comput. Model.* 53, 1575–1581. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.06.021>

Dias, L.C.P., Pimenta, F.M., Santos, A.B., Costa, M.H., Ladle, R.J., 2016. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. *Glob. Chang. Biol.* 22, 2887–2903. <https://doi.org/10.1111/gcb.13314>

Diniz, C.G., d. A. Souza, A.A., Santos, D.C., Dias, M.C., d. Luz, N.C., d. Moraes, D.R. V, Maia, J.S., Gomes, A.R., d. S. Narvaes, I., Valeriano, D.M., Maurano, L.E.P., Adami, M., 2015. DETER-B: The New Amazon Near Real-Time Deforestation Detection System. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs.*

Remote Sens. 8, 3619–3628. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2437075>

Dinku, T., Ceccato, P., Connor, S.J., 2011. Challenges of satellite rainfall estimation over mountainous and arid parts of east africa. *Int. J. Remote Sens.* 32, 5965–5979. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.499381>

dos Santos, E.S., Lopes, P.P.P., Pereira, H.H. da S., Nascimento, O. de O., Rennie, C.D., Sternberg, L. da S.L.O., Cunha, A.C. da, 2018. The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. *Sci. Total Environ.* 624, 887–899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.211>

Drusch, M., Moreno, J., Del Bello, U., Franco, R., Goulas, Y., Huth, A., Kraft, S., Middleton, E.M., Miglietta, F., Mohammed, G., Nedbal, L., Rascher, U., Schuttemeyer, D., Verhoef, W., 2017. The FLuorescence EXplorer Mission Concept-ESA's Earth Explorer 8. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 55, 1273–1284. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2621820>

Durieux, L., Toledo Machado, L.A., Laurent, H., 2003. The impact of deforestation on cloud cover over the Amazon arc of deforestation. *Remote Sens. Environ.* 86, 132–140. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00095-6)

Duvel, J.F., Kandel, R.S., 1985. Regional-Scale Diurnal Variations of Outgoing Infrared Radiation Observed by METEOSAT. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 24, 335–349. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1985\)024<0335:RSDVOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1985)024<0335:RSDVOO>2.0.CO;2)

Eltahir, E.A.B., Bras, R.L., 1994. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 120, 861–880. <https://doi.org/10.1002/qj.49712051806>

Emery, C.M., Biancamaria, S., Boone, A., Ricci, S., Rochoux, M., Pedinotti, V., David, C., 2020. Assimilation of wide-swath altimetry observations to correct large-scale river routing model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 24, 2207–2233. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-242-RC3>

Emery, C.M., Paris, A., Biancamaria, S., Boone, A., Calmant, S., Garambois, P.A., Da Silva, J.S., 2018. Large-scale hydrological model river storage and discharge correction using a satellite altimetry-based discharge product. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/hess-22-2135-2018>

Endo, W., Peres, C.A., Haugaasen, T., 2016. Flood pulse dynamics affects exploitation of both aquatic and terrestrial prey by Amazonian floodplain settlements. *Biol. Conserv.* 201, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.006>

Engle, D.L., Melack, J.M., Doyle, R.D., Fisher, T.R., 2008. High rates of net primary production and turnover of floating grasses on the Amazon floodplain: Implications for aquatic respiration and regional CO<sub>2</sub> flux. *Glob. Chang. Biol.* 14, 369–381. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01481.x>

Ershadi, A., McCabe, M.F., Evans, J.P., Wood, E.F., 2015. Impact of model structure and parameterization on Penman-Monteith type evaporation models. *J. Hydrol.* 525, 521–535. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.008>

Espinoza-Villar, R., Martinez, J.M., Armijos, E., Espinoza, J.C., Filizola, N., Dos Santos, A., Willems, B., Fraizy, P., Santini, W., Vauchel, P., Dos, A., Willems, B., Fraizy, P., Santini, W., Vauchel, P., 2018. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). *Comptes*

Espinoza, J.C., Chavez, S., Ronchai, J., Junquas, C., Takahashi, K., Lavado, W., 2015. Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resour. Res.* 1–27. <https://doi.org/10.1002/2015WR017096>. Received

Espinoza, J.C., Marengo, J.A., Ronchail, J., Carpio, J.M., Flores, L.N., Guyot, J.L., 2014. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: The role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environ. Res. Lett.* 9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124007>

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Frappart, F., Lavado, W., Santini, W., Guyot, J.L., 2013. The Major Floods in the Amazonas River and Tributaries (Western Amazon Basin) during the 1970–2012 Period: A Focus on the 2012 Flood. *J. Hydrometeorol.* 14, 1000–1008. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0100.1>

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., Vauchel, P., 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *Int. J. Climatol.* 29, 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Junquas, C., Drapeau, G., Martinez, J.M., Santini, W., Vauchel, P., Lavado, W., Ordoñez, J., Espinoza, R., 2012. From drought to flooding: Understanding the abrupt 2010–11 hydrological annual cycle in the Amazonas River and tributaries. *Environ. Res. Lett.* 7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024008>

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Marengo, J.A., Segura, H., 2019a. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Clim. Dyn.* 52, 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>

Espinoza, J.C., Segura, H., Ronchail, J., Drapeau, G., Gutierrez-Cori, O., 2016. Evolution of wet-day and dry-day frequency in the western Amazon basin: Relationship with atmospheric circulation and impacts on vegetation. *Water Resour. Res.* 52, 8546–8560. <https://doi.org/10.1002/2016WR019305>

Espinoza, J.C., Sörensson, A.A., Ronchail, J., Molina-Carpio, J., Segura, H., Gutierrez-Cori, O., Ruscica, R., Condom, T., Wongchuiig-Correa, S., 2019b. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 26, 100637. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100637>

Espinoza Villar, J.C., Guyot, J.L., Ronchail, J., Cochonneau, G., Filizola, N., Fraizy, P., Labat, D., de Oliveira, E., Ordoñez, J.J., Vauchel, P., 2009a. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). *J. Hydrol.* 375, 297–311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.004>

Espinoza Villar, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., Oliveira, E., de Pombosa, R., Vauchel, P., 2009b. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *Int. J. Climatol.* 29, 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>

Espinoza Villar, R., Martinez, J.M., Guyot, J.L., Fraizy, P., Armijos, E., Crave, A., Bazán, H., Vauchel, P., Lavado, W., 2012. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. *J. Hydrol.* 444–445, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.024>

Fagundes, H.O., Fan, F.M., Paiva, R.C.D., Siqueira, V.A., Buarque, D.C., Kornowski, L.W., Laipelt, L., Collischonn, W., 2021. Sediment Flows in South America Supported by Daily Hydrologic-Hydrodynamic Modeling. *Water Resour. Res.* 57. <https://doi.org/10.1029/2020wr027884>

Fan, F.M., Paiva, R.C.D., Collischonn, W., 2016. Chapter 2 - Hydrological Forecasting Practices in Brazil, in: Adams, T.E., Pagano, T.C.B.T.-F.F. (Orgs.), *Flood Forecasting A Global Perspective*. Academic Press, Boston, p. 41–66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801884-2.00002-5>

Fang, Y., Leung, L.R., Duan, Z., Wigmosta, M.S., Maxwell, R.M., Chambers, J.Q., Tomasella, J., 2017. Influence of landscape heterogeneity on water available to tropical forests in an Amazonian catchment and implications for modeling drought response. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, 8410–8426. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017JD027066>

Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007. The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.* 45, 1–33. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Fassoni-Andrade, A.C., 2020. Mapping and characterization of the central Amazon river-floodplain system by remote sensing and hydraulic modeling. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*.

Fassoni-Andrade, A.C., Durand, F., Moreira, D., Azevedo, A., Santos, V., Funi, C., Laraque, A., 2021a. Comprehensive bathymetry and intertidal topography of the Amazon estuary. *Earth Syst. Sci. Data* 13, 2275–2291. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2275-2021>

Fassoni-Andrade, A.C., Fleischmann, A.S., Papa, F., Paiva, R.C.D. de, Wongchuig, S., Melack, J.M., Moreira, A.A., Paris, A., Ruhoff, A., Barbosa, C., Maciel, D.A., Novo, E., Durand, F., Frappart, F., Aires, F., Abrahão, G.M., Ferreira-Ferreira, J., Espinoza, J.C., Laipelt, L., Costa, M.H., Espinoza-Villar, R., Calmant, S., Pellet, V., 2021b. Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Future Challenges. *Rev. Geophys.* 59, 1–97. <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>

Fassoni-Andrade, A.C., Paiva, R.C.D. de, 2019. Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon. *Remote Sens. Environ.* 221, 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.038>

Fassoni-Andrade, A.C., Paiva, R.C.D., Fleischmann, A.S., 2020a. Lake topography and active storage from satellite observations of flood frequency. *Water Resour. Res.* 56. <https://doi.org/10.1029/2019wr026362>

Fassoni-Andrade, A.C., Paiva, R.C.D., Rudorff, C.M., Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L. de M., 2020b. High-resolution mapping of floodplain topography from space: A case study in the Amazon. *Remote Sens. Environ.* 251, 112065. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112065>

Fekete, B.M., Looser, U., Pietroniro, A., Robarts, R.D., 2012. Rationale for monitoring discharge on the ground. *J. Hydrometeorol.* 13, 1977–1986. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0126.1>

Ferreira-Ferreira, J., Silva, T.S.F., Streher, A.S., Affonso, A.G., De Almeida Furtado, L.F., Forsberg, B.R., Valsecchi, J., Queiroz, H.L., De Moraes Novo, E.M.L., 2015. Combining ALOS/PALSAR derived vegetation structure and inundation patterns to characterize major vegetation types in the Mamirauá Sustainable Development Reserve, Central Amazon floodplain, Brazil. *Wetl. Ecol. Manag.* 23, 41–59. <https://doi.org/10.1007/s11273-014-9359-1>

Ferreira, R.D., Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L. de M., 2013. Assessment of in vivo fluorescence method for chlorophyll-a estimation in optically complex waters (Curuai floodplain, Pará - Brazil). *Acta Limnol. Bras.* 24, 373–386. <https://doi.org/10.1590/s2179-975x2013005000011>

Ferreira, V.G., Montecino, H.C., Ndehedehe, C.E., Heck, B., Gong, Z., de Freitas, S.R.C., Westerhaus, M., 2018. Space-based observations of crustal deflections for drought characterization in Brazil. *Sci. Total Environ.* 644, 256–273. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.277>

Figueroa, S.N., Nobre, C.A., 1990. Precipitation Distribution over Central and Western Tropical South America. *Climanalise* 6, 36–40.

Filizola, N., Guyot, J., 2009. Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. *Hydrol. Process.* 23, 3207–3215. <https://doi.org/10.1002/hyp.7394>

Finer, M., Novoa, S., Weisse, M.J., Petersen, R., Mascaro, J., Souto, T., Stearns, F., Martinez, R.G., 2018. Combating deforestation: From satellite to intervention. *Science (80-. )*. 360, 1303–1305. <https://doi.org/10.1126/science.aat1203>

Fisher, J.B., Malhi, Y., Bonal, D., Da Rocha, H.R., De Araújo, A.C., Gamo, M., Goulden, M.L., Rano, T.H., Huete, A.R., Kondo, H., Kumagai, T., Loescher, H.W., Miller, S., Nobre, A.D., Nouvellon, Y., Oberbauer, S.F., Panuthai, S., Rouspard, O., Saleska, S., Tanaka, K., Tanaka, N., Tu, K.P., Von Randow, C., 2009. The land-atmosphere water flux in the tropics. *Glob. Chang. Biol.* 15, 2694–2714. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01813.x>

Fisher, J.B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M.F., Hook, S., Baldocchi, D., Townsend, P.A., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D.D., Perret, J., Lagouarde, J.P., Waliser, D., Purdy, A.J., French, A., Schimel, D., Famiglietti, J.S., Stephens, G., Wood, E.F., 2017. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resour. Res.* <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>

Fisher, J.B., Tu, K.P., Baldocchi, D.D., 2008. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sens. Environ.* 112, 901–919. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.025>

Fitzjarrald, D.R., Sakai, R.K., Moraes, O.L.L., Cosme de Oliveira, R., Acevedo, O.C., Czirkowsky, M.J., Beldini, T., 2008. Spatial and temporal rainfall variability near the Amazon-Tapajós confluence. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 113, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2007JG000596>

Fleischmann, A.S., Paiva, R., Collischonn, W., 2019. Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. *J. Hydrol. X* 3, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100027>

Fleischmann, A.S., Paiva, R.C.D., Collischonn, W., Siqueira, V.A., Paris, A., Moreira, D.M., Papa, F., Bitar, A.A., Parrens, M., Aires, F., Garambois, P.A., 2020. Trade-Offs Between 1-D and 2-D Regional River Hydrodynamic Models. *Water Resour. Res.* 56. <https://doi.org/10.1029/2019WR026812>

Fleischmann, A.S., Paiva, R.C.D., Collischonn, W., Sorribas, M. V., Pontes, P.R.M., 2016. On river-floodplain interaction and hydrograph skewness. *Water Resour. Res.* 52, 7615–7630. <https://doi.org/10.1002/2016WR019233>

Fleischmann, A.S., Siqueira, V., Paris, A., Collischonn, W., Paiva, R., Pontes, P., Crétaux, J.F., Bergé-Nguyen, M., Biancamaria, S., Gosset, M., Calmant, S., Tanimoun, B., 2018. Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands. *J. Hydrol.* 561, 943–959. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.041>

Flores Júnior, R., 2019. Parametrização de algoritmos empíricos e algoritmo quasi-analítico QAA para estimativa de clorofila-a em lagos da várzea do rio Amazonas. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

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, 348–361. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.015>

Forsberg, B.R., Melack, J.M., Dunne, T., Barthem, R.B., Goulding, M., Paiva, R.C.D., Sorribas, M. V., Silva, U.L., Weisser, S., 2017. The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. *PLoS One* 12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182254>

Frappart, F., Calmant, S., Cauhopé, M., Seyler, F., Cazenave, A., 2006. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin. *Remote Sens. Environ.* 100, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.027>

Frappart, F., Legrésy, B., Niño, F., Blarel, F., Fuller, N., Fleury, S., Birol, F., Calmant, S., 2016. An ERS-2 altimetry reprocessing compatible with ENVISAT for long-term land and ice sheets studies. *Remote Sens. Environ.* 184, 558–581. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.037>

Frappart, F., Papa, F., Famiglietti, J.S., Prigent, C., Rossow, W.B., Seyler, F., 2008. Interannual variations of river water storage from a multiple satellite approach: A case study for the Rio Negro River basin. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JD009438>

Frappart, F., Papa, F., Güntner, A., Tomasella, J., Pfeffer, J., Ramillien, G., Emilio, T., Schiatti, J., Seoane, L., da Silva Carvalho, J., Medeiros Moreira, D., Bonnet, M.P., Seyler, F., 2019. The spatio-temporal variability of groundwater storage in the Amazon River Basin. *Adv. Water Resour.* 124, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.12.005>

Frappart, F., Papa, F., Güntner, A., Werth, S., Santos da Silva, J., Tomasella, J., Seyler, F., Prigent, C., Rossow, W.B., Calmant, S., Bonnet, M.P., 2011. Satellite-based estimates of groundwater storage variations in large drainage basins with extensive floodplains. *Remote Sens. Environ.* 115, 1588–1594. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.003>

Frappart, F., Papa, F., Malbeteau, Y., León, J.G., Ramillien, G., Prigent, C., Seoane, L., Seyler, F., Calmant, S., 2015. Surface Freshwater Storage Variations in the Orinoco Floodplains Using Multi-Satellite Observations. *Remote Sens.* 7, 89–110. <https://doi.org/10.3390/rs70100089>

Frappart, F., Papa, F., Santos Da Silva, J., Ramillien, G., Prigent, C., Seyler, F., Calmant, S., 2012. Surface freshwater storage and dynamics in the Amazon basin during the 2005 exceptional drought. *Environ. Res. Lett.* 7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044010>

Frappart, F., Ramillien, G., 2018. Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs10060829>

Frappart, F., Ramillien, G., Ronchail, J., 2013a. Changes in terrestrial water storage versus rainfall and discharges in the Amazon basin. *Int. J. Climatol.* 33, 3029–3046. <https://doi.org/10.1002/joc.3647>

Frappart, F., Seoane, L., Ramillien, G., 2013b. Validation of GRACE-derived terrestrial water storage from a regional approach over South America. *Remote Sens. Environ.* 137, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.008>

Frappart, F., Seyler, F., Martinez, J.M., León, J.G., Cazenave, A., 2005. Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. *Remote Sens. Environ.* 99, 387–399. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.016>

Fricke, A.T., Nittrouer, C.A., Ogston, A.S., Nowacki, D.J., Asp, N.E., Souza Filho, P.W.M., 2019. Morphology and dynamics of the intertidal floodplain along the Amazon tidal river. *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 204–218. <https://doi.org/10.1002/esp.4545>

Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P.A., Dickinson, R.E., Huang, L., Chakraborty, S., Fernandes, K., Liebmann, B., Fisher, R., Myneni, R.B., 2013. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 18110–18115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>

Fu, R., Zhu, B., Dickinson, R.E., 1999. How Do Atmosphere and Land Surface Influence Seasonal Changes of Convection in the Tropical Amazon? *J. Clim.* 12, 1306–1321. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1306:HDAALS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1306:HDAALS>2.0.CO;2)

Funatsu, B.M., Dubreuil, V., Claud, C., Arvor, D., Gan, M.A., 2012. Convective activity in Mato Grosso state (Brazil) from microwave satellite observations: Comparisons between AMSU and TRMM data sets. *J. Geophys. Res. Atmos.* 117, 1–16. <https://doi.org/10.1029/2011JD017259>

Funatsu, B.M., Le Roux, R., Arvor, D., Espinoza, J.C., Claud, C., Ronchail, J., Michot, V., Dubreuil, V., 2021. Assessing precipitation extremes (1981–2018) and deep convective activity (2002–2018) in the Amazon region with CHIRPS and AMSU data. *Clim. Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05742-8>

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data* 2, 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Gabioux, M., Vinzon, S.B., Paiva, A.M., 2005. Tidal propagation over fluid mud layers on the Amazon shelf. *Cont. Shelf Res.* 25, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.09.001>

