

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN SOBRE LOS FLUJOS DE SEDIMENTOS EN EL AMAZONAS: UNA SÍNTESIS BASADA EN 20 AÑOS DE MONITOREO

**Elisa Armijos ^{1,2}, Alain Crave ³, Jhan Carlo Espinoza ⁴, Naziano Filizola ²,
Raúl Espinoza-Villar ⁵, Irma Ayes ⁶, Paula Fonseca ⁶, Pascal Fraizy ⁷,
Omar Gutierrez ⁸, Philippe Vauchel ⁷, Benoit Camenen ⁹, Jean Michel Martinez ⁷,
André Dos Santos ^{6,10}, William Santini ⁷, Gérard Cochonneau ⁷ y Jean Loup Guyot ⁷**

RESUMEN

La vida en la región amazónica está principalmente relacionada con la estacionalidad del régimen hidrológico fluvial. La riqueza de la biodiversidad y productividad de la llanura de inundación depende de los nutrientes y la materia orgánica que son transportados por los ríos en los sedimentos en suspensión, desde los Andes hacia el océano Atlántico. Sin embargo, poco se conoce sobre la influencia de la variabilidad hidrológica y pluvial en los flujos sedimentarios. Para abordar esta brecha, analizamos 3069 muestras superficiales de agua y sedimentos recolectadas en el centro del río, cada 10 días durante el período 1995-2014, en 6 estaciones ubicadas en el río Amazonas y sus tributarios. Este análisis se ha realizado haciendo una distinción del tamaño de las partículas, sedimentos finos (arcilla y limo) y sedimentos gruesos (arena). Considerando esta distinción, se estimó, por primera vez, que en la llanura amazónica predomina el flujo de sedimento fino con un 60 % y las arenas representan el 40 % complementario. La lluvia tiene una relación con la producción de sedimentos finos, mientras que el caudal rige el transporte de arenas en suspensión. Adicionalmente, este trabajo presenta el tiempo de respuesta entre la lluvia y el caudal. Los resultados obtenidos en este estudio son una contribución importante a la dinámica biológica y geomorfológica en la cuenca del Amazonas.

El artículo científico original se encuentra en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ab9003>

Palabras clave: Amazonía, arenas, limos, arcillas, lluvia, caudal y llanura amazónica.

AFILIACIÓN:

- 1- Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú;
- 2- Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, Brazil;
- 3- Univ. Rennes, CNRS, Géoscience Rennes, UMR 6118, 3500 Rennes, France;
- 4- Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, Institute des Géosciences de l'Environnement (IGE, UMR 5001), 38000 Grenoble, France;
- 5- Univ. Nacional Agraria La Molina. UNALM. Av. La Molina s/n. Lima, Perú;
- 6- CLIAMB. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Manaus, Brazil;

- 7- IRD, Géoscience Environnement Toulouse (GET-CNRS, IRD, Université de Toulouse), Toulouse, France;
- 8- LMD, Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), Sorbonne Université, Paris, France;
- 9- Irstea, UR RiverLy, Centre de Lyon-Villeurbanne, Villeurbanne, France;
- 10- Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Manaus, Brazil.

Citar como: Armijos, E., Crave, A., Espinoza, J. C., Filizola, N., Espinoza-Villar, R., Ayes, I., ... & Guyot, J. L. (2020). Influencia de la precipitación sobre los flujos de sedimentos en el Amazonas: una síntesis basada en 20 años de monitoreo. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, Vol. 7 Nº 04, pag. 4-11.

INTRODUCCIÓN

El río Amazonas o Santa Maria del Mar Dulce, como fue denominado por el español Vicente Yáñez Pinzón en el siglo XVI, drena sus aguas hacia el océano Atlántico, contribuyendo con casi la quinta parte de la descarga mundial de agua dulce (Callède et al., 2010, Espinoza et al., 2009b). Además, suministra el 40 % del flujo de sedimentos en el mundo al océano Atlántico (Milliman y Farnsworth 2011). Los nutrientes contenidos en estos sedimentos durante su trayectoria son el sustento para la productividad de la inmensa llanura amazónica (Mc Clain y Naiman, 2008).