Gallo, M.N., Vinzon, S.B., 2005. Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. *Ocean Dyn.* 55, 441–448. <https://doi.org/10.1007/s10236-005-0003-8>

Gao, H., Birkett, C., Lettenmaier, D.P., 2012. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resour. Res.* 48, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2012WR012063>

Garambois, P.-A., Larnier, K., Monnier, J., Finaud-Guyot, P., Verley, J., Montazem, A.-S., Calmant, S., 2020. Variational estimation of effective channel and ungauged anabranching river discharge from multi-satellite water heights of different spatial sparsity. *J. Hydrol.* 581, 124409. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124409>

Garambois, P.A., Calmant, S., Roux, H., Paris, A., Monnier, J., Finaud-Guyot, P., Samine Montazem, A., Santos da Silva, J., 2017. Hydraulic visibility: Using satellite altimetry to parameterize a hydraulic model of an ungauged reach of a braided river. *Hydrol. Process.* 31, 756–767. <https://doi.org/10.1002/hyp.11033>

Garousi-Nejad, I., Tarboton, D.G., Aboutalebi, M., Torres-Rua, A.F., 2019. Terrain Analysis Enhancements to the Height Above Nearest Drainage Flood Inundation Mapping Method, *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2019WR024837>

Garreaud, R.D., Wallace, J.M., 1997. The diurnal march of convective cloudiness over the Americas. *Mon. Weather Rev.* 125, 3157–3171. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<3157:TDMOCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<3157:TDMOCC>2.0.CO;2)

Garstang, M., Massie Jr., H.L., Halverson, J., Greco, S., Scala, J., 1994. Amazon Coastal Squall Lines. Part I: Structure and Kinematics. *Mon. Weather Rev.* 122, 608–622. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0608:ACSLPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0608:ACSLPI>2.0.CO;2)

Gash, J., Keller, M., Bustamante, M., Dias, P.S., 2013. Amazonia and Global Change, *Amazonia and Global Change*. <https://doi.org/10.1029/GM186>

Gatti, L. V., Basso, L.S., Miller, J.B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H.L.G., Tejada, G., Aragão, L.E.O.C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A.H., Corrêa, S.M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C.S.C., Crispim, S.P., Neves, R.A.L., 2021. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 595, 388–393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>

Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M.J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C.A., Darmenov, A., Bosilovich, M.G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A.M., Gu, W., Kim, G.K., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J.E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S.D., Sienkiewicz, M., Zhao, B., 2017. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *J. Clim.* 30, 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>

Gensac, E., Martinez, J.M., Vantrepotte, V., Anthony, E.J., 2016. Seasonal and inter-annual dynamics of suspended sediment at the mouth of the Amazon river: The role of continental and oceanic forcing, and implications for coastal geomorphology and mud bank formation. *Cont. Shelf Res.* 118, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.02.009>

Getirana, A.C.V., Boone, A., Yamazaki, D., Decharme, B., Papa, F., Mognard, N., 2012. The Hydrological Modeling and Analysis Platform (HyMAP): Evaluation in the Amazon Basin. *J. Hydrometeorol.* 13, 1641–1665. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-021.1>

Getirana, A.C.V., Boone, A., Yamazaki, D., Mognard, N., 2013. Automatic parameterization of a flow routing scheme driven by radar altimetry data : Evaluation in the Amazon basin. *Water Resour. Res.* 49, 614–629. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20077>

Getirana, A.C.V., Dutra, E., Guimberteau, M., Kam, J., Li, H.-Y., Decharme, B., Zhang, Z., Ducharme, A., Boone, A., Balsamo, G., Rodell, M., Toure, A.M., Xue, Y., Peters-Lidard, C.D., Kumar, S. V., Arsenault, K., Drapeau, G., Ruby Leung, L., Ronchail, J., Sheffield, J., 2014. Water Balance in the Amazon Basin from a Land Surface Model Ensemble. *J. Hydrometeorol.* 15, 2586–2614. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0068.1>

Getirana, A.C.V., Espinoza, J.C.V., Ronchail, J., Rotunno Filho, O.C., 2011. Assessment of different precipitation datasets and their impacts on the water balance of the Negro River basin. *J. Hydrol.* 404, 304–322. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.037>

Getirana, A.C.V., Kumar, S., Giroto, M., Rodell, M., 2017a. Rivers and Floodplains as Key Components of Global Terrestrial Water Storage Variability. *Geophys. Res. Lett.* 44, 10,359–10,368. <https://doi.org/10.1002/2017GL074684>

Getirana, A.C.V., Peters-Lidard, C., Rodell, M., Bates, P.D., 2017b. Trade-off between cost and accuracy in large-scale surface water dynamic modeling. *Water Resour. Res.* 53, 4942–4955. <https://doi.org/10.1002/2017WR020519>

Gholizadeh, M.H., Melesse, A.M., Reddi, L., 2016. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors (Switzerland)* 16. <https://doi.org/10.3390/s16081298>

Ghosh, S., Thakur, P.K., Sharma, R., Nandy, S., Garg, V., Amarnath, G., Bhattacharyya, S., 2017. The Potential Applications of Satellite Altimetry with SARAL/AltiKa for Indian Inland Waters. *Proc. Natl. Acad. Sci. India Sect. A Phys. Sci.* 87, 661–677. <https://doi.org/10.1007/s40010-017-0463-5>

Giardino, C., Bresciani, M., Braga, F., Fabretto, A., Ghirardi, N., Pepe, M., Gianninetto, M., Colombo, R., 2020. First evaluation of PRISMA Level 1 data for water applications. *Sensors (SUBMITTED)*. <https://doi.org/10.3390/s20164553>

Giddings, L., Choudhury, B.J., 1989. Observation of hydrological features with Nimbus-7 37 GHz data, applied to South America. *Int. J. Remote Sens.* 10, 1673–1686. <https://doi.org/10.1080/01431168908903998>

Giovannetone, J.P., Barros, A.P., 2009. Probing regional orographic controls of precipitation and cloudiness in the Central Andes using satellite data. *J. Hydrometeorol.* 10, 167–182. <https://doi.org/10.1175/2008JHM973.1>

Gleason, C.J., Durand, M.T., 2020. Remote sensing of river discharge: A review and a framing for the discipline. *Remote Sens.* 12, 1–28. <https://doi.org/10.3390/rs12071107>

Gloor, M., Brienens, R.J.W., Galbraith, D., Feldpausch, T.R., Schöngart, J., Guyot, J.-L., Espinoza, J.C., Lloyd, J., Phillips, O.L., 2013. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophys. Res. Lett.* 40, 1729–1733. <https://doi.org/10.1002/grl.50377>

Gomis-Cebolla, J., Jimenez, J.C., Sobrino, J.A., Corbari, C., Mancini, M., 2019. Intercomparison of remote-sensing based evapotranspiration algorithms over amazonian forests. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 80, 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.009>

Gonçalves, L.G., Borak, J.S., Costa, M.H., Saleska, S.R., Baker, I., Restrepo-Coupe, N., Muza, M.N., Poulter, B., Verbeeck, H., Fisher, J.B., Arain, M.A., Arkin, P., Cestaro, B.P., Christoffersen, B., Galbraith, D., Guan, X., van den Hurk, B.J.J.M., Ichii, K., Imbuzeiro, H.M.A., Jain, A.K., Levine, N., Lu, C., Miguez-Macho, G., Roberti, D.R., Sahoo, A., Sakaguchi, K., Schaefer, K., Shi, M., Shuttleworth, W.J., Tian, H., Yang, Z.L., Zeng, X., 2013. Overview of the large-scale biosphere-atmosphere experiment in amazonia data model intercomparison project (LBA-DMIP). *Agric. For. Meteorol.* 182–183, 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.030>

Gosset, M., Kunstmann, H., Zougmore, F., Cazenave, F., Leijnse, H., Uijlenhoet, R., Chwala, C., Keis, F., Doumounia, A., Boubacar, B., Kacou, M., Alpert, P., Messer, H., Rieckermann, J., Hoedjes, J., 2016. Improving rainfall measurement in gauge poor regions thanks to mobile telecommunication networks. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 97, ES49–ES51. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00164.1>

Gruber, A., Krueger, A.F., 1984. The status of the NOAA outgoing longwave radiation data set. *Bull. - Am. Meteorol. Soc.* 65, 958–962. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1984\)065<0958:TSOTNO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1984)065<0958:TSOTNO>2.0.CO;2)

Guilhen, J., Al Bitar, A., Sauvage, S., Parrens, M., Martinez, J.-M., Abril, G., Moreira-Turcq, P., Sánchez-Pérez, J.-M., 2020. Denitrification and associated nitrous oxide and carbon dioxide emissions from the Amazonian wetlands. *Biogeosciences* 17, 4297–4311. <https://doi.org/10.5194/bg-17-4297-2020>

Guimberteau, M., Ciais, P., Ducharne, A., Boisier, J.P., Dutra Aguiar, A.P., Biemans, H., De Deurwaerder, H., Galbraith, D., Kruijt, B., Langerwisch, F., Poveda, G., Rammig, A., Rodriguez, D.A., Tejada, G., Thonicke, K., Von Randow, C., Von Randow, R.C.S., Zhang, K., Verbeek, H., 2017. Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 1455–1475. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1455-2017>

Guimberteau, M., Drapeau, G., Ronchail, J., Sultan, B., Polcher, J., Martinez, J.M., Prigent, C., Guyot, J.L., Cochonneau, G., Espinoza, J.C., Filizola, N., Fraizy, P., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., Noriega, L., Vauchel, P., 2012. Discharge simulation in the sub-basins of the Amazon using ORCHIDEE forced by new datasets. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 911–935. <https://doi.org/10.5194/hess-16-911-2012>

Guimberteau, M., Ducharne, A., Ciais, P., Boisier, J.P., Peng, S., De Weirtd, M., Verbeek, H., 2014. Testing conceptual and physically based soil hydrology schemes against observations for the Amazon Basin. *Geosci. Model Dev.* 7, 1115–1136. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1115-2014>

Gutierrez-Cori, O., Espinoza, J.C., Li, L.Z.X., Wongchuig, S., Arias, P.A., Ronchail, J., Segura, H., 2021. On the Hydroclimate-Vegetation Relationship in the Southwestern Amazon During the 2000–2019 Period. *Front. Water* 3, 1–20. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.648499>

Guzkowska, M.A.J., Rapley, C.G., Ridley, J.K., Cudlip, W., Birkett, C.M., Scott, R.F., 1990. Developments in inland water and land altimetry: University College of London, Mullard Space Science Laboratory, European Space Agency final contract report 7839/88/F/Fl.

Haghtalab, N., Moore, N., Heerspink, B.P., Hyndman, D.W., 2020. Evaluating spatial patterns in precipitation trends across the Amazon basin driven by land cover and global scale forcings. *Theor. Appl. Climatol.* <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03085-3>

Hall, A.C., Schumann, G.J., Bamber, J.L., Bates, P.D., Trigg, M.A., 2012. Geodetic corrections to Amazon River water level gauges using ICESat altimetry 48. <https://doi.org/10.1029/2011WR010895>

Hall, A.C., Schumann, G.J.P., Bamber, J.L., Bates, P.D., 2011. Tracking water level changes of the Amazon Basin with space-borne remote sensing and integration with large scale hydrodynamic modelling: A review. *Phys. Chem. Earth* 36, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.010>

Hamilton, S.K., Kellendorfer, J., Lehner, B., Tobler, M., 2007. Remote sensing of floodplain geomorphology as a surrogate for biodiversity in a tropical river system (Madre de Dios, Peru). *Geomorphology* 89,

Hamilton, S.K., Sippel, S.J., Melack, J.M., 2004. Seasonal inundation patterns in two large savanna floodplains of South America: The Llanos de Moxos (Bolivia) and the Llanos del Orinoco (Venezuela and Colombia). *Hydrol. Process.* 18, 2103–2116. <https://doi.org/10.1002/hyp.5559>

Hamilton, S.K., Sippel, S.J., Melack, J.M., 2002. Comparison of inundation patterns among major South American floodplains. *J. Geophys. Res. Atmos.* 107, 1–14. <https://doi.org/10.1029/2000JD000306>

Hansen, M.C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O., Townshend, J.R.G., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* (80-. ). 342, 850–854. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>

Hastie, A., Lauerwald, R., Ciais, P., Regnier, P., 2019. Aquatic carbon fluxes dampen the overall variation of net ecosystem productivity in the Amazon basin: An analysis of the interannual variability in the boundless carbon cycle. *Glob. Chang. Biol.* 25, 2094–2111. <https://doi.org/10.1111/gcb.14620>

Heerspink, B.P., Kendall, A.D., Coe, M.T., Hyndman, D.W., 2020. Trends in streamflow, evapotranspiration, and groundwater storage across the Amazon Basin linked to changing precipitation and land cover. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 32, 100755. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100755>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1–51. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hersbach, H., Rosnay, P. de, Bell, B., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Alonso-Balmaseda, M., Balsamo, G., Bechtold, P., Berrisford, P., Bidlot, J.-R., de Boissésón, E., Bonavita, M., Browne, P., Buizza, R., Dahlgren, P., Dee, D., Dragani, R., Diamantakis, M., Flemming, J., Forbes, R., Geer, A.J., Haiden, T., Hólm, E., Haimberger, L., Hogan, R., Horányi, A., Janiskova, M., Laloyaux, P., Lopez, P., Munoz-Sabater, J., Peubey, C., Radu, R., Richardson, D., Thépaut, J.-N., Vitart, F., Yang, X., Zsótér, E., Zuo, H., 2018. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP, ERA Report Series, ERA Report.

Hess, L.L., Melack, J.M., Affonso, A.G., Barbosa, C., Gastil-Buhl, M., Novo, E.M.L.M., 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, 745–756. <https://doi.org/10.1007/s13157-015-0666-y>

Hess, L.L., Melack, J.M., Melack, J.M., Filoso, S., Wang, Y., Wang, Y., 1995. Delineation of Inundated Area and Vegetation Along the Amazon Floodplain with the SIR-C Synthetic Aperture Radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33, 896–904. <https://doi.org/10.1109/36.406675>

Hess, L.L., Melack, J.M., Novo, E.M.L.M.L.M., Barbosa, C.C.F.F., Gastil, M., 2003. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. *Remote Sens. Environ.* 87, 404–428. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.001>

Hess, L.L., Melack, J.M., Simonett, D.S., 1990. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: A review. *Int. J. Remote Sens.* 11, 1313–1325. <https://doi.org/10.1080/01431169008955095>

Hoch, J.M., Haag, A. V., van Dam, A., Winsemius, H.C., van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., 2016. Assessing the impact of hydrodynamics on large-scale flood wave propagation - a case study for the Amazon Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–25. <https://doi.org/10.5194/hess-2016-442>

Hodnett, M.G., Vendrame, I., De O. Marques Filho, A., Oyama, M.D., Tomasella, J., 1997. Soil water storage and groundwater behaviour in a catenary sequence beneath forest in central Amazonia: I. Comparisons between plateau, slope and valley floor. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 1, 265–277. <https://doi.org/10.5194/hess-1-265-1997>

Hoek, J. Van Den, Getirana, A., Jung, H.C., Okeowo, M.A., Lee, H., 2019. Monitoring reservoir drought dynamics with landsat and radar/lidar altimetry time series in persistently cloudy eastern Brazil. *Remote Sens.* 11. <https://doi.org/10.3390/rs11070827>

Holmes, T.R.H., Hain, C.R., Crow, W.T., Anderson, M.C., Kustas, W.P., 2018. Microwave implementation of two-source energy balance approach for estimating evapotranspiration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 1351–1369. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1351-2018>

Horel, J.D., Hahmann, A.N., Geisler, J.E., 1989. An investigation of the Annual Cycle of Convective Activity over the Tropical Americas. *J. Clim.* 2, 1388–1403. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<1388:AIOTAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<1388:AIOTAC>2.0.CO;2)

Hu, K., Awange, J.L., Khandu, Forootan, E., Goncalves, R.M., Fleming, K., 2017. Hydrogeological characterisation of groundwater over Brazil using remotely sensed and model products. *Sci. Total Environ.* 599–600, 372–386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.188>

Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., Wu, J., 2018. Detecting, Extracting, and Monitoring Surface Water From Space Using Optical Sensors: A Review. *Rev. Geophys.* 56, 333–360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>

Huffman, G.J., Adler, R.F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B., Schneider, U., 1997. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78, 5–20. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0005:TGP CPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0005:TGP CPG>2.0.CO;2)

Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F., Wolff, D.B., 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeorol.* 8, 38–55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>

Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., 2010. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA). Chapter 1 in *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7>

Huffman, G.J., Adler, R.F., Morrissey, M.M., Bolvin, D.T., Curtis, S., Joyce, R., McGavock, B., Susskind, J., 2001. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *J. Hydrometeorol.* 2, 36–50. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2001\)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2001)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2)

Huffman, G.J., Adler, R.F., Rudolf, B., Schneider, U., Keehn, P.R., 1995. Global Precipitation Estimates Based on a Technique for Combining Satellite-Based Estimates, Rain Gauge Analysis, and NWP Model Precipitation Information. *J. Clim.* 8, 1284–1295. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<1284:GPEBOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<1284:GPEBOA>2.0.CO;2)

Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Adler, R.F., 2016. GPCP Version 1.2 One-Degree Daily Precipitation Data Set. <https://doi.org/10.5065/D6D50K46>

Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P., 2015a. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 4.5. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG).

Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., 2015b. Integrated MultisatellitE Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation.

Hurley, J. V., Vuille, M., Hardy, D.R., Burns, S.J., Thompson, L.G., 2015. Cold air incursions,  $\delta^{18}O$  variability, and monsoon dynamics associated with snow days at Quelccaya Ice Cap, Peru. *J. Geophys. Res. Atmos.* 120, 7467–7487. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015JD023323>

Jardine, T.D., Bond, N.R., Burford, M.A., Kennard, M.J., Ward, D.P., Bayliss, P., Davies, P.M., Douglas, M.M., Hamilton, S.K., Melack, J.M., Naiman, R.J., Pettit, N.E., Pusey, B.J., Warfe, D.M., Bunn, S.E., 2015. Does flood rhythm drive ecosystem responses in tropical riverscapes? *Ecology* 96, 684–692. <https://doi.org/10.1890/14-0991.1>

Jensen, K., McDonald, K., Podest, E., Rodriguez-Alvarez, N., Horna, V., Steiner, N., 2018. Assessing L-Band GNSS-reflectometry and imaging radar for detecting sub-canopy inundation dynamics in a tropical wetlands complex. *Remote Sens.* 10, 1431. <https://doi.org/10.3390/rs10091431>

Ji, X., Lesack, L.F.W., Melack, J.M., Wang, S., Riley, W.J., Shen, C., 2019. Seasonal and inter-annual patterns and controls of hydrological fluxes in an Amazon floodplain lake with a surface-subsurface processes model. *Water Resour. Res.* 55, 3056–3075. <https://doi.org/10.1029/2018WR023897>

Jiang, L., Schneider, R., Andersen, O.B., Bauer-Gottwein, P., 2017. CryoSat-2 altimetry applications over rivers and lakes. *Water* 9, 211. <https://doi.org/10.3390/w9030211>

Jiang, S., Ren, L., Hong, Y., Yong, B., Yang, X., Yuan, F., Ma, M., 2012. Comprehensive evaluation of multi-satellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the Bayesian model averaging method. *J. Hydrol.* 452–453, 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.055>

Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Mattar, C., Malhi, Y., 2013. Spatial and temporal patterns of the recent warming of the Amazon forest. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 5204–5215. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50456>

Jimenez, J.C., Marengo, J.A., Alves, L.M., Sulca, J.C., Takahashi, K., Ferrett, S., Collins, M., 2019. The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. *Int. J. Climatol.* 1–20. <https://doi.org/10.1002/joc.6453>

Jorge, D.S.F., Barbosa, C.C.F., de Carvalho, L.A.S., Affonso, A.G., Lobo, F.D.L., Novo, E.M.L.D.M., 2017. SNR (Signal-To-Noise Ratio) Impact on Water Constituent Retrieval from Simulated Images of Optically Complex Amazon Lakes. *Remote Sens.* 9, 644. <https://doi.org/10.3390/rs9070644>

Jorge, D.S.F., Loisel, H., Jamet, C., Dessailly, D., Demaria, J., Bricaud, A., Maritorena, S., Zhang, X., Antoine, D., Kutser, T., Bélanger, S., Brando, V.O., Werdell, J., Kwiatkowska, E., Mangin, A., D'Andon, O.F., 2021. A three-step semi analytical algorithm (3SAA) for estimating inherent optical properties over oceanic, coastal, and inland waters from remote sensing reflectance. *Remote Sens. Environ.* 263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112537>

Josse, C., Navarro, G., Encarnación, F., Tovar, A., Comer, P., Ferreira, W., Rodríguez, F., Saito, J., Sanjurjo, J., Dyson, J., Celis, E.R. de, Zárate, R., Chang, J., Ahuite, M., Vargas, C., Paredes, F., Castro, W., Maco, J., Reátegui, F., 2007. Ecological Systems of the Amazon Basin of Peru and Bolivia: Classification and Mapping. NatureServe, Virginia.

Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A., Xie, P., 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J. Hydrometeorol.* 5, 487–503. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2)

Joyce, R.J., Xie, P., 2011. Kalman filter-based CMORPH. *J. Hydrometeorol.* 12, 1547–1563. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-022.1>

Jung, H.C., Hamski, J., Durand, M., Alsdorf, D., Hossain, F., Lee, H., Azad Hossain, A.K.M.M., Hasan, K., Khan, A.S., Zeaul Hoque, A.K.M.M., 2010. Characterization of complex fluvial systems using remote sensing of spatial and temporal water level variations in the Amazon, Congo, and Brahmaputra rivers. *Earth Surf. Process. Landforms* 35, 294–304. <https://doi.org/10.1002/esp.1914>

Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S.I., Sheffield, J., Goulden, M.L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., De Jeu, R., Dolman, A.J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Law, B.E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A.D., Rouspard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., Zhang, K., 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 467, 951–954. <https://doi.org/10.1038/nature09396>

Júnior, J.L.S., Tomasella, J., Rodríguez, D.A., 2015. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. *Clim. Change* 129, 117–129. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1338-x>

Junk, W.J., 1997. The Central Amazon Floodplain: ecology of a pulsing system., *Ecological Studies*. Springer-Verlag, Berlin.

Junk, W.J., Bayley, P.B., Sparks, R.E., 1989. The flood pulse concept in river-floodplain-systems. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 106, 110–127. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028909>

Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Schöngart, J., Cohn-Haft, M., Adeney, J.M., Wittmann, F., 2011. A classification of major naturally-occurring amazonian lowland wetlands. *Wetlands* 31, 623–640. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0190-7>

Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Wittmann, F., Schöngart, J., Parolin, P., 2010. Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, ecology, biodiversity and sustainable management, *Ecological Studies*. Springer, Berlin, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6>

Junk, W.J., Wittmann, F., Schöngart, J., Piedade, M.T.F., 2015. A classification of the major habitats of

Amazonian black-water river floodplains and a comparison with their white-water counterparts. *Wetl. Ecol. Manag.* 23, 677–693. <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9412-8>

Junquas, C., Takahashi, K., Condom, T., Espinoza, J.C., Chavez, S., Sicart, J.E., Lebel, T., 2018. Understanding the influence of orography on the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Clim. Dyn.* 50, 3995–4017. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3858-8>

Kandus, P., Minotti, P.G., Morandeira, N.S., Grimson, R., Trilla, G.G., González, E.B., Martín, L.S., Gayol, M.P., 2018. Remote sensing of wetlands in South America: Status and challenges. *Int. J. Remote Sens.* 39, 993–1016. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1395971>

Kasischke, E.S., Melack, J.M., Dobson, M.C., 1997. The use of imaging radars for ecological applications - A review. *Remote Sens. Environ.* 59, 141–156. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00148-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00148-4)

Khaki, M., Forootan, E., Kuhn, M., Awange, J., Longuevergne, L., Wada, Y., 2018. Efficient basin scale filtering of GRACE satellite products. *Remote Sens. Environ.* 204, 76–93. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.040>

Khaki, M., Hoteit, I., Kuhn, M., Forootan, E., Awange, J., 2019. Assessing data assimilation frameworks for using multi-mission satellite products in a hydrological context. *Sci. Total Environ.* 647, 1031–1043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.032>

Khand, K., Numata, I., Kjaersgaard, J., Vourlitis, G.L., 2017. Dry season evapotranspiration dynamics over human-impacted landscapes in the southern Amazon using the landsat-based METRIC model. *Remote Sens.* 9. <https://doi.org/10.3390/rs9070706>

Khanna, J., Medvigy, D., Fueglistaler, S., Walko, R., 2017. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. *Nat. Clim. Chang.* 7, 200–204. <https://doi.org/10.1038/nclimate3226>

Kidd, C., 2001. Satellite rainfall climatology: A review. *Int. J. Climatol.* 21, 1041–1066. <https://doi.org/10.1002/joc.635>

Kidd, C., Becker, A., Huffman, G.J., Muller, C.L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., Kirschbaum, D.B., 2017. So, How Much of the Earth's Surface Is Covered by Rain Gauges? *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 98, 69–78. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>

Kidd, C., Huffman, G., 2011. Global precipitation measurement. *Meteorol. Appl.* 18, 334–353. <https://doi.org/10.1002/met.284>

Kidd, C., Kniveton, D.R., Todd, M.C., Bellerby, T.J., 2003. Satellite Rainfall Estimation Using Combined Passive Microwave and Infrared Algorithms. *J. Hydrometeorol.* 4, 1088–1104. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<1088:SREUCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1088:SREUCP>2.0.CO;2)

Kidd, C., Levizzani, V., 2011. Status of satellite precipitation retrievals. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 1109–1116. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1109-2011>

Kiladis, G.N., Mo, K.C., 1998. Interannual and Intraseasonal Variability in the Southern Hemisphere, in: Karoly, D.J., Vincent, D.G. (Eds.), *Meteorology of the Southern Hemisphere*. American Meteorological

Society, Boston, MA, p. 307–336. [https://doi.org/10.1007/978-1-935704-10-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-935704-10-2_11)

Kilham, N.E., Roberts, D., 2011. Amazon river time series of surface sediment concentration from MODIS. *Int. J. Remote Sens.* 32, 2659–2679. <https://doi.org/10.1080/01431161003713044>

Killeen, T.J., Douglas, M., Consiglio, T., Jørgensen, P.M., Mejia, J., 2007. Dry spots and wet spots in the Andean hotspot. *J. Biogeogr.* 34, 1357–1373. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01682.x>

Kim, D., Lee, H., Beighley, E., Tshimanga, R.M., 2021. Estimating discharges for poorly gauged river basin using ensemble learning regression with satellite altimetry data and a hydrologic model. *Adv. Sp. Res.* 68, 607–618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.018>

Kim, D., Lee, H., Laraque, A., Tshimanga, R.M., Yuan, T., Jung, H.C., Beighley, E., Chang, C.-H., 2017. Mapping spatio-temporal water level variations over the central Congo River using PALSAR ScanSAR and Envisat altimetry data. *Int. J. Remote Sens.* 38, 7021–7040. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1371867>

Kim, D., Yu, H., Lee, H., Beighley, E., Durand, M., Alsdorf, D.E., Hwang, E., 2019. Ensemble learning regression for estimating river discharges using satellite altimetry data: Central Congo River as a Test-bed. *Remote Sens. Environ.* 221, 741–755. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.010>

Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunois, M., Canadell, J.G., Dlugokencky, E.J., Bergamaschi, P., Bergmann, D., Blake, D.R., Bruhwiler, L., Cameron-Smith, P., Castaldi, S., Chevallier, F., Feng, L., Fraser, A., Heimann, M., Hodson, E.L., Houweling, S., Josse, B., Fraser, P.J., Krummel, P.B., Lamarque, J.F., Langenfelds, R.L., Le Quéré, C., Naik, V., O’Doherty, S., Palmer, P.I., Pison, I., Plummer, D., Poulter, B., Prinn, R.G., Rigby, M., Ringeval, B., Santini, M., Schmidt, M., Shindell, D.T., Simpson, I.J., Spahni, R., Steele, L.P., Strode, S.A., Sudo, K., Szopa, S., Van Der Werf, G.R., Voulgarakis, A., Van Weele, M., Weiss, R.F., Williams, J.E., Zeng, G., 2013. Three decades of global methane sources and sinks. *Nat. Geosci.* 6, 813–823. <https://doi.org/10.1038/ngeo1955>

Klein, I., Dietz, A., Gessner, U., Dech, S., Kuenzer, C., 2015. Results of the Global WaterPack: A novel product to assess inland water body dynamics on a daily basis. *Remote Sens. Lett.* 6. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.1002945>

Knapp, K.R., Ansari, S., Bain, C.L., Bourassa, M.A., Dickinson, M.J., Funk, C., Helms, C.N., Hennon, C.C., Holmes, C.D., Huffman, G.J., Kossin, J.P., Lee, H.T., Loew, A., Magnusdottir, G., 2011. Globally Gridded Satellite observations for climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 92, 893–907. <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3039.1>

Koblinsky, C.J., Clarke, R.T., Brenner, A.C., Frey, H., 1993. Measurement of river level variations with satellite altimetry. *Water Resour. Res.* 29, 1839–1848. <https://doi.org/10.1029/93WR00542>

Kolassa, J., Gentine, P., Prigent, C., Aires, F., 2016. Soil moisture retrieval from AMSR-E and ASCAT microwave observation synergy. Part 1: Satellite data analysis. *Remote Sens. Environ.* 173, 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.011>

Koren, I., Martins, J. V., Remer, L.A., Afargan, H., 2008. Smoke Invigoration Versus Inhibition of Clouds over the Amazon. *Science (80- )*. 321, 946–949. <https://doi.org/10.1126/science.1159185>

Kosuth, P., Calledo, J., Laraque, A., Filizola, N., Guyot, J.L., Seyler, P., Fritsch, J.M., Guimaraes, V., 2009.

Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. *Hydrol. Process.* 23, 3141–3150. <https://doi.org/10.1002/hyp.7387>

Kumar, S., Del Castillo-Velarde, C., Prado, J.M.V., Rojas, J.L.F., Gutierrez, S.M.C., Alvarez, A.S.M., Martine-Castro, D., Silva, Y., 2020. Rainfall characteristics in the mantaro basin over tropical andes from a vertically pointed profile rain radar and in-situ field campaign. *Atmosphere (Basel)*. 11. <https://doi.org/10.3390/atmos11030248>

Kustas, W.P., Norman, J.M., 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover, *Agricultural and Forest Meteorology*.

Kutser, T., Pascual, G.C., Barbosa, C., Paavel, B., 2016. Mapping inland water carbon content with Landsat 8 data. *Int. J. Remote Sens.* ISSN. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1186852>

Kvist, L.P., Nebel, G., 2001. A review of Peruvian flood plain forests: Ecosystems, inhabitants and resource use. *For. Ecol. Manage.* 150, 3–26. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00679-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00679-4)

Laipeit, L., Ruhoff, A.L., Fleischmann, A.S., Bloedow Kayser, R.H., Kich, E. de M., Rocha, H.R. da, Usher Neale, C.M., 2020. Assessment of an automated calibration of the SEBAL Algorithm to estimate dry-season surface-energy partitioning in a Forest-Savanna Transition in Brazil. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/rs12071108>

Landerer, F.W., Flechtner, F.M., Save, H., Webb, F.H., Bandikova, T., Bertiger, W.I., Bettadpur, S. V., Byun, S.H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fahnestock, E., Harvey, N., Kang, Z., Kruizinga, G.L.H., Loomis, B.D., McCullough, C., Murböck, M., Nagel, P., Paik, M., Pie, N., Poole, S., Strelakov, D., Tamisiea, M.E., Wang, F., Watkins, M.M., Wen, H.Y., Wiese, D.N., Yuan, D.N., 2020. Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance. *Geophys. Res. Lett.* 47. <https://doi.org/10.1029/2020GL088306>

Laranjeiras, T.O., Naka, L.N., Leite, G.A., Cohn-Haft, M., 2021. Effects of a major Amazonian river confluence on the distribution of floodplain forest avifauna. *J. Biogeogr.* 1–14. <https://doi.org/10.1111/jbi.14042>

Latrubesse, E.M., 2012. Amazon lakes, in: Bengtsson, L., Herschy, R.W., Fairbridge, R.W. (Eds.), *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Springer Verlag, p. 13–26. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6>

Latrubesse, E.M., Arima, E.Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V.R., D’Horta, F.M., Wight, C., Wittmann, F., Zuanon, J., Baker, P.A., Ribas, C.C., Norgaard, R.B., Filizola, N., Ansar, A., Flyvbjerg, B., Stevaux, J.C., 2017. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature22333>

Latrubesse, E.M., Franzinelli, E., 2002. The Holocene alluvial plain of the middle Amazon River, Brazil. *Geomorphology* 44, 241–257. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00177-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00177-5)

Lauerwald, R., Regnier, P., Guenet, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., 2020. How Simulations of the Land Carbon Sink Are Biased by Ignoring Fluvial Carbon Transfers: A Case Study for the Amazon Basin. *One Earth* 3, 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.009>

Laurance, W.F., Bruce Williamson, G., 2001. Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon. *Conserv. Biol.* 15, 1529–1535. <https://doi.org/10.1046/j.1523->

Lawrence, D., Vandecar, K., 2015. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nat. Clim. Chang.* 5, 27–36. <https://doi.org/10.1038/nclimate2430>

Lee, H., Beighley, R.E., Alsdorf, D., Jung, H.C., Shum, C.K., Duan, J., Guo, J., Yamazaki, D., Andreadis, K., 2011. Characterization of terrestrial water dynamics in the Congo Basin using GRACE and satellite radar altimetry. *Remote Sens. Environ.* 115, 3530–3538. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.015>

Lee, H., Yuan, T., Jung, H.C., Beighley, E., 2015. Mapping wetland water depths over the central Congo Basin using PALSAR ScanSAR, Envisat altimetry, and MODIS VCF data. *Remote Sens. Environ.* 159, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.030>

Lee, H., Yuan, T., Yu, H., Jung, H.C., 2020. Interferometric SAR for Wetland Hydrology: An Overview of Methods, Challenges, and Trends. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 8, 120–135. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2958653>

Lee, Z.-P., Shang, S., Lin, G., Chen, J., Doxaran, D., 2016. On the modeling of hyperspectral remote-sensing reflectance of high-sediment-load waters in the visible to shortwave-infrared domain. *Appl. Opt.* 55, 1738–1750. <https://doi.org/10.1364/AO.55.001738>

LeFavour, G., Alsdorf, D., 2005. Water slope and discharge in the Amazon River estimated using the shuttle radar topography mission digital elevation model. *Geophys. Res. Lett.* 32, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2005GL023836>

Legresy, B., Papa, F., Remy, F., Vinay, G., Van Den Bosch, M., Zanife, O.Z., 2005. ENVISAT radar altimeter measurements over continental surfaces and ice caps using the ICE-2 retracking algorithm. *Remote Sens. Environ.* 95, 150–163. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.018>

Leite-Filho, A.T., Costa, M.H., Fu, R., 2020. The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. *Int. J. Climatol.* 40, 2328–2341. <https://doi.org/10.1002/joc.6335>

Leite-Filho, A.T., Pontes, V.Y. de S., Costa, M.H., 2019. Effects of Deforestation on the Onset of the Rainy Season and the Duration of Dry Spells in Southern Amazonia. *J. Geophys. Res. Atmos.* 124, 5268–5281. <https://doi.org/10.1029/2018JD029537>

Leite-Filho, A.T., Soares-Filho, B.S., Davis, J.L., Abrahão, G.M., Börner, J., 2021. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* 12, 2591. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>

Leite, C.C., Costa, M.H., de Lima, C.A., Ribeiro, C.A.A.S., Sedyama, G.C., 2011. Historical reconstruction of land use in the Brazilian Amazon (1940–1995). *J. Land Use Sci.* 6, 33–52. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2010.501157>