La cuenca amazónica es una zona crítica y estratégica para estudiar los efectos del cambio climático y la perturbación humana sobre los flujos de agua, sedimentos y flujos biogeoquímicos. En las últimas décadas, la expansión de la agricultura y la proyección/construcción de centrales hidroeléctricas plantean interrogantes y preocupaciones sobre sus impactos en los caudales; Asimismo, en la alteración del flujo de sedimentos en el río Amazonas (Latrubesse et al., 2017; Anderson et al., 2018).

La relación entre las precipitaciones y los sedimentos ha sido poco documentada en la región amazónica. No obstante, se ha demostrado una relación directa y lineal entre el caudal y la concentración de sedimentos para los ríos andinos de Perú y Bolivia (Armijos et al., 2013, Guyot et al., 1996). Para la planicie amazónica, esta relación se transforma en una histéresis bien marcada, lo cual se explica por el ingreso de tributarios con diferentes concentraciones de sedimentos (Dunne et al., 1998).

Basado en estudios previos, se determina que el río Amazonas y sus afluentes transportan dos fracciones de tamaño de sedimentos suspendidos bien definidas: sedimento fino [Cf] y arenas [Cc] (Dunne et al., 1998, Armijos et al., 2017, Bouchez et al., 2011). Este estudio propone, a través de un enfoque empírico, estimar el flujo de sedimentos en suspensión en el río Amazonas y sus tributarios. Para lo cual, establece una relación a partir de 20 años de datos observados, entre la precipitación, el caudal y la concentración de sedimentos. Estos resultados pueden servir de base para evaluar los impactos en la Amazonia por efecto de la presión antrópica y el cambio climático.

DATOS Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca amazónica se extiende desde los Andes hasta el océano Atlántico en un área de 6 000 000 km², recorriendo alrededor de 6850 km y aportando un caudal de 2 100 000 m³s⁻¹. Este estudio considera 6 estaciones hidrológicas localizadas en la planicie peruana-brasilera. La estación Tamshiyacu (TAM) está ubicada en el río Amazonas en Perú, después de la confluencia de los ríos Ucayali y Marañón. En Brasil, la estación de Manacapuru (MAN) está ubicada en el río Solimões, aguas arriba de la confluencia con el río Negro. Dos estaciones hidrológicas en el río Madeira: la estación Porto Velho (PTV) que se encuentra aguas abajo de la frontera entre Bolivia y Brasil, y la estación Fazenda Vista Alegre (FVA) aguas arriba de la confluencia con el Río Amazonas. En el río Branco, la estación de Caracarai (CAR) se ubica aguas arriba de la confluencia con el río Negro, y finalmente la estación de Óbidos (OBI) se ubica a 870 km aguas arriba de la desembocadura al océano Atlántico (Figura 1).