Leite, C.C., Costa, M.H., Soares-Filho, B.S., De Barros Viana Hissa, L., 2012. Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. *Global Biogeochem. Cycles* 26. <https://doi.org/10.1029/2011GB004133>

- Lenters, J.D., Cook, K.H., 1997. On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. *J. Atmos. Sci.* 54, 656–677. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<0656:ootootb>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<0656:ootootb>2.0.co;2)
- Leon, J.G., Calmant, S., Seyler, F., Bonnet, M.P., Cauhopé, M., Frappart, F., Filizola, N., Fraizy, P., 2006. Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges. *J. Hydrol.* 328, 481–496. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.006>
- Lesack, F.W., Melack, J.M., 1995. Flooding hydrology and mixture dynamics of lakewater derived from multiple sources in an Amazon floodplain lake. *Water Resour. Res.* 31, 329–345.
- Leuning, R., Zhang, Y.Q., Rajaud, A., Cleugh, H., Tu, K., 2008. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. *Water Resour. Res.* 44. <https://doi.org/10.1029/2007WR006562>
- Levizzani, V., Cattani, E., 2019. Satellite remote sensing of precipitation and the terrestrial water cycle in a changing climate. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs11192301>
- Levizzani, V., Laviola, S., Cattani, E., 2011. Detection and measurement of snowfall from space. *Remote Sens.* 3, 145–166. <https://doi.org/10.3390/rs3010145>
- Levizzani, V., Porcú, F., Marzano, F.S., Mugnai, A., Smith, E.A., Prodi, F., 2007. Investigating a SSM/I microwave algorithm to calibrate Meteosat infrared instantaneous rainrate estimates. *Meteorol. Appl.* 3, 5–17. <https://doi.org/10.1002/met.5060030102>
- Levy, M.C., Lopes, A. V., Cohn, A., Larsen, L.G., Thompson, S.E., 2018. Land use change increases streamflow across the arc of deforestation in Brazil. *Geophys. Res. Lett.* 3520–3530. <https://doi.org/10.1002/2017GL076526>
- Lewin, J., Ashworth, P.J., Strick, R.J.P., 2017. Spillage sedimentation on large river floodplains. *Earth Surf. Process. Landforms* 42, 290–305. <https://doi.org/10.1002/esp.3996>
- Lewis, S.L., Brando, P.M., Phillips, O.L., Van Der Heijden, G.M.F., Nepstad, D., 2011. The 2010 Amazon drought. *Science* (80-. ). 331, 554. <https://doi.org/10.1126/science.1200807>
- Li, T., Wang, S., Liu, Y., Fu, B., Gao, D., 2020. Reversal of the sediment load increase in the Amazon basin influenced by divergent trends of sediment transport from the Solimões and Madeira Rivers. *Catena* 195, 104804. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104804>
- Liang, Y.C., Lo, M.H., Lan, C.W., Seo, H., Ummenhofer, C.C., Yeager, S., Wu, R.J., Steffen, J.D., 2020. Amplified seasonal cycle in hydroclimate over the Amazon river basin and its plume region. *Nat. Commun.* 11, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18187-0>
- Libonati, R., Pereira, J.M.C., Da Camara, C.C., Peres, L.F., Oom, D., Rodrigues, J.A., Santos, F.L.M., Trigo, R.M., Gouveia, C.M.P., Machado-Silva, F., Enrich-Prast, A., Silva, J.M.N., 2021. Twenty-first century droughts have not increasingly exacerbated fire season severity in the Brazilian Amazon. *Sci. Rep.* 11, 4400. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82158-8>
- Liebmann, B., Smith, C.A., 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*

- Lima, Leticia S., Coe, M.T., Soares Filho, B.S., Cuadra, S. V., Dias, L.C.P., Costa, M.H., Lima, Leandro S., Rodrigues, H.O., 2014. Feedbacks between deforestation, climate, and hydrology in the Southwestern Amazon: Implications for the provision of ecosystem services. *Landsc. Ecol.* 29, 261–274. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9962-1>
- Lin, J.C., Matsui, T., Pielke, R.A., Kummerow, C., 2006. Effects of biomass-burning-derived aerosols on precipitation and clouds in the Amazon Basin: a satellite-based empirical study. *J. Geophys. Res.* 111, D19204. <https://doi.org/10.1029/2005JD006884>
- Liu, X., Yang, T., Hsu, K., Liu, C., Sorooshian, S., 2017. Evaluating the streamflow simulation capability of PERSIANN-CDR daily rainfall products in two river basins on the Tibetan Plateau. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 169–181. <https://doi.org/10.5194/hess-21-169-2017>
- Liu, Y.Y., Parinussa, R.M., Dorigo, W.A., De Jeu, R.A.M., Wagner, W., van Dijk, A.I.J.M., McCabe, M.F., Evans, J.P., 2011. Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 425–436. <https://doi.org/10.5194/hess-15-425-2011>
- Llaura, H., Lavado-Casimiro, W., León, K., Jimenez, J., Traverso, K., Rau, P., 2021. Assessing Near Real-Time Satellite Precipitation Products for Flood Simulations at Sub-Daily Scales in a Sparsely Gauged Watershed in Peruvian Andes. *Remote Sens.* 13, 826. <https://doi.org/10.3390/rs13040826>
- Lobo, F., Costa, M., Novo, E., Telmer, K., 2016. Distribution of Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Tapajós River Basin (Brazilian Amazon) over the Past 40 Years and Relationship with Water Siltation. *Remote Sens.* 8, 579. <https://doi.org/10.3390/rs8070579>
- Lobo, F., Costa, M.P.F., Novo, E.M.L.M., 2015. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. *Remote Sens. Environ.* 157, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.030>
- Lobo, F., Novo, E.M.L. de M., Barbosa, C.C.F., Galvão, L.S., 2012. Reference spectra to classify Amazon water types. *Int. J. Remote Sens.* 33, 3422–3442. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.627391>
- Lobo, F., Souza-Filho, P.W.M., Novo, E.M.L. de M., Carlos, F.M., Barbosa, C.C.F., 2018. Mapping mining areas in the Brazilian amazon using MSI/Sentinel-2 imagery (2017). *Remote Sens.* 10. <https://doi.org/10.3390/rs10081178>
- Lobón-Cervía, J., Hess, L.L., Melack, J.M., Araujo-Lima, C.A.R.M., 2015. The importance of forest cover for fish richness and abundance on the Amazon floodplain. *Hydrobiologia* 750, 245–255. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2040-0>
- Lopes, A. V., Chiang, J.C.H., Thompson, S.A., Dracup, J.A., 2016. Trend and uncertainty in spatial-temporal patterns of hydrological droughts in the Amazon basin. *Geophys. Res. Lett.* 43, 3307–3316. <https://doi.org/10.1002/2016GL067738>
- Lopez, T., Al Bitar, A., Biancamaria, S., Güntner, A., Jäggi, A., 2020. On the Use of Satellite Remote Sensing to Detect Floods and Droughts at Large Scales. *Surv. Geophys.* <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09618-0>
- Luo, X., Li, H.Y., Ruby Leung, L., Tesfa, T.K., Getirana, A., Papa, F., Hess, L.L., 2017. Modeling surface

water dynamics in the Amazon Basin using MOSART-Inundation v1.0: Impacts of geomorphological parameters and river flow representation. *Geosci. Model Dev.* 10, 1233–1259. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1233-2017>

Luz-Agostinho, K.D.G., Agostinho, A.A., Gomes, L.C., Júlio-Jr., H.F., Fugi, R., 2009. Effects of flooding regime on the feeding activity and body condition of piscivorous fish in the Upper Paraná River floodplain. *Brazilian J. Biol.* 69, 481–490. <https://doi.org/10.1590/s1519-69842009000300004>

Maciel, D.A., Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L. de M., Cherukuru, N., Martins, V.S., Flores Júnior, R., Jorge, D.S., Sander de Carvalho, L.A., Carlos, F.M., 2020a. Mapping of diffuse attenuation coefficient in optically complex waters of amazon floodplain lakes. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 170, 72–87. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.10.009>

Maciel, D.A., Novo, E., Sander de Carvalho, L., Barbosa, C., Flores Júnior, R., de Lucia Lobo, F., de Carvalho, L.S., Barbosa, C., Júnior, R.F., Lobo, F.L., 2019. Retrieving Total and Inorganic Suspended Sediments in Amazon Floodplain Lakes: A Multisensor Approach. *Remote Sens.* 11, 1744. <https://doi.org/10.3390/rs11151744>

Maciel, D.A., Novo, E.M.L. de M., Barbosa, C.C.F.C.F.C., Martins, V.S., Flores Júnior, R., Oliveira, A.H., Sander de Carvalho, L.A., Lobo, F. de L., de Carvalho, L., Lobo, F. de L., Márcia, E., Moraes, L. De, Barbosa, C.C.F.C.F.C., Martins, V.S., Júnior, R.F., Oliveira, H., Augusto, L., Carvalho, S. De, Lobo, F. de L., Novo, E.M.L. de M., Barbosa, C.C.F.C.F.C., Martins, V.S., Júnior, R.F., Oliveira, A.H., Sander de Carvalho, L.A., Lobo, F. de L., 2020b. Evaluating the potential of CubeSats for remote sensing reflectance retrieval over inland waters. *Int. J. Remote Sens.* 41, 2807–2817. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1697003>

Madden, R.A., Julian, P.R., 1994. Observations of the 40–50-Day Tropical Oscillation—A Review. *Mon. Weather Rev.* 122, 814–837. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0814:OOTDTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0814:OOTDTP>2.0.CO;2)

Maeda, E.E., Kim, H., Aragão, L.E.O.C., Famiglietti, J.S., Oki, T., 2015. Disruption of hydroecological equilibrium in southwest Amazon mediated by drought. *Geophys. Res. Lett.* 42, 7546–7553. <https://doi.org/10.1002/2015GL065252>

Maeda, E.E., Ma, X., Wagner, F.H., Kim, H., Oki, T., Eamus, D., Huete, A., 2017. Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin. *Earth Syst. Dyn.* 8, 439–454. <https://doi.org/10.5194/esd-8-439-2017>

Manz, B., Páez-Bimos, S., Horna, N., Buytaert, W., Ochoa-Tocachi, B., Lavado-Casimiro, W., Willems, B., 2017. Comparative ground validation of IMERG and TMPA at variable spatiotemporal scales in the tropical Andes. *J. Hydrometeorol.* 18, 2469–2489. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0277.1>

Marengo, J.A., 2005. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon river basin water budget. *Clim. Dyn.* 24, 11–22. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0461-6>

Marengo, J.A., Espinoza, J.C., 2016. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* 36, 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>

Marengo, J.A., Nobre, C.A., Tomasella, J., Cardoso, M.F., Oyama, M.D., 2008. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 1773–1778. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0015>

Marengo, J.A., Souza, C.M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R.A., Alves, L.M., Soares, W.R., 2018. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Front. Earth Sci.* <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>

Marengo, J.A., Tomasella, J., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A., 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys. Res. Lett.* 38, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>

Marinho, R.R., Filizola Junior, N.P., Cremon, É.H., 2020. Analysis of Suspended Sediment in the Anavilhanas Archipelago, Rio Negro, Amazon Basin. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12041073>

Marinho, R.R., Harmel, T., Martinez, J.M., Junior, N.P.F., 2021. Spatiotemporal dynamics of suspended sediments in the negro river, amazon basin, from in situ and sentinel-2 remote sensing data. *ISPRS Int. J. Geo-Information* 10. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020086>

Marinho, T., Filizola, N., Martinez, J.M., Armijos, E., Nascimento, A., 2018. Suspended sediment variability at the Solimões and negro confluence between May 2013 and February 2014. *Geosci.* 8. <https://doi.org/10.3390/geosciences8070265>

Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., Van Der Schalie, R., De Jeu, R.A.M., Fernández-Prieto, D., Beck, H.E., Dorigo, W.A., Verhoest, N.E.C., 2017. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geosci. Model Dev.* 10, 1903–1925. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017>

Martinez, J., Espinoza-villar, R., Armijos, E., Moreira, L.S., 2015. The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter - Supplementary material. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 1, 1–11. <https://doi.org/10.1002/2014JF003404>. Received

Martinez, J.A., Dominguez, F., 2014. Sources of Atmospheric Moisture for the La Plata River Basin\*. *J. Clim.* 27, 6737–6753. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00022.s1>

Martinez, J.M., Guyot, J.L., Filizola, N., Sondag, F., 2009. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Catena* 79, 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.011>

Marzano, F.S., Member, S., Palmacci, M., Cimini, D., Giuliani, G., Turk, F.J., 2004. Multivariate Statistical Integration of Satellite Infrared and Microwave Radiometric Measurements for Rainfall Retrieval at the Geostationary Scale 42, 1018–1032.

Massari, C., 2020. GPM+SM2RAIN (2007-2018): quasi-global 25km/daily rainfall product from the integration of GPM and SM2RAIN-based rainfall products. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3854817>

Massari, C., Brocca, L., Tarpanelli, A., Moramarco, T., 2015. Data assimilation of satellite soil moisture into rainfall-runoffmodelling: A complex recipe?, *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs70911403>

Matthews, E., Fung, I., 1987. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochem. Cycles* 1, 61–86. <https://doi.org/10.1029/GB001i001p00061>

Matthews, M.W., 2011. A current review of empirical procedures of remote sensing in Inland and near-coastal transitional waters. *Int. J. Remote Sens.* 32, 6855–6899. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512947>

Mayta, V.C., Ambrizzi, T., Espinoza, J.C., Silva Dias, P.L., 2019. The role of the Madden–Julian oscillation on the Amazon Basin intraseasonal rainfall variability. *Int. J. Climatol.* 39, 343–360. <https://doi.org/10.1002/joc.5810>

McCabe, M.F., Rodell, M., Alsdorf, D.E., Miralles, D.G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., Lucieer, A., Houborg, R., Verhoest, N.E.C., Franz, T.E., Shi, J., Gao, H., Wood, E.F., 2017. The future of Earth observation in hydrology. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 3879–3914. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3879-2017>

McCorkel, J., Montanaro, M., Efremova, B., Pearlman, A., Wenny, B., Lunsford, A., Simon, A., Hair, J., Reuter, D., 2018. Landsat 9 Thermal Infrared Sensor 2 Characterization Plan Overview, in: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, Valencia, Spain*, p. 8845–8848.

Meade, R.H., 1994. Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco rivers. *Quat. Int.* 21, 29–39. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(94\)90019-1](https://doi.org/10.1016/1040-6182(94)90019-1)

Melack, J.M., 2016. Aquatic ecosystems, in: Nagy, L., Artaxo, P., Forsberg, B.R. (Orgs.), *Interactions Between Biosphere, Atmosphere, and Human Land Use in the Amazon Basin*. Springer, p. 117–145. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3_1)

Melack, J.M., Amaral, J.H.F., Kasper, D., Barbosa, P.M., Forsberg, B.R., 2021. Limnological perspectives on conservation of aquatic ecosystems in the Amazon basin. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 30. <https://doi.org/10.1002/aqc.3556>

Melack, J.M., Coe, M., 2021. Amazon floodplain hydrology and implications for aquatic conservation. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 31, 1029–1040.

Melack, J.M., Forsberg, B.R., 2001. The Biogeochemistry of the Amazon Floodplain Lakes and Associated Wetlands. *Biogeochem. Amaz. Basin its Role a Chang. World*.

Melack, J.M., Hess, L.L., 2010. Remote sensing of the distribution and extend of wetlands in the Amazon Basin, in: W., J., Piedade, M.T.F., Wittmann, F., Schöngart, J., Parolin, P. (Orgs.), *Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, ecology, biodiversity and sustainable management. Ecological Studies*. Springer, Dordrecht, p. 43–59. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6_3)

Melack, J.M., Hess, L.L., Gastil, M., Forsberg, B.R., Hamilton, S.K., Lima, I.B.T., Novo, E.M.L.M., 2004. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. *Glob. Chang. Biol.* 10, 530–544. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00763.x>

Melack, J.M., Novo, E.M.L.M., Forsberg, B.R., Piedade, M.T.F.F., Maurice, L., 2009. Floodplain Ecosystem Processes. *Amaz. Glob. Chang.* 525–541. <https://doi.org/10.1029/2008GM000727>

Menenti, M., Choudhury, B.J., 1993. Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range, in: *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales. IAHS Publ, Yokohama, Japan*, p. 561–568.

Mertes, L.A.K., 1997. Documentation and significance of the perirheic zone on inundated floodplains. *Water Resour. Res.* 33, 1749–1762. <https://doi.org/10.1029/97WR00658>

Mertes, L.A.K., Daniel, D.L., Melack, J.M., Nelson, B., Martinelli, L.A., Forsberg, B.R., 1995. Spatial patterns of hydrology, geomorphology, and vegetation on the floodplain of the Amazon river in Brazil from a remote sensing perspective. *Geomorphology* 13, 215–232. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00038-7](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00038-7)

Mertes, L.A.K., Dunne, T., Martinelli, L.A., 1996. Channel-floodplain geomorphology along the Solimoes-Amazon River, Brazil. *Bull. Geol. Soc. Am.* 108, 1089–1107. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1996\)108<1089:CFGATS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1996)108<1089:CFGATS>2.3.CO;2)

Mertes, L.A.K., Smith, M.O., Adams, J.B., 1993. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the amazon river wetlands from landsat images. *Remote Sens. Environ.* 43, 281–301. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90071-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90071-5)

Michel, D., Jiménez, C., Miralles, D.G., Jung, M., Hirschi, M., Ershadi, A., Martens, B., McCabe, M.F., Fisher, J.B., Mu, Q., Seneviratne, S.I., Wood, E.F., Fernández-Prieto, D., 2016. The WACMOS-ET project - Part 1: Tower-scale evaluation of four remote-sensing-based evapotranspiration algorithms. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 803–822. <https://doi.org/10.5194/hess-20-803-2016>

Miguez-Macho, G., Fan, Y., 2012. The role of groundwater in the Amazon water cycle: 1. Influence on seasonal streamflow, flooding and wetlands. *J. Geophys. Res. Atmos.* 117, 1–30. <https://doi.org/10.1029/2012JD017539>

Minnis, P., Harrison, E.F., 1984. Diurnal Variability of Regional Cloud and Clear-Sky Radiative Parameters Derived from GOES Data. Part II: November 1978 Cloud Distributions. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23, 1012–1031. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1012:DVORCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1012:DVORCA>2.0.CO;2)

Miralles, D.G., Holmes, T.R.H., De Jeu, R.A.M., Gash, J.H., Meesters, A.G.C.A., Dolman, A.J., 2011. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 453–469. <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>

Miralles, D.G., Jiménez, C., Jung, M., Michel, D., Ershadi, A., McCabe, M.F., Hirschi, M., Martens, B., Dolman, A.J., Fisher, J.B., Mu, Q., Seneviratne, S.I., Wood, E.F., Fernández-Prieto, D., 2016. The WACMOS-ET project - Part 2: Evaluation of global terrestrial evaporation data sets. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 823–842. <https://doi.org/10.5194/hess-20-823-2016>

Mobley, C.D., 1994. *Light and water: radiative transfer in natural waters.* Academic press.

Mohammadimanesh, F., Salehi, B., Mahdianpari, M., Brisco, B., Motagh, M., 2018. Wetland Water Level Monitoring Using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR): A Review. *Can. J. Remote Sens.* 0, 1–16. <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1477680>

Mohor, G.S., Rodriguez, D.A., Tomasella, J., Siqueira Júnior, J.L., 2015. Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 4, 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.04.003>

Molina-Carpio, J., Espinoza, J.C., Vauchel, P., Ronchail, J., Gutierrez Caloir, B., Guyot, J.L., Noriega, L., 2017. Hydroclimatology of the Upper Madeira River basin: spatio-temporal variability and trends.

Hydrol. Sci. J. 62, 911–927. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1267861>

Molinas, E., Carneiro, J.C., Vinzon, S., 2020. Internal tides as a major process in Amazon continental shelf fine sediment transport. *Mar. Geol.* 430. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106360>

Montanher, O.C., Novo, E.M.L. de M., Barbosa, C.C.F.F., Rennó, C.D., Silva, T.S.F.F., 2014. Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 29, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.001>

Montanher, O.C., Novo, E.M.L. de M., Filho, E.D.S., 2018. Temporal trend of the suspended sediment transport of the Amazon River ( 1984 – 2016 ). *Hydrol. Sci. J.* 63, 1901–1912. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1546387>

Montazem, A., Garambois, P., Calmant, S., Finaud-Guyot, P., Monnier, J., Medeiros Moreira, D., Minear, J.T., Biancamaria, S., 2019. Wavelet-based river segmentation using hydraulic control-preserving water surface elevation profile properties. *Geophys. Res. Lett.* 2019GL082986. <https://doi.org/10.1029/2019GL082986>

Monteith, J., 1965. Evaporation and the Environment in the State and Movement of Water in Living Organisms, in: *Proceedings of the Society for Experimental Biology*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 205–234.

Monteith, J., Unsworth, M., 2013. Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere, Fourth. ed, Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere: Fourth Edition. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66393-0>

Moreira, A.A., Ruhoff, A.L., Roberti, D.R., Souza, V. de A., da Rocha, H.R., de Paiva, R.C.D., 2019. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. *J. Hydrol.* 575, 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.021>

Mu, Q., Heinsch, F.A., Zhao, M., Running, S.W., 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sens. Environ.* 111, 519–536. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015>

Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W., 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.* 115, 1781–1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>

Mueller, J.L., Morel, A., Frouin, R., Davis, C.O., Arnone, R. a., Carder, K.L., Lee, Z.-P., Steward, R.G., Hooker, S.B., Mobley, C.D., McLean, S., Holben, B.N., Miller, M., Pietras, C., Knobelspiesse, K.D., Fargion, G.S., Porter, J., Voss, K.J., 2003. Vol 3: Radiometric Measurements and Data Analysis Protocols. *Ocean Opt. Protoc. Satell. Ocean Color Sens. Validation, Revis. 4 III*, 78.

Munier, S., Aires, F., 2018. A new global method of satellite dataset merging and quality characterization constrained by the terrestrial water budget. *Remote Sens. Environ.* 205, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.008>

Nagel, G.W., Novo, E.M.L. de M., Kampel, M., 2020. Nanosatellites applied to optical Earth observation: a review. *Rev. Ambient. e Agua* 9, 445–458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>

Nagy, L., Artaxo, P., Forsberg, B.R., 2016. Interactions between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin, 1o ed. Springer, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3->

- Ndehedehe, C.E., Ferreira, V.G., 2020. Assessing land water storage dynamics over South America. *J. Hydrol.* 580. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124339>
- Neal, J.C., Odoni, N.A., Trigg, M.A., Freer, J.E., Garcia-Pintado, J., Mason, D.C., Wood, M., Bates, P.D., 2015. Efficient incorporation of channel cross-section geometry uncertainty into regional and global scale flood inundation models. *J. Hydrol.* 529, 169–183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.026>
- Negri, A.J., Adler, R.F., Nelkin, E.J., Huffman, G.J., 1994. Regional Rainfall Climatologies Derived from Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) Data. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 75, 1165–1182. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1994\)075<1165:RRCDFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1994)075<1165:RRCDFS>2.0.CO;2)
- Negri, A.J., Anagnostou, E.N., Adler, R.F., 2000. A 10-yr climatology of amazonian rainfall derived from passive microwave satellite observations. *J. Appl. Meteorol.* 39, 42–56. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<0042:AYCOAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<0042:AYCOAR>2.0.CO;2)
- Nguyen, P., Shearer, E.J., Tran, H., Ombadi, M., Hayatbini, N., Palacios, T., Huynh, P., Braithwaite, D., Updegraff, G., Hsu, K., Kuligowski, B., Logan, W.S., Sorooshian, S., 2019. The CHRS data portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Sci. Data* 6, 1–10. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.296>
- Niroumand-Jadidi, M., Bovolo, F., Bruzzone, L., 2020. Water quality retrieval from PRISMA hyperspectral images: First experience in a turbid lake and comparison with sentinel-2. *Remote Sens.* 12, 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs12233984>
- Niu, J., Shen, C., Chambers, J.Q., Melack, J.M., Riley, W.J., 2017. Interannual Variation in Hydrologic Budgets in an Amazonian Watershed with a Coupled Subsurface–Land Surface Process Model. *J. Hydrometeorol.* 18, 2597–2617. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0108.1>
- Nobrega, I.W. da, 2002. Análise espectral de sistemas aquáticos da Amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.
- Nóbrega, R.L.B., Guzha, A.C., Torres, G.N., Kovacs, K., Lamparter, G., Amorim, R.S.S., Couto, E., Gerold, G., 2017. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. *PLoS One* 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179414>
- Norman, J.M., Kustas, W.P., Humes, K.S., 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature, *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Normandin, C., Frappart, F., Diepkil, A.T., Marieu, V., Mougou, E., Blarel, F., Lubac, B., Braquet, N., Ba, A., 2018. Evolution of the Performances of Radar Altimetry Missions from ERS-2 to Sentinel-3A over the Inner Niger Delta. *Remote Sens.* 10, 833. <https://doi.org/10.3390/rs10060833>
- Novo, E.M.L. de M., de Farias Barbosa, C.C., Freitas, R.M., Shimabukuro, Y.E., Melack, J.M., Filho, W.P., 2006. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. *Limnology* 7, 153–161. <https://doi.org/10.1007/s10201-006-0179-8>

Novo, E.M.L. de M., Shimabukuro, Y.E., 1997. Identification and mapping of the Amazon habitats using a mixing model. *Int. J. Remote Sens.* 18, 663–670. <https://doi.org/10.1080/014311697218999>

Novoa, S., Doxaran, D., Ody, A., Vanhellemont, Q., Lafon, V., Lubac, B., Gernez, P., 2017. Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels coastal waters. *Remote Sens.* 9. <https://doi.org/10.3390/rs9010061>

Numata, I., Khand, K., Kjaersgaard, J., Cochrane, M.A., Silva, S.S., 2017. Evaluation of Landsat-Based METRIC Modeling to Provide High-Spatial Resolution Evapotranspiration Estimates for Amazonian Forests. *Remote Sens.* . <https://doi.org/10.3390/rs9010046>

O'Loughlin, F.E., Paiva, R.C.D., Durand, M., Alsdorf, D.E., Bates, P.D., 2016. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sens. Environ.* 182, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.018>

Odermatt, D., Gitelson, A., Brando, V.E., Schaepman, M., 2012. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote Sens. Environ.* 118, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.013>

Oliveira, A.M., Fleischmann, A.S., Paiva, R.C.D., 2021. On the contribution of remote sensing-based calibration to model hydrological and hydraulic processes in tropical regions. *J. Hydrol.* 126184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126184>

Oliveira, P.T.S., Nearing, M.A., Moran, M.S., Goodrich, D.C., Wendland, E., Gupta, H. V., 2014. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. *Water Resour. Res.* 50, 7100–7114. <https://doi.org/10.1002/2013WR015202>

Oliveira, R., Maggioni, V., Vila, D., Morales, C., 2016. Characteristics and diurnal cycle of GPM rainfall estimates over the Central Amazon region. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8070544>

Overando, A., Martinez, J.M., Tomasella, J., Rodriguez, D.A., von Randow, C., 2018. Multi-temporal flood mapping and satellite altimetry used to evaluate the flood dynamics of the Bolivian Amazon wetlands. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 69, 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.02.013>

Overando, A., Tomasella, J., Rodriguez, D.A., Martinez, J.M., Siqueira-Junior, J.L., Pinto, G.L.N., Passy, P., Vauchel, P., Noriega, L., von Randow, C., 2016. Extreme flood events in the Bolivian Amazon wetlands. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 5, 293–308. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.004>

Overeem, A., Leijnse, H., Uijlenhoet, R., 2016. Two and a half years of country-wide rainfall maps using radio links from commercial cellular telecommunication networks. *Water Resour. Res.* 52, 8039–8065. <https://doi.org/10.1002/2016WR019412>

Overeem, A., Leijnse, H., Uijlenhoet, R., 2013. Country-wide rainfall maps from cellular communication networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 2741–2745. <https://doi.org/10.1073/pnas.1217961110>

Paca, V.H. da M., Espinoza-Dávalos, G., Moreira, D., Comair, G., 2020. Variability of Trends in Precipitation across the Amazon River Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. *Water* 12, 1244. <https://doi.org/10.3390/w12051244>

Paca, V.H. da M., Espinoza-Dávalos, G.E., Hessels, T.M., Moreira, D.M., Comair, G.F., Bastiaansen, W.G.M., 2019. The spatial variability of actual evapotranspiration across the Amazon River Basin based

on remote sensing products validated with flux towers. *Ecol. Process.* 8. <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0158-8>

Paccini, L., Espinoza, J.C., Ronchail, J., Segura, H., 2018. Intra-seasonal rainfall variability in the Amazon basin related to large-scale circulation patterns: a focus on western Amazon-Andes transition region. *Int. J. Climatol.* 38, 2386–2399. <https://doi.org/10.1002/joc.5341>

Paiva, R.C.D. de, 2020. Advances and challenges in the water sciences in Brazil: a community synthesis of the XXIII Brazilian Water Resources Symposium. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* 5. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200136>

Paiva, R.C.D. de, Buarque, D.C., Clarke, R.T., Collischonn, W., Allasia, D.G., 2011a. Reduced precipitation over large water bodies in the Brazilian Amazon shown from TRMM data. *Geophys. Res. Lett.* 38. <https://doi.org/10.1029/2010GL045277>

Paiva, R.C.D. de, Buarque, D.C., Collischonn, W., Bonnet, M.P., Frappart, F., Calmant, S., Bulhões Mendes, C.A., 2013a. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resour. Res.* 49, 1226–1243. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>

Paiva, R.C.D. de, Collischonn, W., Bonnet, M.P., De Gonçalves, L.G.G., Calmant, S., Getirana, A., Santos Da Silva, J., 2013b. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 2929–2946. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2929-2013>

Paiva, R.C.D. de, Collischonn, W., Buarque, D.C., 2013c. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon. *Hydrol. Process.* 27, 333–346. <https://doi.org/10.1002/hyp.8425>

Paiva, R.C.D. de, Collischonn, W., Tucci, C.E.M., 2011b. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *J. Hydrol.* 406, 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.007>

Pan, M., Sahoo, A.K., Troy, T.J., Vinukollu, R.K., Sheffield, J., Wood, A.E.F., 2012. Multisource estimation of long-term terrestrial water budget for major global river basins. *J. Clim.* 25, 3191–3206. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00300.1>

Pan, M., Wood, E.F., 2006. Data Assimilation for Estimating the Terrestrial Water Budget Using a Constrained Ensemble Kalman Filter. *J. Hydrometeorol.* 7, 534–547. <https://doi.org/10.1175/JHM495.1>

Panday, P.K., Coe, M.T., Macedo, M.N., Lefebvre, P., Castanho, A.D. de A., 2015. Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *J. Hydrol.* 523, 822–829. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.018>

Pangala, S.R., Enrich-Prast, A., Basso, L.S., Peixoto, R.B., Bastviken, D., Hornibrook, E.R.C., Gatti, L. V., Marotta, H., Calazans, L.S.B., Sakuragui, C.M., Bastos, W.R., Malm, O., Gloor, E., Miller, J.B., Gauci, V., 2017. Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget. *Nature* 552, 230–234. <https://doi.org/10.1038/nature24639>

Panosso, R.D.F., Muehe, D., Esteves, F.D.A., 1995. Morphological characteristics of an Amazon floodplain lake (Lake Batata, Para State, Brazil). *Amazonia* 13, 245–258.

- Paola, F. Di, Casella, D., Dietrich, S., Mugnai, A., Ricciardelli, E., Romano, F., San, P., Paola, F. Di, 2012. Combined MW-IR Precipitation Evolving Technique ( PET ) of convective rain fields 3557–3570. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3557-2012>
- Papa, F., Frappart, F., Güntner, A., Prigent, C., Aires, F., Getirana, A.C. V, Maurer, R., 2013. Surface freshwater storage and variability in the Amazon basin from multi-satellite observations, 1993–2007. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 11951–11965. <https://doi.org/10.1002/2013JD020500>
- Papa, F., Frappart, F., Malbeteau, Y., Shamsudduha, M., Vuruputur, V., Sekhar, M., Ramillien, G., Prigent, C., Aires, F., Pandey, R.K., Bala, S., Calmant, S., 2015. Satellite-derived surface and sub-surface water storage in the Ganges–Brahmaputra River Basin. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 4, 15–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.03.004>
- Papa, F., Günther, A., Frappart, F., Prigent, C., Rossow, W.B.B., Güntner, A., Frappart, F., Prigent, C., Rossow, W.B.B., 2008. Variations of surface water extent and water storage in large river basins: A comparison of different global data sources. *Geophys. Res. Lett.* 35, L11401. <https://doi.org/10.1029/2008GL033857>
- Papa, F., Prigent, C., Aires, F., Jimenez, C., Rossow, W.B., Matthews, E., 2010. Interannual variability of surface water extent at the global scale, 1993–2004. *J. Geophys. Res. Atmos.* 115. <https://doi.org/10.1029/2009JD012674>
- Paredes Trejo, F.J., Barbosa, H.A., Peñaloza-Murillo, M.A., Alejandra Moreno, M., Farías, A., 2016. Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. *Atmosfera* 29, 323–342. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.04.04>
- Paris, A., Calmant, S., Gosset, M., Fleischmann, A., Conchy, T., Bricquet, J.-P., Garambois, P.-A., Papa, F., Tshimanga, R., Gulemvuga Guzanga, G., et al., 2020. Monitoring hydrological variables from remote sensing and modelling in the Congo River basin. *Earth Sp. Sci. Open Arch.* 53. <https://doi.org/10.1002/essoar.10505518.1>
- Paris, A., Paiva, R.D. de, Silva, J.S. da, Moreira, D.M., Calmant, S., Garambois, P.-A., Collischonn, W., Bonnet, M.-P., Seyler, F., 2016. Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the Amazon basin. *Water Resour. Res.* 52, 3787–3814. <https://doi.org/10.1002/2014WR016618>.Received
- Park, E., 2020. Characterizing channel-floodplain connectivity using satellite altimetry: Mechanism, hydrogeomorphic control, and sediment budget. *Remote Sens. Environ.* 243, 111783. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111783>
- Park, E., Emadzadeh, A., Alcântara, E., Yang, X., Ho, H.L., 2020. Inferring floodplain bathymetry using inundation frequency. *J. Environ. Manage.* 273. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111138>
- Park, E., Latrubesse, E.M., 2019. A geomorphological assessment of wash-load sediment fluxes and floodplain sediment sinks along the lower Amazon River. <https://doi.org/10.1130/G45769.1>
- Park, E., Latrubesse, E.M., 2017. The hydro-geomorphologic complexity of the lower Amazon River floodplain and hydrological connectivity assessed by remote sensing and field control. *Remote Sens. Environ.* 198, 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.021>
- Park, E., Latrubesse, E.M., 2014. Modeling suspended sediment distribution patterns of the

Amazon River using MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 147, 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.013>

Parrens, M., Bitar, A. Al, Frappart, F., Paiva, R., Wongchuig, S., Papa, F., Yamasaki, D., Kerr, Y., 2019. High resolution mapping of inundation area in the Amazon basin from a combination of L-band passive microwave, optical and radar datasets. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 81, 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.011>

Parrens, M., Bitar, A. Al, Frappart, F., Papa, F., Calmant, S., Crétaux, J.F., Wigneron, J.P., Kerr, Y., 2017. Mapping dynamic water fraction under the tropical rain forests of the Amazonian basin from SMOS brightness temperatures. *Water* 9, 350. <https://doi.org/10.3390/w9050350>

Pearce, F., 2020. Weather makers. *Science* (80-. ). 368, 1302–1305. <https://doi.org/10.1126/science.368.6497.1302>

Peixoto, J.M.A., Nelson, B.W., Wittmann, F., 2009. Spatial and temporal dynamics of river channel migration and vegetation in central Amazonian white-water floodplains by remote-sensing techniques. *Remote Sens. Environ.* 113, 2258–2266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.015>

Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A.S., 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