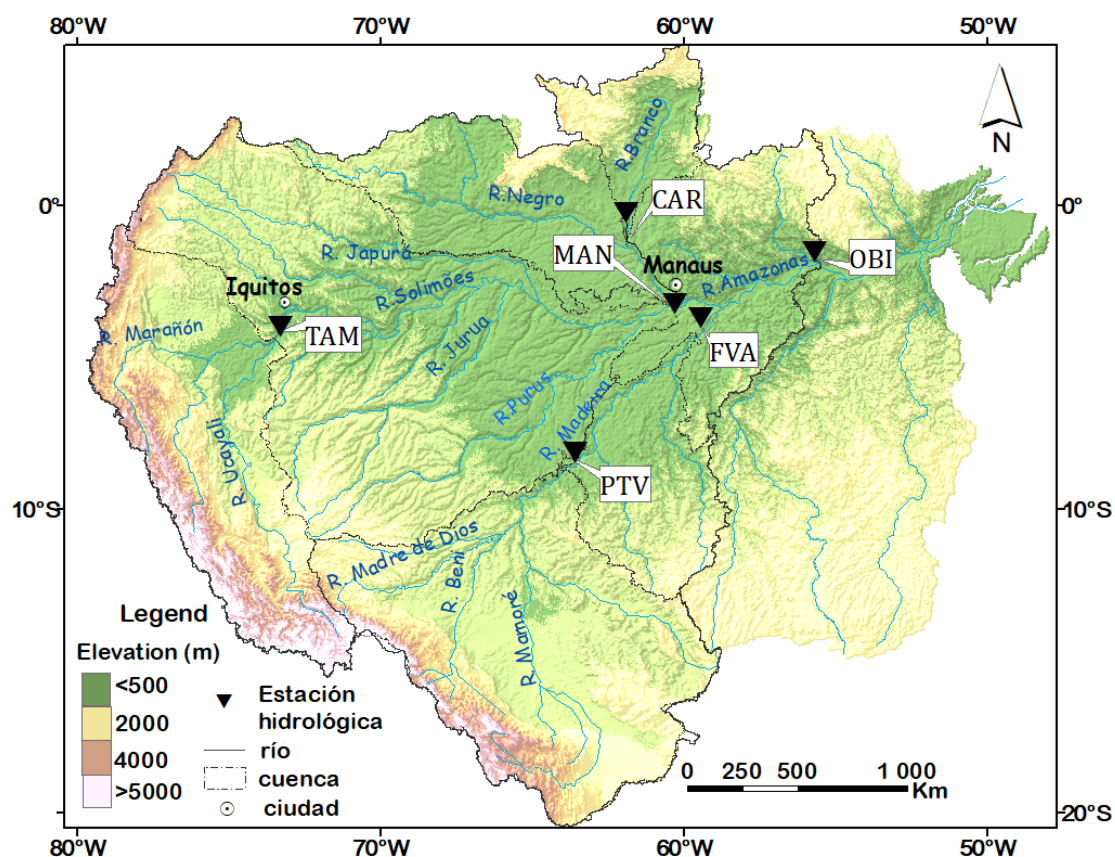


Figura 1. Localización de las estaciones hidrológicas en la cuenca del río Amazonas. Tamshiyacu (TAM), Manacapuru (MAN), Caracarai (CAR), Porto Velho (PTV), Fazenda Vista Alegre (FVA), y Óbidos (OBI).

DATOS

Los datos de lluvia provienen del producto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) con una resolución espacial de 0.25° (Funk et al., 2015). La medición de caudales se realizó con un correntómetro a efecto Doppler (ADCP) Río Grande de 600 kHz. En Perú, las mediciones inician en 2003, y en Brasil desde 1995, para el presente estudio, se ha considerado datos de caudales hasta el 2014. La base de datos proviene del SO HYBAM y está disponible en <http://www.ore-hybam.org/>. Para determinar la concentración de sedimentos en suspensión se tomaron muestras a varias profundidades y en diferentes perfiles del río, considerando el criterio de la misma distribución de caudal a lo largo de la sección transversal.

Para cada muestra obtenida se separan las arenas y finos (limos y arcillas) utilizando un tamiz de $63\ \mu\text{m}$, posteriormente se usa un filtro de celulosa de $0.45\ \mu\text{m}$ que descarta material disuelto, por lo que el análisis de la concentración de sedimentos en suspensión considera dos fracciones: partículas $> 0.45\ \mu\text{m}$ y $< 63\ \mu\text{m}$ llamadas concentración de sedimento finos ([Csf]) y partículas $> 63\ \mu\text{m}$ llamada concentración de arenas ([Cc]). Los detalles de las mediciones de campo se describen en Armijos et al., (2017) y Vauchel et al., (2017).

METODOLOGÍA

El tiempo de retraso entre la precipitación (R) y el caudal (Q) se determinó a través del análisis de la correlación cruzada en información a paso de tiempo diario. Se utilizó la precipitación promedio de cada área de la cuenca y el caudal diario

en cada una de las seis estaciones. Previo al análisis de correlación cruzada se eliminó la estacionalidad en ambas series sustrayendo el ciclo climatológico anual medio.