Pellet, V., Aires, F., Yamazaki, D., 2021. Coherent Satellite Monitoring of the Water Cycle Over the Amazon. Part 2: Total Water Storage Change and River Discharge Estimation. *Water Resour. Res.* 57. <https://doi.org/10.1029/2020WR028648>

Peng, B., Shi, J., Ni-Meister, W., Zhao, T., Ji, D., 2014. Evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis (tmpa) products and their potential hydrological application at an arid and semiarid basin in china. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 7, 3915–3930. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2320756>

Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond. A. Math. Phys. Sci.* 194, 120–146. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>

Peral, E., Tanelli, S., Statham, S., Joshi, S., Imken, T., Price, D., Sauder, J., Chahat, N., Williams, A., 2019. RainCube: the first ever radar measurements from a CubeSat in space. *J. Appl. Remote Sens.* 13, 1. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.13.032504>

Pfeffer, J., Seyler, F., Bonnet, M.-P., Calmant, S., Frappart, F., Papa, F., Paiva, R.C.D., Satgé, F., Silva, J.S. Da, 2014. Low-water maps of the groundwater table in the central Amazon by satellite altimetry. *Geophys. Res. Lett.* 41, 1981–1987. <https://doi.org/10.1002/2013GL059134>

Pham-Duc, B., Papa, F., Prigent, C., Aires, F., Biancamaria, S., Frappart, F., 2019. Variations of Surface and Subsurface Water Storage in the Lower Mekong Basin (Vietnam and Cambodia) from Multisatellite Observations. *Water* 11. <https://doi.org/10.3390/w11010075>

Pham-Duc, B., Sylvestre, F., Papa, F., Frappart, F., Bouchez, C., Crétaux, J.F., 2020. The Lake Chad hydrology under current climate change. *Sci. Rep.* 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62417-w>

Phillips, O.L., Aragão, L.E.O.C., Lewis, S.L., Fisher, J.B., Lloyd, J., López-González, G., Malhi, Y.,

Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C.A., Van Der Heijden, G., Almeida, S., Amaral, I., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T.R., Bánki, O., Blanc, L., Bonal, D., Brando, P., Chave, J., De Oliveira, Á.C.A., Cardozo, N.D., Czimczik, C.I., Feldpausch, T.R., Freitas, M.A., Gloor, E., Higuchi, N., Jiménez, E., Lloyd, G., Meir, P., Mendoza, C., Morel, A., Neill, D.A., Nepstad, D., Patiño, S., Peñuela, M.C., Prieto, A., Ramírez, F., Schwarz, M., Silva, J., Silveira, M., Thomas, A.S., Steege, H. Ter, Stropp, J., Vásquez, R., Zelazowski, P., Dávila, E.A., Andelman, S., Andrade, A., Chao, K.J., Erwin, T., Di Fiore, A., Honorio, E.C., Keeling, H., Killeen, T.J., Laurance, W.F., Cruz, A.P., Pitman, N.C.A., Vargas, P.N., Ramírez-Angulo, H., Rudas, A., Salamão, R., Silva, N., Terborgh, J., Torres-Lezama, A., 2009. Drought sensitivity of the amazon rainforest. *Science* (80-. ). 323, 1344–1347. <https://doi.org/10.1126/science.1164033>

Pilotto, I.L., Rodríguez, D.A., Tomasella, J., Sampaio, G., Chou, S.C., 2015. Comparisons of the Noah-MP land surface model simulations with measurements of forest and crop sites in Amazonia. *Meteorol. Atmos. Phys.* 127, 711–723. <https://doi.org/10.1007/s00703-015-0399-8>

Pinel, S., Bonnet, M.-P., Santos Da Silva, J., Moreira, D., Calmant, S., Satgé, F., Seyler, F., 2015. Correction of Interferometric and Vegetation Biases in the SRTMGL1 Spaceborne DEM with Hydrological Conditioning towards Improved Hydrodynamics Modeling in the Amazon Basin. *Remote Sens.* 7, 16108–16130. <https://doi.org/10.3390/rs71215822>

Pinel, S., Bonnet, M., Silva, J.S. Da, Sampaio, T.C., Garnier, J., Fragoso, C.R.J., Moreira, D., Motta Marques, D.M.L., Seyler, F., 2019. Flooding dynamics within a Amazonian floodplain: Water circulation patterns and inundation duration. *Water Resour. Res.* 1–23.

Pinet, S.Y.P., Artinez, J.E.A.N.I.M., Uillon, S.Y.O., Runo, B., Artiges, L., Illar, R.A.U.L.E.S. V, 2017. Variability of apparent and inherent optical properties of sediment-laden waters in large river basins – lessons from in situ measurements and bio-optical modeling. *Opt. Express* 25, 283–310.

Pison, I., Ringeval, B., Bousquet, P., Prigent, C., Papa, F., 2013. Stable atmospheric methane in the 2000s: Key-role of emissions from natural wetlands. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 11609–11623. <https://doi.org/10.5194/acp-13-11609-2013>

Pokhrel, Y.N., Fan, Y., Miguez-Macho, G., 2014. Potential hydrologic changes in the Amazon by the end of the 21st century and the groundwater buffer. *Environ. Res. Lett.* 9, 084004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084004>

Pokhrel, Y.N., Fan, Y., Miguez-Macho, G., Yeh, P.J.F., Han, S.C., 2013. The role of groundwater in the Amazon water cycle: 3. Influence on terrestrial water storage computations and comparison with GRACE. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 3233–3244. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50335>

Pontes, P.R.M., Cavalcante, R.B.L., Sahoo, P.K., Silva Júnior, R.O. d., da Silva, M.S., Dall'Agnol, R., Siqueira, J.O., 2019. The role of protected and deforested areas in the hydrological processes of Itacaiúnas River Basin, eastern Amazonia. *J. Environ. Manage.* 235, 489–499. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.090>

Potter, C., Melack, J.M., Engle, D., 2014. Modeling methane emissions from amazon floodplain ecosystems. *Wetlands* 34, 501–511. <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0516-3>

Prabhakara, C., Short, D.A., Wiscombe, W., Fraser, R.S., Vollmer, B.E., 1986. Rainfall over Oceans Inferred from Nimbus 7 SMMR: Application to 1982–83 El Niño. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 25, 1464–1474.

Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Mon. Weather Rev.* 100, 81–92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2)

Prigent, C., 2010. Precipitation retrieval from space: An overview. *Comptes Rendus - Geosci.* 342, 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.004>

Prigent, C., Aires, F., Rossow, W.B., Robock, A., 2005. Sensitivity of satellite microwave and infrared observations to soil moisture at a global scale: Relationship of satellite observations to in situ soil moisture measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.* 110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004JD005087>

Prigent, C., Jimenez, C., Bousquet, P., 2020. Satellite-Derived Global Surface Water Extent and Dynamics Over the Last 25 Years (GIEMS-2). *J. Geophys. Res. Atmos.* 125. <https://doi.org/10.1029/2019JD030711>

Prigent, C., Lettenmaier, D.P., Aires, F., Papa, F., 2016. Toward a High-Resolution Monitoring of Continental Surface Water Extent and Dynamics, at Global Scale: from GIEMS (Global Inundation Extent from Multi-Satellites) to SWOT (Surface Water Ocean Topography). *Surv. Geophys.* 37, 339–355. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9339-x>

Prigent, C., Papa, F., Aires, F., Jimenez, C., Rossow, W.B., Matthews, E., 2012. Changes in land surface water dynamics since the 1990s and relation to population pressure. *Geophys. Res. Lett.* 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL051276>

Prigent, C., Papa, F., Aires, F., Rossow, W.B., Matthews, E., 2007. Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000. *J. Geophys. Res. Atmos.* 112. <https://doi.org/10.1029/2006JD007847>

Pujol, L., Garambois, P.-A., Finaud-Guyot, P., Monnier, J., Larnier, K., Mosé, R., Biancamaria, S., Yesou, H., Moreira, D., Paris, A., Calmant, S., 2020. Estimation of Multiple Inflows and Effective Channel by Assimilation of Multi-satellite Hydraulic Signatures: The Ungauged Anabranching Negro River. *J. Hydrol.* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125331>

Ramillien, G., Frappart, F., Gratton, S., Vasseur, X., 2015. Sequential estimation of surface water mass changes from daily satellite gravimetry data. *J. Geod.* 89, 259–282. <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0772-2>

Ramillien, G., Seoane, L., Schumacher, M., Forootan, E., Frappart, F., Darrozes, J., 2020. Recovery of rapid water mass changes (RWMC) by Kalman filtering of GRACE observations. *Remote Sens.* 12, 1299. <https://doi.org/10.3390/RS12081299>

Raney, R.K., 1998. The delay/Doppler radar altimeter. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36, 1578–1588. <https://doi.org/10.1109/36.718861>

Raymond, P.A., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., Butman, D., Striegl, R., Mayorga, E., Humborg, C., Kortelainen, P., Dürr, H., Meybeck, M., Ciais, P., Guth, P., 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503, 355–359. <https://doi.org/10.1038/nature12760>

Reichle, R.H., Liu, Q., Koster, R.D., Draper, C.S., Mahanama, S.P.P., Partyka, G.S., 2017. Land Surface Precipitation in MERRA-2. *J. Clim.* 30, 1643–1664. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0570.1>

Reis, G.G. dos, Paiva, R.C.D. de, Brêda, J.P.L.F., Medeiros, M.S., 2020. SARDIM - UMA PLATAFORMA PARA ACOMPANHAMENTO HIDROLÓGICO EM TEMPO REAL DOS RIOS DA AMÉRICA DO SUL, in: II END - Encontro Nacional de Desastres da Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre.

Reis, V., Hermoso, V., Hamilton, S.K., Bunn, S.E., Fluet-Chouinard, E., Venables, B., Linke, S., 2019. Characterizing seasonal dynamics of Amazonian wetlands for conservation and decision making. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 29, 1073–1082. <https://doi.org/10.1002/aqc.3051>

Resende, A.F. de, Schöngart, J., Streher, A.S., Ferreira-Ferreira, J., Piedade, M.T.F., Silva, T.S.F., 2019. Massive tree mortality from flood pulse disturbances in Amazonian floodplain forests: The collateral effects of hydropower production. *Sci. Total Environ.* 659, 587–598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.208>

Richey, J.E., Melack, J.M., Aufdenkampe, A.K., Ballester, V.M., Hess, L.L., 2002. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 416, 617–620. <https://doi.org/10.1038/416617a>

Richey, J.E., Mertes, L.K., Dunne, T., Victoria, R.L., Forsberg, B.R., Tancredi, A.C.N.S., Oliveira, E. de, 1989. Sources and routing of the Amazon River flood wave 3, 191–204.

Rocha, H.R., Manzi, A.O., Cabral, O.M., Miller, S.D., Goulden, M.L., Saleska, S.R., Coupe, N.R., Wofsy, S.C., Borma, L.S., Artaxo, R., Vourlitis, G., Nogueira, J.S., Cardoso, F.L., Nobre, A.D., Kruijt, B., Freitas, H.C., Von Randow, C., Aguiar, R.G., Maia, J.F., 2009. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 114, 1–8. <https://doi.org/10.1029/2007JG000640>

Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D., Toll, D., 2004. The Global Land Data Assimilation System. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 85, 381–394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>

Rodell, M., McWilliams, E.B., Famiglietti, J.S., Beaudoing, H.K., Nigro, J., 2011. Estimating evapotranspiration using an observation based terrestrial water budget. *Hydrol. Process.* 25, 4082–4092. <https://doi.org/10.1002/hyp.8369>

Rodríguez-Alvarez, N., Podest, E., Jensen, K., McDonald, K.C., 2019. Classifying inundation in a tropical wetlands complex with GNSS-R. *Remote Sens.* 11, 1053. <https://doi.org/10.3390/rs11091053>

Rodríguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 72, 249–260. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.249>

Roerink, G.J., Su, Z., Menenti, M., 2000. S-SEBI: A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance, *P&S. Chem. Earth (B)*.

Ronchail, J., Cochonneau, G., Molinier, M., Guyot, J.L., De Miranda Chaves, A.G., Guimarães, V., De Oliveira, E., 2002. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and sea-surface temperatures in the equatorial Pacific and the tropical Atlantic Oceans. *Int. J. Climatol.* 22, 1663–1686. <https://doi.org/10.1002/joc.815>

Röpke, C.P., Amadio, S., Zuanon, J., Ferreira, E.J.G., De Deus, C.P., Pires, T.H.S., Winemiller, K.O., 2017. Simultaneous abrupt shifts in hydrology and fish assemblage structure in a floodplain lake in the central Amazon. *Sci. Rep.* 7, 40170. <https://doi.org/10.1038/srep40170>

Rosenqvist, Å., Birkett, C.M., 2002. Evaluation of JERS-1 SAR mosaics for hydrological applications in the Congo river basin. *Int. J. Remote Sens.* 23, 1283–1302. <https://doi.org/10.1080/01431160110092902>

Rosenqvist, J., Rosenqvist, A., Jensen, K., McDonald, K., 2020. Mapping of maximum and minimum inundation extents in the amazon basin 2014–2017 with ALOS-2 PALSAR-2 scan SAR time-series data. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/RS12081326>

Rossetti, D.F., Gribel, R., Rennó, C.D., Cohen, M.C.L., Moulatlet, G.M., Cordeiro, C.L. de O., Rodrigues, E. do S.F., 2017. Late Holocene tectonic influence on hydrology and vegetation patterns in a northern Amazonian megafan. *Catena* 158, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.022>

Roza, M.G., Nogueira, A.C.R., Truckenbrodt, W., 2012. The anastomosing pattern and the extensively distributed scroll bars in the middle Amazon River. *Earth Surf. Process. Landforms* 37, 1471–1488. <https://doi.org/10.1002/esp.3249>

Rudorff, C.M., 2006. Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

Rudorff, C.M., Dunne, T., Melack, J.M., 2018. Recent increase of river-floodplain suspended sediment exchange in a reach of the lower Amazon River. *Earth Surf. Process. Landforms* 43, 322–332. <https://doi.org/10.1002/esp.4247>

Rudorff, C.M., Melack, J.M., Bates, P.D., 2014a. Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 2. Seasonal and interannual hydrological variability. *Water Resour. Res.* 50, 635–649. <https://doi.org/10.1002/2013WR014714>

Rudorff, C.M., Melack, J.M., Bates, P.D., 2014b. Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 1. Hydraulic controls on water elevation, inundation extent, and river-floodplain discharge. *Water Resour. Res.* 50, 619–634. <https://doi.org/10.1002/2013WR014091>

Rudorff, C.M., Novo, E.M.L.M., Galvão, L.S., 2006. Spectral Mixture Analysis of Inland Tropical Amazon Floodplain Waters Using EO-1 Hyperion, in: *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*. Denver, p. 128–133. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.38>

Rudorff, C.M., Novo, E.M.L.M., Galvão, L.S., Pereira Filho, W., 2007. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. *Acta Amaz.* 37, 269–280. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000200014>

Runde, A., Hallwass, G., Silvano, R.A.M., 2020. Fishers' Knowledge Indicates Extensive Socioecological Impacts Downstream of Proposed Dams in a Tropical River. *One Earth* 2, 255–268. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.012>

Ryu, Y., Baldocchi, D.D., Kobayashi, H., van Ingen, C., Li, J., Black, T.A., Beringer, J., van Gorsel, E., Knohl, A., Law, B.E., Rouspard, O., 2011. Integration of MODIS land and atmosphere products with

a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales. *Global Biogeochem. Cycles* 25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2011GB004053>  
Saad, S.I., Da Rocha, H.R., Silva Dias, M.A.F., Rosolem, R., 2010. Can the deforestation breeze change the rainfall in Amazonia? A case study for the BR-163 highway region. *Earth Interact.* 14. <https://doi.org/10.1175/2010EI351.1>

Saavedra, M., Junquas, C., Espinoza, J.C., Silva, Y., 2020. Impacts of topography and land use changes on the air surface temperature and precipitation over the central Peruvian Andes. *Atmos. Res.* 234, 104711. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104711>

Sahagian, D., Melack, J., 1998. *Global Wetland Distribution and Functional Characterization: Trace Gases and the Hydrologic Cycle*, Royal Swedish Academy of Sciences. Stockholm, Sweden.

Sahoo, A.K., Pan, M., Troy, T.J., Vinukollu, R.K., Sheffield, J., Wood, E.F., 2011. Reconciling the global terrestrial water budget using satellite remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 115, 1850–1865. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.009>

Salameh, E., Frappart, F., Almar, R., Baptista, P., Heygster, G., Lubac, B., Raucoules, D., Almeida, L.P., Bergsma, E.W.J., Capo, S., De Michele, M.D., Idier, D., Li, Z., Marieu, V., Poupardin, A., Silva, P.A., Turki, I., Laignel, B., 2019. Monitoring Beach Topography and Nearshore Bathymetry Using Spaceborne Remote Sensing: A Review. *Remote Sens.* 11. <https://doi.org/10.3390/rs11192212>

Salati, E., Dall'Olio, A., Matsui, E., Gat, J.R., 1979. Recycling of water in the Amazon Basin: An isotopic study. *Water Resour. Res.* 15.

Salati, E., Nobre, C.A., 1991. Possible climatic impacts of tropical deforestation. *Clim. Change* 19, 177–196. <https://doi.org/10.1007/BF00142225>

Salati, E., Vose, P.B., 1984. Amazon Basin: A system in equilibrium. *Science* (80- ). 225, 129–138. <https://doi.org/10.1126/science.225.4658.129>

Saleska, S.R., da Rocha, H.R., Huete, A.R., Nobre, A.D., Artaxo, P.E., Shimabukuro, Y.E., 2013. LBA-ECO CD-32 Flux Tower Network Data Compilation, Brazilian Amazon: 1999-2006. Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1174>

Santos, M.J., Medvigy, D., Silva Dias, M.A.F., Freitas, E.D., Kim, H., 2019. Seasonal Flooding Causes Intensification of the River Breeze in the Central Amazon. *J. Geophys. Res. Atmos.* 124, 5178–5197. <https://doi.org/10.1029/2018JD029439>

Satgé, F., Bonnet, M.P., Gosset, M., Molina, J., Hernan Yuque Lima, W., Pillco Zolá, R., Timouk, F., Garnier, J., 2016. Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau. *Atmos. Res.* 167, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.012>

Satgé, F., Xavier, A., Zolá, R.P., Hussain, Y., Timouk, F., Garnier, J., Bonnet, M.P., 2017. Comparative assessments of the latest GPM mission's spatially enhanced satellite rainfall products over the main bolivian watersheds. *Remote Sens.* 9, 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs9040369>

Satyamurty, P., da Costa, C.P.W., Manzi, A.O., 2013a. Moisture source for the Amazon Basin: A study of contrasting years. *Theor. Appl. Climatol.* 111, 195–209. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0637-7>

Satyamurty, P., da Costa, C.P.W., Manzi, A.O., Candido, L.A., 2013b. A quick look at the 2012 record

flood in the Amazon Basin. *Geophys. Res. Lett.* 40, 1396–1401. <https://doi.org/10.1002/grl.50245>

Schmitt, R.J.P., Bizzi, S., Castelletti, A., Opperman, J.J., Kondolf, G.M., 2019. Planning dam portfolios for low sediment trapping shows limits for sustainable hydropower in the Mekong. *Sci. Adv.* 5. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2175>

Schöngart, J., Wittmann, F., Resende, A.F. de, Assahira, C., Lobo, G. de S., Neves, J.R.D., Rocha, M., Mori, G.B., Quaresma, A.C., Demarchi, L.O., Albuquerque, B.W., Feitosa, Y.O., Costa, G. da S., Feitoza, G.V., Durgante, F.M., Lopes, A., Trumbore, S.E., Silva, T.S.F., Steege, H. ter, Val, A.L., Steege, H. ter, Junk, W.J., Piedade, M.T.F., 2021. The shadow of the Balbina dam : A synthesis of over 35 years of downstream impacts on floodplain forests in Central Amazonia. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 1–19. <https://doi.org/10.1002/aqc.3526>

Schroeder, R., McDonald, K.C., Chapman, B.D., Jensen, K., Podest, E., Tessler, Z.D., Bohn, T.J., Zimmermann, R., 2015. Development and evaluation of a multi-year fractional surface water data set derived from active/passive microwave remote sensing data. *Remote Sens.* 7, 16688–16732. <https://doi.org/10.3390/rs71215843>

Schumann, G., Bates, P.D., Horritt, M.S., Matgen, P., Pappenberger, F., 2009. Progress in Integration of Remote Sensing-Derived Flood Extent and Stage Data and Hydraulic Models. *Rev. Geophys.* 47, 1–20. <https://doi.org/10.1029/2008rg000274>

Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., Seitz, F., 2015. DAHITI - An innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 4345–4364. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4345-2015>

Sena, J.A., de Deus, L.A.B., Freitas, M.A. V., Costa, L., 2012. Extreme Events of Droughts and Floods in Amazonia: 2005 and 2009. *Water Resour. Manag.* 26, 1665–1676. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-9978-3>

Senay, G.B., Bohms, S., Singh, R.K., Gowda, P.H., Velpuri, N.M., Alemu, H., Verdin, J.P., 2013. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 49, 577–591. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jawr.12057>

Senay, G.B., Kagone, S., Velpuri, N.M., 2020. Operational Global Actual Evapotranspiration: Development, Evaluation, and Dissemination. *Sensors* . <https://doi.org/10.3390/s20071915>

Seyler, F., Calmant, S., Silva, J.S. Da, Moreira, D.M., Mercier, F., Shum, C.K., 2013. From TOPEX/Poseidon to Jason-2/OSTM in the amazon basin. *Adv. Sp. Res.* 51, 1542–1550. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.11.002>

Sheffield, J., Wood, E.F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., Verbist, K., 2018. Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions. *Water Resour. Res.* <https://doi.org/10.1029/2017WR022437>

Shi, J., Dong, X., Zhao, T., Du, Y., Liu, H., Wang, Z., Zhu, D., Ji, D., Xiong, C., Jiang, L., 2016. The water cycle observation mission (WCOM): Overview, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 3430–3433. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729886>

Shuttleworth, W.J., 2012. Terrestrial Hydrometeorology, Terrestrial Hydrometeorology. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119951933>

Silva, H.J.F.da, Gonçalves, W.A., Bezerra, B.G., 2019. Comparative analyzes and use of evapotranspiration obtained through remote sensing to identify deforested areas in the Amazon. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 78, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.015>

Silva, J.S. Da, Calmant, S., Seyler, F., Moreira, D.M., Oliveira, D., Monteiro, A., 2014. Radar altimetry aids managing gauge networks. *Water Resour. Manag.* 28, 587–603. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0484-z>

Silva, J.S. Da, Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O.C., Cochonneau, G., Mansur, W.J., 2010. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sens. Environ.* 114, 2160–2181. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.020>

Silva, J.S. Da, Seyler, F., Calmant, S., Filho, O.C.R., Roux, E., Araújo, A.A.M., Guyot, J.L., 2012. Water level dynamics of Amazon wetlands at the watershed scale by satellite altimetry. *Int. J. Remote Sens.* 33, 3323–3353. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.531914>

Silva, M.P. da, Sander de Carvalho, L., Novo, E., Jorge, D., Barbosa, C., 2019. Use of absorption optical indices to assess seasonal variability of dissolved organic matter in amazon floodplain lakes. *Biogeosciences Discuss.* 1–20. <https://doi.org/10.5194/bg-2019-324>

Silva Dias, M.A.F., Silva Dias, P.L., Longo, M., Fitzjarrald, D.R., Denning, A.S., 2004. River breeze circulation in eastern Amazonia: Observations and modelling results. *Theor. Appl. Climatol.* 78, 111–121. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0047-6>

Silva Junior, C.H.L., Almeida, C.T., Santos, J.R.N., Anderson, L.O., Aragão, L.E.O.C., Silva, F.B., 2018. Spatiotemporal rainfall trends in the Brazilian legal Amazon between the years 1998 and 2015. *Water* 10, 1220. <https://doi.org/10.3390/w10091220>

Silva, M.V., Paris, A., Calmant, S., Cândido, L.A., Silva, J.S., 2019. Associação do regime hidrológico do rio xingu com oceanos adjacentes em eventos extremos utilizando dados altimétricos. *Brazilian J. Dev.* 5. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-339>

Silva, T.S.F., Costa, M.P.F., Melack, J.M., 2010. Spatial and temporal variability of macrophyte cover and productivity in the eastern Amazon floodplain: A remote sensing approach. *Remote Sens. Environ.* 114, 1998–2010. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.007>

Silva, T.S.F., Melack, J.M., Novo, E.M.L.M.L.M., 2013. Responses of aquatic macrophyte cover and productivity to flooding variability on the Amazon floodplain. *Glob. Chang. Biol.* 19, 3379–3389. <https://doi.org/10.1111/gcb.12308>

Silvério, D. V., Brando, P.M., Macedo, M.N., Beck, P.S.A., Bustamante, M., Coe, M.T., 2015. Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: The overlooked non-GHG forcing. *Environ. Res. Lett.* 10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/10/104015>

Sioli, H., 1956. Über natur und mensch im brasilianischen Amazonasgebiet. *Erdkunde* 89–109. <https://doi.org/http://www.jstor.org/stable/23218158>

Sippel, S.J., Hamilton, S.K., Melack, J., 1992. Inundation area and morphometry of lakes on the Amazon

River floodplain, Brazil. *Arch. für Hydrobiol.* 123, 385–400.

Sippel, S.J., Hamilton, S.K., Melack, J.M., Choudhury, B.J., 1994. Determination of inundation area in the Amazon River floodplain using the SMMR 37 GHz polarization difference. *Remote Sens. Environ.* 48, 70–76. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90115-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90115-5)

Sippel, S.J., Hamilton, S.K., Melack, J.M., Novo, E.M.M., 1998. Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon River floodplain. *Int. J. Remote Sens.* 19, 3055–3074. <https://doi.org/10.1080/014311698214181>

Siqueira, V.A., Paiva, R.C.D., Fleischmann, A.S., Fan, F.M., Ruhoff, A.L., Pontes, P.R.M., Paris, A., Calmant, S., Collischonn, W., 2018. Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 4815–4842. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>

Sörensson, A.A., Ruscica, R.C., 2018. Intercomparison and Uncertainty Assessment of Nine Evapotranspiration Estimates Over South America. *Water Resour. Res.* 54, 2891–2908. <https://doi.org/10.1002/2017WR021682>

Sorooshian, S., Gao, X., Hsu, K., Maddox, R.A., Hong, Y., Gupta, H. V., Imam, B., 2002. Diurnal variability of tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRMM satellite information. *J. Clim.* 15, 983–1001. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0983:DVOTRR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0983:DVOTRR>2.0.CO;2)

Sorooshian, S., Hsu, K.L., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., Braithwaite, D., 2000. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81, 2035–2046. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<2035:EOPSS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<2035:EOPSS>2.3.CO;2)

Sorribas, M.V., de Paiva, R.C.D., Fleischmann, A.S., Collischonn, W., 2020. Hydrological Tracking Model for Amazon Surface Waters, *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2019WR024721>

Sorribas, M.V., Paiva, R.C.D., Melack, J.M., Bravo, J.M., Jones, C., Carvalho, L., Beighley, E., Forsberg, B., Costa, M.H., 2016. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Clim. Change* 136, 555–570. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>

Souza, C.M., Kirchoff, F.T., Oliveira, B.C., Ribeiro, J.G., Sales, M.H., 2019. Long-term annual surface water change in the Brazilian Amazon Biome: Potential links with deforestation, infrastructure development and climate change. *Water (Switzerland)* 11, 566. <https://doi.org/10.3390/w11030566>

Spera, S.A., Cohn, A.S., Vanwey, L.K., Mustard, J.F., Rudorff, B.F., Risso, J., Adami, M., 2014. Recent cropping frequency, expansion, and abandonment in Mato Grosso, Brazil had selective land characteristics. *Environ. Res. Lett.* 9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064010>

Spera, S.A., Galford, G.L., Coe, M.T., Macedo, M.N., Mustard, J.F., 2016. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. *Glob. Chang. Biol.* 22, 3405–3413. <https://doi.org/10.1111/gcb.13298>

Staal, A., Flores, B.M., Aguiar, A.P.D., Bosmans, J.H.C., Fetzer, I., Tuinenburg, O.A., 2020. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environ. Res. Lett.* 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>

Staal, A., Tuinenburg, O.A., Bosmans, J.H.C., Holmgren, M., Van Nes, E.H., Scheffer, M., Zemp,

D.C., Dekker, S.C., 2018. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nat. Clim. Chang.* 8, 539–543. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>

Stammer, D., Cazenave, A., 2017. Satellite altimetry over oceans and land surfaces, *Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315151779>

Stickler, C.M., Coe, M.T., Costa, M.H., Nepstad, D.C., McGrath, D.G., Dias, L.C.P., Rodrigues, H.O., Soares-Filho, B.S., 2013. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 9601–9606. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>

Su, Z., Schmugge, T., Kustas, W.P., Massman, W.J., 2001. An evaluation of two models for estimation of the roughness height for heat transfer between the land surface and the atmosphere. *J. Appl. Meteorol.* 40, 1933–1951. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1933:AEOTMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1933:AEOTMF>2.0.CO;2)

Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., Hsu, K., 2018. A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Rev. Geophys.* 56, 79–107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>

Sutanudjaja, E.H., van Beek, R., Wanders, N., Wada, Y., Bosmans, J.H.C., Drost, N., van der Ent, R.J., de Graaf, I.E.M., Hoch, J.M., de Jong, K., Karssenber, D., López López, P., Peßenteiner, S., Schmitz, O., Straatsma, M.W., Vannamete, E., Wissler, D., Bierkens, M.F.P., 2018. PCR-GLOBWB 2: a 5arcmin global hydrological and water resources model. *Geosci. Model Dev.* 11, 2429–2453. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2429-2018>

Swann, A.L.S., Koven, C.D., 2017. A Direct Estimate of the Seasonal Cycle of Evapotranspiration over the Amazon Basin. *J. Hydrometeorol.* 18, 2173–2185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0004.1>

Sylvester, Z., Durkin, P., Covault, J.A., 2019. High curvatures drive river meandering. *Geology* 47, 263–266. <https://doi.org/10.1130/G45608.1>

Talsma, C.J., Good, S.P., Jimenez, C., Martens, B., Fisher, J.B., Miralles, D.G., McCabe, M.F., Purdy, A.J., 2018. Partitioning of evapotranspiration in remote sensing-based models. *Agric. For. Meteorol.* 260–261, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.010>

Tan, J., Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., 2019. IMERG V06: Changes to the morphing algorithm. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 36, 2471–2482. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0114.1>

Tang, R., Li, Z.L., Jia, Y., Li, C., Chen, K.S., Sun, X., Lou, J., 2013. Evaluating one- and two-source energy balance models in estimating surface evapotranspiration from Landsat-derived surface temperature and field measurements. *Int. J. Remote Sens.* 34, 3299–3313. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716529>

Tapiador, F.J., Kidd, C., Levizzani, V., Marzano, F.S., 2004. A neural networks-based fusion technique to estimate half-hourly rainfall estimates at 0.1° resolution from satellite passive microwave and infrared data. *J. Appl. Meteorol.* 43, 576–594. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0576:ANNFTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0576:ANNFTT>2.0.CO;2)

Tapiador, F.J., Navarro, A., Levizzani, V., García-Ortega, E., Huffman, G.J., Kidd, C., Kucera, P.A., Kummerow, C.D., Masunaga, H., Petersen, W.A., Roca, R., Sánchez, J.L., Tao, W.K., Turk, F.J., 2017.

Global precipitation measurements for validating climate models. *Atmos. Res.* 197, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.021>

Tapley, B.D., Bettadpur, S., Ries, J.C., Thompson, P.F., Watkins, M.M., 2004. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science* (80- ). 305, 503–505. <https://doi.org/10.1126/science.1099192>

Tapley, B.D., Watkins, M.M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., Sasgen, I., Famiglietti, J.S., Landerer, F.W., Chambers, D.P., Reager, J.T., Gardner, A.S., Save, H., Ivins, E.R., Swenson, S.C., Boening, C., Dahle, C., Wiese, D.N., Dobslaw, H., Tamisiea, M.E., Velicogna, I., 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nat. Clim. Chang.* <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>

Tarpanelli, A., Barbetta, S., Brocca, L., Moramarco, T., 2013. River Discharge Estimation by Using Altimetry Data and Simplified Flood Routing Modeling 4145–4162. <https://doi.org/10.3390/rs5094145>

Taylor, C.M., Prigent, C., Dadson, S.J., 2018. Mesoscale rainfall patterns observed around wetlands in sub-Saharan Africa. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 144, 2118–2132. <https://doi.org/10.1002/qj.3311>

Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., De Roo, A., 2013. Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. *J. Hydrol.* 499, 324–338. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.012>

Thom, G., Xue, A.T., Sawakuchi, A.O., Ribas, C.C., Hickerson, M.J., Aleixo, A., Miyaki, C., 2020. Quaternary climate changes as speciation drivers in the Amazon floodplains. *Sci. Adv.* 6. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax4718>

Thomaz, S.M., Bini, L.M., Bozelli, R.L., 2007. Floods increase similarity among aquatic habitats in river-floodplain systems. *Hydrobiologia* 579, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0285-y>

Topp, S.N., Pavelsky, T.M., Jensen, D., Simard, M., Ross, M.R.V., 2020. Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: Moving towards multidisciplinary applications. *Water (Switzerland)* 12, 1–34. <https://doi.org/10.3390/w12010169>

Toté, C., Patricio, D., Boogaard, H., van der Wijngaart, R., Tarnavsky, E., Funk, C., 2015. Evaluation of satellite rainfall estimates for drought and flood monitoring in Mozambique. *Remote Sens.* 7, 1758–1776. <https://doi.org/10.3390/rs70201758>

Tourian, M.J., Reager, J.T., Sneeuw, N., 2018. The Total Drainable Water Storage of the Amazon River Basin: A First Estimate Using GRACE. *Water Resour. Res.* 54, 1–27. <https://doi.org/10.1029/2017WR021674>

Towner, J., Cloke, H.L., Zsoter, E., Flamig, Z., Hoch, J.M., Bazo, J., De Perez, E.C., Stephens, E.M., 2019. Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flows in the Amazon basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/hess-23-3057-2019>

Trenberth, K.E., 2011. Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.* 47, 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>

Trigg, M.A., Bates, P.D., Wilson, M.D., Schumann, G., Baugh, C., 2012. Floodplain channel morphology and networks of the middle Amazon River. *Water Resour. Res.* 48, 1–17. <https://doi.org/10.1029/2011WR011674>

Trigg, M.A., Wilson, M.D., Bates, P.D., Horritt, M.S., Alsdorf, D.E., Forsberg, B.R., Vega, M.C., 2009. Amazon flood wave hydraulics. *J. Hydrol.* 374, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.004>

Turk, F.J., Rohaly, G.D., Jeff, H., Smith, E.A., Marzano, F.S., Mugnai, A., Levizzani, V., 2000. Meteorological applications of precipitation estimation from combined SSM/I, TRMM and infrared geostationary. *Microw. Radiom. Remote Sens. Earth's Surf. Atmos.* 353.