Armijos et al. (2017) determinaron un aumento de $[Cc]$ durante el período de crecidas, lo cual evidencia que el río Amazonas y sus tributarios tienen mayor capacidad de transporte durante estos períodos. En tal sentido, se propone una relación empírica potencial entre caudal y $[Cc]$ (Ecuación 1). Debido a las diferencias de superficie en cada cuenca se utilizó la velocidad de cizalla (u^*) como parámetro de normalización a fin de comparar los resultados obtenidos en cada estación.

$$[Cc] = au^{*b} \quad (1)$$

Finalmente, usando también un ajuste potencial, se exploró la relación mensual entre la precipitación (R) y el flujo de sedimentos finos (Q_{sf}). (Ecuación 2)

$$Q_{sf} = aR^b \quad (2)$$

Se utilizó error cuadrático medio y el coeficiente de correlación para evaluar la eficiencia del ajuste en las relaciones.

RESULTADOS

RELACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y CAUDAL

El pico máximo de precipitación ocurre entre enero y marzo, mientras que los caudales presentan máximos valores entre mayo y junio. Asimismo, se observa una correlación positiva significativa entre el caudal medido en la estación de aforo y las precipitaciones en el área de drenaje ($r=0.95$). El tiempo de respuesta determinado por el análisis de correlación cruzada indica que la precipitación que cubre el área controlada por la estación de Tamshiyacu, en Perú, es de 53 días. Para la estación de Óbidos en Brasil, que cubre casi toda la cuenca amazónica, el tiempo de respuesta entre la precipitación y el caudal es de 102 días (Tabla 1).

RELACIÓN ENTRE EL CAUDAL Y LA $[Cc]$

Se observa que existe una correlación significativa entre el caudal y la $[Cc]$ ($r=0.57$), lo cual nos indica que en el momento de máximos caudales la corriente tiene la capacidad de transportar partículas del tamaño de las arenas ($> 63 \mu m$). Además, se observa en la relación empírica que cinco de las seis estaciones tienen exponentes b (en la ecuación 2) cercanos oscilando en un rango que va entre 5 y 6 con excepción de la estación de Óbidos (Tabla 1).

RELACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y CAUDAL SÓLIDO DE SEDIMENTOS FINOS Qsf

Este estudio muestra que existe una correlación potencial significativa entre la precipitación y Qsf ($r=0.7$). Los exponentes de la ecuación varían en el orden de 1.9 y 2.3, con excepción de la estación de Caracarai cuyo valor es 1.16. Se observa que existe un mes de retraso para algunas estaciones, lo que podría estar relacionado con la distribución espacial de la precipitación, dado que es heterogénea para las diferentes regiones de estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Tiempo de respuesta entre precipitación (mm día^{-1}) y caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), las relaciones entre u^* (m s^{-1}) y $[Cc]$ (mg L^{-1}) y entre precipitación (mm mes^{-1}) y Qsf (t mes^{-1}) para las seis estaciones respectivamente.

Río	Estación Hidrológica	Precipitación (R) vs. Caudal (Q)				u^* vs $[Cc]$		Precipitación (vs) Qsf			
		$Q = aR + b$	r^2	Tiempo de retraso (días)	RMSE %	$[Cc] = au^{*b}$	r^2	$Qsf = aR^b$	r^2	Tiempo de retraso (días)	RMSE %
Amazon	Tamshiyacu	$Q = 611 \times R + 422$	0.95	53	29	$[Cc] = 2E + 0.8 \times u^{*6.05}$	0.57	$Qsf = 443 \times R^{2.23}$	0.89	-	30
Solimões	Manacapuru	$Q = 16230 \times R - 630$	0.96	95	5	$[Cc] = 3E + 0.7 \times u^{*5.57}$	0.84	$Qsf = 161 \times R^{1.92}$	0.80	-	23
Madeira	Porto Velho	$Q = 4133 \times R + 1192$	0.99	60	6	$[Cc] = 1E + 0.8 \times u^{*5.74}$	0.65	$Qsf = 443 \times R^{2.23}$	0.89	30	22
Madeira	Fazenda	$Q = 4498 \times R + 771$	0.96	63	11	$[Cc] = 4E + 0.7 \times u^{*5.18}$	0.89	$Qsf = 806 \times R^{2.0}$	0.89	30	30
Branco	Caracarai	$Q = 674.3 \times R - 632$	0.96	23	14			$Qsf = 743 \times R^{1.16}$	0.86	30	34
Amazon	Óbidos	$Q = 30410 \times R - 2521$	0.98	102	13	$[Cc] = 4E + 1.5 \times u^{*11.75}$	0.87	$Qsf = 429 \times R^{2.27}$	0.75	30	34

FLUJO DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN (Qs)

Utilizando las relaciones de la Tabla 1, se puede estimar el flujo de sedimentos en suspensión total (Qs)(Ecuación 3) a través de la adición de los flujos de sedimentos finos (Qsf) y de arenas (Qsc) para el Amazonas y sus tributarios.

$$Qs = Qsf + Qsc = Qsf + Q^*[Cc] \quad (3)$$

Usando esta relación empírica, se obtuvieron resultados semejantes a trabajos previos, donde la contribución de sedimentos finos (Qsf) y de arenas (Qsc) es mayor en el Solimoes que la contribución en el río Madeira (Figura 2).

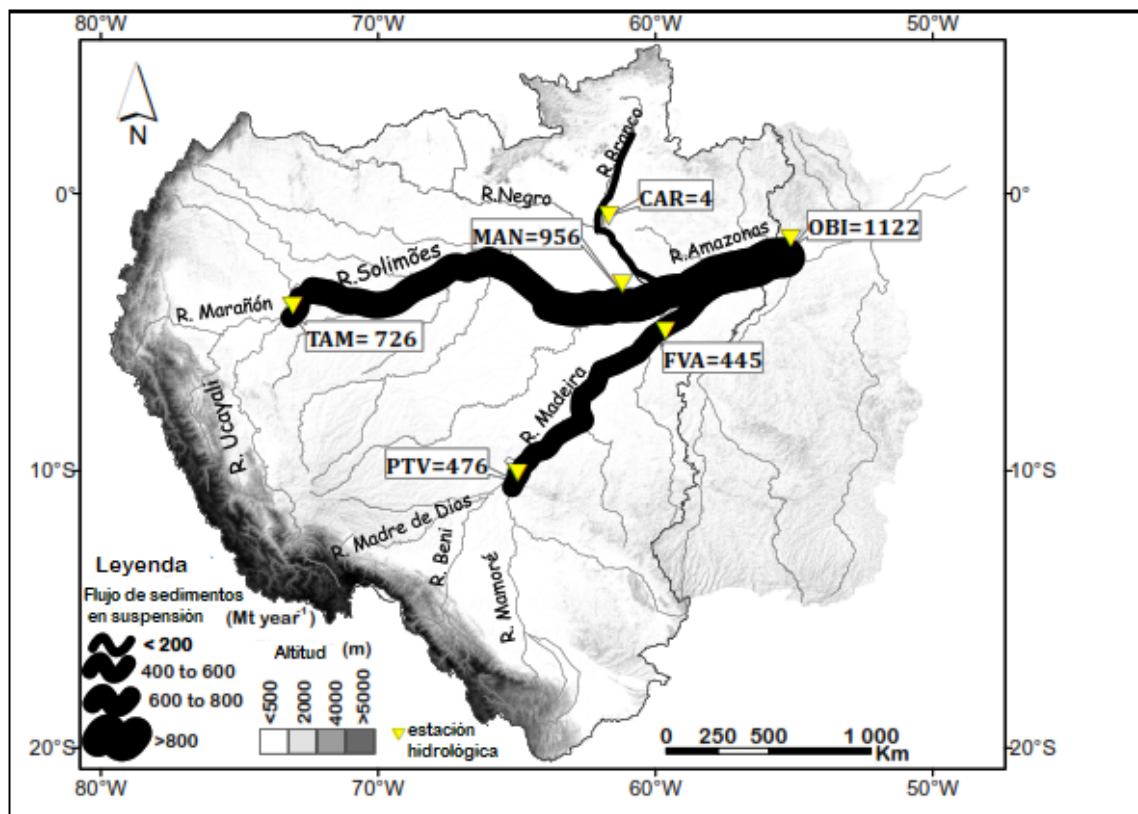


Figura 2. Flujo anual de sedimentos calculado a partir de las relaciones de caudal y precipitación para Tamshiyacu (TAM), Manacapuru (MAN), Porto Velho (PTV), Fazenda Vista Alegre (FVA), Caracarai (CAR) y Óbidos (OBI) con un RSME del 30 %.

CONCLUSIONES

Para calcular el flujo de sedimentos en la llanura amazónica se ha analizado una base de datos de más de 20 años de muestreo regular de sedimentos en suspensión. Esta información permite establecer relaciones empíricas entre la precipitación, el caudal, $[Q_{sf}]$ y $[C_c]$ para los principales tributarios en la cuenca del río Amazonas. Distinguir entre partículas finas y gruesas es importante en el estudio del flujo de sedimentos. La concentración de arenas $[C_c]$ está fuertemente relacionada con la descarga de agua local, mientras que el flujo de sedimentos finos $[Q_{sf}]$ está controlado principalmente por la distribución anual de la precipitación.

En otras palabras, el flujo de las partículas finas están influenciadas por la precipitación, mientras que el flujo de sedimentos gruesos tiene una relación con el caudal y el ciclo hidrológico estacional.

Las relaciones empíricas propuestas nos permiten determinar el flujo líquido y de sedimentos en suspensión, bajo diferentes escenarios de precipitación, en la cuenca del Amazonas.

REFERENCIAS

- Armijos, E., Crave, A., Vauchel, P., Fraizy, P., Santini, W., Moquet, J. S., ... Guyot, J. L. (2013). Suspended sediment dynamics in the Amazon River of Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 44, 75-84.
- Armijos, E., Crave, A., Espinoza, R., Fraizy, P., Santos, A. D., Sampaio, P., Pantoja, N. (2017). Measuring and modeling vertical gradients in suspended sediments in the Solimões/Amazon River. *Hydrological Processes*, 31(3), 654-667.
- Anderson, E. P., Jenkins, C. N., Heilpern, S., Maldonado-Ocampo, J. A., Carvajal-Vallejos, F. M., Encalada, A. C., Salcedo, N. (2018). Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams. *Science Advances*, 4(1), eaao1642.
- Bouchez, J., Métivier, F., Lupker, M., Maurice, L., Perez, M., Gaillardet, J., France-Lanord, C. (2011). Prediction of depth-integrated fluxes of suspended sediment in the Amazon River: Particle aggregation as a complicating factor. *Hydrological processes*, 25(5), 778-794.
- Callède, J., Cochonneau, G., Alves, F., Guyot, J. L., Guimarães, V., & De Oliveira, E. (2010). Les apports en eau de l'Amazonie à l'Océan Atlantique. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 23(3), 247-273.
- Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Peteuil, C., Fretaud, T., Falgon, A., ... & Moore, S. A. (2014, September). A simple physically-based model for predicting sand transport dynamics in the Lower Mekong River. In River Flow Conference (p. 8).
- Dunne, T., Mertes, L. A., Meade, R. H., Richey, J. E., & Forsberg, B. R. (1998). Exchanges of sediment between the flood plain and channel of the Amazon River in Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, 110(4), 450-467.
- Espinoza J C, Guyot J L, Ronchail J, Cochonneau G, Filizola N, Fraizy P, L..., Vauchel P 2009b Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon Basin 1974–2004 *Journal of Hydrology*. 375 297–311
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ..., Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1), 1-21.
- Guyot, J. L., Fillzola, N., Quintanilla, J., & Cortez, J. (1996). Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon. IAHS Publication, 55-64.
- Latrubesse, E. M., Arima, E. Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V. R., d'Horta, F., Stevaux, J. (2017). Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature*, 546(7658), 363-369.
- McClain, M. E., & Naiman, R. J. (2008). Andean influences on the biogeochemistry and ecology of the Amazon River. *BioScience*, 58(4), 325-338.
- Milliman, J. D., & Farnsworth, K. L. (2013). *River discharge to the coastal ocean: a global synthesis*. Cambridge University Press
- Vauchel P et al. 2017 A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme *Journal of Hydrology*. 553 35–48
- Vauchel, P., Santini, W., Guyot, J. L., Moquet, J. S., Martinez, J. M., Espinoza, J. C., ..., Ronchail, J. (2017). A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme. *Journal of Hydrology*, 553, 35-48.