Ushio, T., Sasashige, K., Kubota, T., Shige, S., Okamoto, K., Aonashi, K., Inoue, T., Takahashi, N., Iguchi, T., Kachi, M., Oki, R., Morimoto, T., Kawasaki, Z.I., 2009. A kalman filter approach to the global satellite mapping of precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *J. Meteorol. Soc. Japan* 87 A, 137–151. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87A.137>

Valerio, A. de M., Kampel, M., Vantrepotte, V., Ward, N.D., Sawakuchi, H.O., Less, D.F.D.S., Neu, V., Cunha, A., Richey, J., 2018. Using CDOM optical properties for estimating DOC concentrations and pCO<sub>2</sub> in the Lower Amazon River. *Opt. Express* 26, A657. <https://doi.org/10.1364/oe.26.00a657>

Van Der Ent, R.J., Savenije, H.H.G., Schaefli, B., Steele-Dunne, S.C., 2010. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resour. Res.* 46, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2010WR009127>

Van Dijk, A.I.J.M., Renzullo, L.J., 2011. Water resource monitoring systems and the role of satellite observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 39–55. <https://doi.org/10.5194/hess-15-39-2011>

van het Schip, T.I., Overeem, A., Leijnse, H., Uijlenhoet, R., Meirink, J.F., van Delden, A.J., 2017. Rainfall measurement using cell phone links: classification of wet and dry periods using geostationary satellites. *Hydrol. Sci. J.* 62, 1343–1353. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1329588>

Van Huijgevoort, M.H.J., Hazenberg, P., Van Lanen, H.A.J., Teuling, A.J., Clark, D.B., Folwell, S., Gosling, S.N., Hanasaki, N., Heinke, J., Koiraal, S., Stacke, T., Voss, F., Sheffield, J., Uijlenhoet, R., 2013. Global multimodel analysis of drought in runoff for the second half of the twentieth century. *J. Hydrometeorol.* 14, 1535–1552. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0186.1>

Venticinque, E., Forsberg, B., Barthem, R., Petry, P., Hess, L., Mercado, A., Cañas, C., Montoya, M., Durigan, C., Goulding, M., 2016. An explicit GIS-based river basin framework for aquatic ecosystem conservation in the Amazon. *Earth Syst. Sci. Data* 8, 651–661. <https://doi.org/10.5194/essd-8-651-2016>

Vera, C.S., Alvarez, M.S., Gonzalez, P.L.M., Liebmann, B., Kiladis, G.N., 2018. Seasonal cycle of precipitation variability in South America on intraseasonal timescales. *Clim. Dyn.* 51, 1991–2001. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3994-1>

Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L.E., Villalba, R., Pitte, P., Masiokas, M., Rivera, J., Zalazar, L., 2019. Contrasting climates at both sides of the Andes in Argentina and Chile. *Front. Environ. Sci.* 7, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00069>

Vicente, G.A., Scofield, R.A., Menzel, W.P., 1998. The Operational GOES Infrared Rainfall Estimation Technique. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79, 1883–1893. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<1883:togire>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<1883:togire>2.0.co;2)

Villar, R.E., Martinez, J.M., Armijos, E., Espinoza, J.C., Filizola, N., Dos Santos, A., Willems, B., Fraizy,

P., Santini, W., Vauchel, P., 2018. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). *Comptes Rendus - Geosci.* 350, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.05.001>

Villar, R.E., Martinez, J.M., Le Texier, M., Guyot, J.L., Fraizy, P., Meneses, P.R., Oliveira, E. de, 2013. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *J. South Am. Earth Sci.* 44, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.006>

Virji, H., 1981. A Preliminary Study of Summertime Tropospheric Circulation Patterns over South America Estimated from Cloud Winds. *Mon. Weather Rev.* 109, 599–610. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0599:APSOST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0599:APSOST>2.0.CO;2)

von Randow, C., Manzi, A.O., Kruijt, B., de Oliveira, P.J., Zanchi, F.B., Silva, R.L., Hodnett, M.G., Gash, J.H.C., Elbers, J.A., Waterloo, M.J., Cardoso, F.L., Kabat, P., 2004. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theor. Appl. Climatol.* 78, 5–26. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0041-z>

von Randow, R. de C.S., Tomasella, J., von Randow, C., de Araújo, A.C., Manzi, A.O., Hutjes, R., Kruijt, B., 2020. Evapotranspiration and gross primary productivity of secondary vegetation in Amazonia inferred by eddy covariance. *Agric. For. Meteorol.* 294. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108141>

Vörösmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J., Lammers, R.B., 2000. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science* (80-. ). 289, 284–288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>

Vörösmarty, C.J., Moore, B., Grace, A.L., Gildea, M.P., Melillo, J.M., Peterson, B.J., Rastetter, E.B., Steudler, P.A., 1989. Continental scale models of water balance and fluvial transport: An application to South America. *Global Biogeochem. Cycles* 3, 241–265. <https://doi.org/10.1029/GB003i003p00241>

Walcker, R., Corenblit, D., Julien, F., Martinez, J.M., Steiger, J., 2021. Contribution of meandering rivers to natural carbon fluxes: Evidence from the Ucayali River, Peruvian Amazonia. *Sci. Total Environ.* 776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146056>

Wanders, N., Bierkens, M.F.P., de Jong, S.M., de Roo, A., Karssenberg, D., 2014. The benefits of using remotely sensed soil moisture in parameter identification of large-scale hydrological models. *Water Resour. Res.* 50, 6874–6891. <https://doi.org/10.1002/2013WR014639>

Wang, C., Li, Z., Zhu, J., Yi, H., Xie, Q., 2011. Flooded forest water level changes in Amazon measured with ALOS PALSAR polarimetric interferometric SAR data. *J. Comput. Inf. Syst.* 7, 2922–2930.

Wang, G., Cao, X., Cai, X., Sun, J., Li, X., Wang, H., 2018. A new data assimilation method for high-dimensional models. *PLoS One* 13, 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191714>

Wang, X.Y., Li, X., Zhu, J., Tanajura, C.A.S., 2018. The strengthening of Amazonian precipitation during the wet season driven by tropical sea surface temperature forcing. *Environ. Res. Lett.* 13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aadbb9>

Ward, J. V., Tockner, K., Arcott, D.B., Claret, C., 2002. Riverine landscape diversity. *Freshw. Biol.* 47, 517–539. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00893.x>

Werdell, P.J., Behrenfeld, M.J., Bontempi, P.S., Boss, E., Cairns, B., Davis, G.T., Franz, B.A., Gliese, U.B.,

- Gorman, E.T., Hasekamp, O., Knobelspiesse, K.D., Mannino, A., Martins, J.V., McClain, C., Meister, G., Remer, L.A., 2019. The plankton, aerosol, cloud, ocean ecosystem mission status, science, advances. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 100, 1775–1794. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0056.1>
- Werdell, P.J., McKinna, L.I.W., Boss, E., Ackleson, S.G., Craig, S.E., Gregg, W.W., Lee, Z.-P., Maritorena, S., Roesler, C.S., Rousseaux, C.S., Stramski, D., Sullivan, J.M., Twardowski, M.S., Tzortziou, M., Zhang, X., 2018. An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing. *Prog. Oceanogr.* 160, 186–212. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.01.001>
- Wilson, M.D., Bates, P., Alsdorf, D., Forsberg, B., Horritt, M., Melack, J., Frappart, F., Famiglietti, J., 2007. Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands. *Geophys. Res. Lett.* 34, 4–9. <https://doi.org/10.1029/2007GL030156>
- Wilson, M.D., Durand, M., Jung, H.C., Alsdorf, D., 2015. Swath-altimetry measurements of the main stem Amazon River : 1943–1959. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1943-2015>
- Winemiller, K.O., McIntyre, P.B., Castello, L., Fluet-Chouinard, E., Giarrizzo, T., Nam, S., Baird, I.G., Darwall, W., Lujan, N.K., Harrison, I., Stiassny, M.L.J., Silvano, R.A.M., Fitzgerald, D.B., Pelicice, F.M., Agostinho, A.A., Gomes, L.C., Albert, J.S., Baran, E., Petrere, M., Zarfl, C., Mulligan, M., Sullivan, J.P., Arantes, C.C., Sousa, L.M., Koning, A.A., Hoeninghaus, D.J., Sabaj, M., Lundberg, J.G., Armbruster, J., Thieme, M.L., Petry, P., Zuanon, J., Vilara, G.T., Snoeks, J., Ou, C., Rainboth, W., Pavanelli, C.S., Akama, A., Soesbergen, A. van, Sáenz, L., 2016. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science* (80-. ). 351, 128–129. <https://doi.org/10.1126/science.aac7082>
- Wittmann, F., Anhof, D., Funk, W.J., 2002. Tree species distribution and community structure of central Amazonian várzea forests by remote-sensing techniques. *J. Trop. Ecol.* 18, 805–820. <https://doi.org/10.1017/S0266467402002523>
- Wongchuig, S.C., de Paiva, R.C.D., Siqueira, V., Collischonn, W., 2019. Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin. *J. Hydrol.* 570, 755–773. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.025>
- Wongchuig, S.C., Paiva, R.C.D. de, Biancamaria, S., Collischonn, W., 2020. Assimilation of future SWOT-based river elevations, surface extent observations and discharge estimations into uncertain global hydrological models. *J. Hydrol.* 590. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125473>
- Wood, E.F., Roundy, J.K., Troy, T.J., Van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., Blyth, E., De Roo, A., Doll, P., Ek, M., Famiglietti, J., Gochis, D., Van De Giesen, N., Houser, P., Jaffe, P.R., Kollet, S., Lehner, B., Lettenmaier, D.P., Peters-Lidard, C., Sivapalan, M., Sheffield, J., Wade, A., Whitehead, P., 2011. Hyperresolution global land surface modeling: meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water. *Water Resour. Res.* 47, 1–10. <https://doi.org/10.1029/2010WR010090>
- Wright, J.S., Fu, R., Worden, J.R., Chakraborty, S., Clinton, N.E., Risi, C., Sun, Y., Yin, L., 2017. Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114, 8481–8486. <https://doi.org/10.1073/pnas.1621516114>
- Wu, J., Lakshmi, V., Wang, D., Lin, P., Pan, M., Cai, X., Wood, E.F., Zeng, Z., 2020. The reliability of global remote sensing evapotranspiration products over Amazon. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/rs12142211>

- Xavier, L., Becker, M., Cazenave, A., Longuevergne, L., Llovel, W., Filho, O.C.R., 2010. Interannual variability in water storage over 2003–2008 in the Amazon Basin from GRACE space gravimetry, in situ river level and precipitation data. *Remote Sens. Environ.* 114, 1629–1637. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.005>
- Xie, P., Adler, R.F., Huffman, G.J., Bolvin, D., 2011. Global Precipitation Climatology Project (GPCP) - Pentad, Version 2.2. NOAA Natl. Clim. Data Cent.
- Xie, P., Janowiak, J.E., Arkin, P.A., Adler, R., Gruber, A., Ferraro, R., Huffman, G.J., Curtis, S., 2003. GPCP pentad precipitation analyses: An experimental dataset based on gauge observations and satellite estimates. *J. Clim.* 16, 2197–2214. <https://doi.org/10.1175/2769.1>
- Xie, P., Joyce, R., Wu, S., Yoo, S.H., Yarosh, Y., Sun, F., Lin, R., 2017. Reprocessed, bias-corrected CMORPH global high-resolution precipitation estimates from 1998. *J. Hydrometeorol.* 18, 1617–1641. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0168.1>
- Xu, X., Jia, G., Zhang, X., Riley, W.J., Xue, Y., 2020. Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 26, 5874–5885. <https://doi.org/10.1111/gcb.15279>
- Yamazaki, D., Baugh, C.A., Bates, P.D., Kanae, S., Alsdorf, D.E., Oki, T., 2012a. Adjustment of a spaceborne DEM for use in floodplain hydrodynamic modeling. *J. Hydrol.* 436–437, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.045>
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, P.D., Allen, G.H., Pavelsky, T.M., 2019. MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. *Water Resour. Res.* 55, 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O’Loughlin, F., Neal, J.C., Sampson, C.C., Kanae, S., Bates, P.D., 2017. A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.* 44, 5844–5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>
- Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H., Oki, T., 2011. A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. *Water Resour. Res.* 47. <https://doi.org/10.1029/2010WR009726>
- Yamazaki, D., Lee, H., Alsdorf, D.E., Dutra, E., Kim, H., Kanae, S., Oki, T., 2012b. Analysis of the water level dynamics simulated by a global river model: A case study in the Amazon River. *Water Resour. Res.* 48, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2012WR011869>
- Yamazaki, D., O’Loughlin, F., Trigg, M.A., Miller, Z.F., Pavelsky, T.M., Bates, P.D., 2014. Development of the Global Width Database for Large Rivers. *Water Resour. Res.* 50, 3467–3480. <https://doi.org/10.1002/2013WR014664>
- Yamazaki, D., Trigg, M.A., Ikeshima, D., 2015. Development of a global ~90m water body map using multi-temporal Landsat images. *Remote Sens. Environ.* 171, 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.014>
- Yang, Z., Dominguez, F., 2019. Investigating land surface effects on the moisture transport over South America with a moisture tagging model. *J. Clim.* 32, 6627–6644. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0700.1>

Yepez, S., Laraque, A., Martinez, J.M., Sa, J. De, Manuel, J., Castellanos, B., Gally, M., Lopez, J.L., De Sa, J., Carrera, J.M., Castellanos, B., Gally, M., Lopez, J.L., Sa, J. De, Manuel, J., Castellanos, B., Gally, M., Lopez, J.L., De Sa, J., Carrera, J.M., Castellanos, B., Gally, M., Lopez, J.L., 2018. Retrieval of suspended sediment concentrations using Landsat-8 OLI satellite images in the Orinoco River (Venezuela). *Comptes Rendus - Geosci.* 350, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.08.004>

Yilmaz, K.K., Hogue, T.S., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Gupta, H. V., Wagener, T., 2005. Intercomparison of rain gauge, radar, and satellite-based precipitation estimates with emphasis on hydrologic forecasting. *J. Hydrometeorol.* 6, 497–517. <https://doi.org/10.1175/JHM431.1>

Yuan, T., Lee, H., Jung, H.C., 2015. Toward Estimating Wetland Water Level Changes Based on Hydrological Sensitivity Analysis of PALSAR Backscattering Coefficients over Different Vegetation Fields. *Remote Sens.* . <https://doi.org/10.3390/rs70303153>

Yuan, T., Lee, H., Jung, H.C., Aierken, A., Beighley, E., Alsdorf, D.E., Tshimanga, R.M., Kim, D., 2017. Absolute water storages in the Congo River floodplains from integration of InSAR and satellite radar altimetry. *Remote Sens. Environ.* 201, 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.003>

Yuan, T., Lee, H., Yu, H., Jung, H.C., Madson, A., Sheng, Y., Beighley, E., 2019. Mapping forested floodplain topography using insar and radar altimetry. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 12, 5189–5198. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2956400>

Zakharova, E.A., Kouraev, A. V., Cazenave, A., Seyler, F., 2006. Amazon River discharge estimated from TOPEX/Poseidon altimetry. *Comptes Rendus - Geosci.* 338, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.10.003>

Zemp, D.C., Schleussner, C.F., Barbosa, H.M.J., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., Wang-Erlandsson, L., Rammig, A., 2017. Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nat. Commun.* 8. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>

Zemp, D.C., Schleussner, C.F., Barbosa, H.M.J., Van Der Ent, R.J., Donges, J.F., Heinke, J., Sampaio, G., Rammig, A., 2014. On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 13337–13359. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13337-2014>

Zeng, N., Yoon, J.H., Marengo, J.A., Subramaniam, A., Nobre, C.A., Mariotti, A., Neelin, J.D., 2008. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environ. Res. Lett.* 3, 014002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/1/014002>

Zhang, K., Kimball, J.S., Running, S.W., 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdiscip. Rev. Water.* <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>

Zhang, K., Zhu, G., Ma, J., Yang, Y., Shang, S., Gu, C., 2019. Parameter Analysis and Estimates for the MODIS Evapotranspiration Algorithm and Multiscale Verification. *Water Resour. Res.* 55, 2211–2231. <https://doi.org/10.1029/2018WR023485>

Zhang, M., Lee, H., SHUM, C.K., Alsdorf, D., Schwartz, F., Tseng, K.-H., Yi, Y., Kuo, C.-Y., Tseng, H.-Z., Braun, A., Calmant, S., Filizola, N., Seyler, F., 2010. Application of retracked satellite altimetry for inland hydrologic studies. *Int. J. Remote Sens.* 31, 3913–3929. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.483495>

Zhang, Y., Pan, M., Sheffield, J., Siemann, A.L., Fisher, C.K., Liang, M., Beck, H.E., Wanders, N.,

- MacCracken, R.F., Houser, P.R., Zhou, T., Lettenmaier, D.P., Pinker, R.T., Bytheway, J., Kummerow, C.D., Wood, E.F., 2018. A Climate Data Record (CDR) for the global terrestrial water budget: 1984–2010. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 241–263. <https://doi.org/10.5194/hess-22-241-2018>
- Zheng, G., DiGiacomo, P.M., 2017. Remote sensing of chlorophyll-a in coastal waters based on the light absorption coefficient of phytoplankton. *Remote Sens. Environ.* 201, 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.008>
- Zhou, J., Lau, K.M., 1998. Does a monsoon climate exist over South America? *J. Clim.* 11, 1020–1040. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<1020:DAMCEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<1020:DAMCEO>2.0.CO;2)
- Zhou, L., Divakarla, M., Liu, X., 2016. An overview of the joint polar satellite system (JPSS) science data product calibration and validation. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8020139>
- Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J.C., Lavado-Casimiro, W., Aragon, L., 2017. Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 3543–3555. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3543-2017>
- Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J.C., Lavado, W., 2015. Impacts of satellite-based precipitation datasets on rainfall-runoff modeling of the Western Amazon basin of Peru and Ecuador. *J. Hydrol.* 528, 599–612. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.064>
- Zubieta, R., Saavedra, M., Espinoza, J.C., Ronchail, J., Sulca, J., Drapeau, G., Martin-Vide, J., 2019. Assessing precipitation concentration in the Amazon basin from different satellite-based data sets. *Int. J. Climatol.* 39, 3171–3187. <https://doi.org/10.1002/joc.6009>
- Zulkafli, Z., Buytaert, W., Manz, B., Rosas, C.V., Willems, P., Lavado-Casimiro, W., Guyot, J.L., Santini, W., 2016. Projected increases in the annual flood pulse of the Western Amazon. *Environ. Res. Lett.* 11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014013>
- Zulkafli, Z., Buytaert, W., Onof, C., Lavado, W., Guyot, J.L., 2013. A critical assessment of the JULES land surface model hydrology for humid tropical environments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 1113–1132. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1113-2013>
- Zulkafli, Z., Buytaert, W., Onof, C., Manz, B., Tarnavsky, E., Lavado, W., Guyot, J.L., 2014. A comparative performance analysis of TRMM 3B42 (TMPA) versions 6 and 7 for hydrological applications over Andean-Amazon river basins. *J. Hydrometeorol.* 15, 581–592. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-094.1>

~~~~~



Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO

