

L'AMAZÒNIA, PULMÓ DEL PLANETA I LABORATORI DE BIODIVERSITAT

El transport de sediments en suspensió als rius de l'Amazònia: breu història i perspectives de recerca

Naziano Filizola, Ayan Fleischmann



Confluència del Rio Negro amb el riu Solimoes. Fotografia: Adelino Meireles

Els rius tenen un paper important en l'erosió continental, ja que són els principals agents de transferència dels productes de l'erosió cap als oceans. Entendre els rius i les seves vies de transport permet tenir una visió integral de molts processos d'importància global, com el cicle biogeoquímic de contaminants i nutrients, la reducció del CO₂ atmosfèric, la formació i erosió del sòl o l'evolució de l'escorça terrestre. En definitiva, es tracta de la interacció entre les categories atmosfèriques i litosfèriques del sistema terrestre. Aquesta interacció es caracteritza per les proporcions relatives entre la degradació mecànica i la meteorització química, els productes dels quals, dissolts o sòlids, són transportats pels rius. Per tant, la càrrega de sediments dels rius està controlada pel relleu de la conca hidrogràfica, el pendent del canal i la connectivitat amb el vessant, però també per factors climàtics com la precipitació. Aquests últims, juntament amb la temperatura, controlen la meteorització química, que depèn de l'erosió física en un grau encara desconegut. Tanmateix, tant l'erosió mecànica com la meteorització química estan condicionades per l'activitat tectònica, que impulsa processos de rejuveniment del paisatge i preconditiona el règim de transport fluvial. En una escala temporal més curta, els humans poden actuar com a agents geomorfològics, construint preses i embassaments, i modificant l'ús del sòl, amb la

desforestació i la mineria.

És especialment a les regions tropicals d'arreu del món on es concentren grans conques hidrogràfiques i on el seu comportament té un paper important en el transport dels sediments fluvials. Així, per exemple, els tròpics representen el 25 % de la superfície continental total i contenen el 57 % de l'aigua dolça del món que flueix pels rius; i les conques hidrogràfiques associades contribueixen, respectivament, amb el 50 i el 38 % a l'aportació de sòlids en suspensió i sòlids dissolts als oceans. [1] [2] Les grans conques hidrogràfiques sovint presenten formes mixtes de vies fluvials, ja que generalment constitueixen una zona d'origen de sediments d'erosió ràpida i una zona de dipòsit associada a les terres baixes.

Amb una superfície de més de 6,5 milions de quilòmetres quadrats, la conca amazònica té una densitat de rius extremadament alta en entorns de muntanya, bosc i sabana, de manera que constitueix un sistema complex i variat d'hàbitats. Els rius amazònics presenten característiques molt particulars i reflecteixen un context en què el 44 % de l'àrea de drenatge correspon a terrenys geològicament antics (precàmbrics), un altre 44 % a terrenys molt més recents, com les planes quaternàries que voregen els rius, i el 12 % restant són terrenys amb edats entre 20 i 60 milions d'anys, representats per les muntanyes andines amb altituds que superen els 4.000 metres. El desenvolupament de la conca i la seva xarxa de drenatge va estar marcat per processos de canvi en la direcció del flux del curs principal, que van donar lloc a diverses fases d'evolució.

Amb una superfície de més de 6,5 milions de quilòmetres quadrats, la conca amazònica té una densitat de rius extremadament alta en entorns de muntanya, bosc i sabana: constitueix un sistema complex i variat d'hàbitats

Abans que la conca es consolidés com la coneixem actualment, la direcció del riu Amazones va canviar, des de fa poc més de 15 milions d'anys, de l'oest-nord-oest cap a l'est. En aquella època, hi havia un sistema d'aigües interiors, el sistema Pebas. Era considerat com un mar interior per a alguns, i, per a altres, com un gran llac pantanós. Un cop consolidada la conca com la tenim avui, el riu Amazones va començar a transportar més sediments des dels Andes fins a l'oceà per mitjà de la gran aportació d'aigües a l'Atlàntic, de l'ordre dels 200.000 metres cúbics per segon. Així, les taxes d'erosió que es registren a les zones muntanyoses dels tròpics es troben entre les més altes del món, de les quals la conca amazònica és un excel·lent exemple. La majoria dels sediments transportats pel canal principal de l'Amazones provenen dels Andes, però també s'emmagatzemen de manera intermitent, durant almenys diversos milers d'anys, a la plana d'inundació. [3]

La classificació dels rius i el flux de sediments que transporten

Els primers estudis sobre el transport de sediments a la conca amazònica van ser elaborats per Sioli, el 1957,[4] i Gibbs, el 1967. [5] Tots dos van determinar, com a regla general del sistema, la disminució de la concentració de sediments al llarg del curs principal. Van destacar la forta contribució dels Andes com a font de les càrregues de sediments dels rius, principalment pel que fa al transport de matèria en suspensió (MES). Segons la classificació proposada per Sioli el 1957, [6] a l'Amazònia hi ha tres tipus bàsics de rius. El primer tipus inclou els rius d'aigües blanques, gairebé sempre d'origen andí, que transporten grans quantitats de MES. Els exemples més representatius són els rius Solimoes i Madeira. El segon tipus correspon als rius d'aigües negres, una denominació que fa referència als rius amb aigües de color negre a causa de l'alt contingut d'àcids húmics i fúlvics, derivats de la degradació de la matèria orgànica dins la selva tropical. Aquests rius transporten grans quantitats de matèria orgànica i poca MES, fet que fa que l'aigua sigui transparent. L'exemple més destacat és el Rio Negro, les fonts del qual es troben a l'escut de les Guaianes. Finalment, Sioli va classificar la resta de rius com a rius d'aigües clares, com el riu Tapajós, per exemple, caracteritzats per una coloració verda clara, baix contingut de MES. Les seves fonts es troben generalment als escuts antics de la conca amazònica.

Després dels seus dos treballs de camp duts a terme al llarg del curs principal i en setze dels seus afluents principals, el 1967, Gibbs es va adonar que les concentracions de MES disminuïen al llarg del curs principal aigües avall. També va observar disminucions en les concentracions de l'afluència dels rius tributaris a mesura que s'allunyaven dels Andes. No obstant això, Gibbs no va mesurar el flux del sediment de fons, només la matèria en suspensió a l'aigua. Segons les estimacions basades en la projecció dels perfils de concentració de sediments en suspensió en algunes estacions, es calcula que l'arrossegament, o el transport de fons, representa el 5 % de la càrrega total de sediments que arriba a la desembocadura de l'Amazones. Al riu Solimoes, a prop de Manaus, Schmidt (1972) [7] va fer recollides mensuals de mostres de MES a la superfície, sempre a la part central del canal del curs principal i a la confluència amb el Rio Negro.

Hi ha una forta relació entre el flux de sediments fins en suspensió i les precipitacions, mentre que un flux més elevat de sediments gruixuts en suspensió està relacionat amb el cabal del riu

La concentració de sediments va variar lleugerament, entre 37 i 165 mil·ligrams l'any, durant un any, i va arribar al valor més alt durant l'inici de l'estació d'aigües altes. Schmidt va explicar que aquest fenomen era el resultat de la resuspensió dels sediments dipositats a la plana d'inundació durant els pics de crescuda. També va argumentar que, a mesura que disminueix el nivell de l'aigua al curs principal, els llacs marginals es drenen al canal, de manera que es fan menys profunds. Per tant, quan arriba l'ona de crescuda del curs

principal, es produeix la resuspensió dels sediments acumulats als llacs. La incidència de pluges localitzades causaria, presumiblement, escorrenties també localitzades, que descarregarien aigua i sediments des dels llacs fins al canal. Tanmateix, diversos estudis han evidenciat que els llacs marginals no constitueixen grans fonts de sediments si es comparen amb les contribucions andines. [8] [9] [10]

El flux de sediments del riu Amazones cap a l'oceà

En el marc del programa Alpha Helix, [11] a través de les mesures dutes a terme els anys 1976 i 1977, van estimar una descàrrega mitjana de sediment total en suspensió d'Óbidos cap a l'oceà d'aproximadament 900×10^6 tones l'any. Utilitzant aquestes dades, Meade va oferir la primera descripció de la variació vertical i lateral del sediment en suspensió al riu Amazones. El resultat es va obtenir a partir de més de 300 mostres recollides durant dues expedicions de camp en els períodes de crecuda de 1976 i 1977. Posteriorment, es van utilitzar [12] [13] gairebé 200 mostres tant del conjunt de dades nacional brasiler (gestionat per l'Agència Nacional d'Aigües) com de diverses empreses brasileres, i van obtenir resultats molt similars als de Meade et al. [14] Així mateix, Guyot et al. [15] [16] van obtenir resultats també semblants, especialment per a la conca del riu Madeira (entre 250 i 300×10^6 tones l'any). Per a aquest riu, Martinelli et al. [17] [18] Ferreira et al. [19] van estimar una descàrrega de sediments en suspensió lleugerament superior, d'aproximadament 550×10^6 tones l'any. El grup d'estudi A Multidisciplinary Amazon Shelf SEDiment Study (AmasSeds) 'estudi multidisciplinari dels sediments de la plataforma de l'Amazones', a partir de l'anàlisi de 190 perfils obtinguts amb sonda CTD a la plataforma continental, va indicar un flux total del riu Amazones cap a l'oceà d'entre 550 i 1.000×10^6 tones l'any.

Amb l'objectiu de caracteritzar la distribució espacial de la producció de sediments i dels processos de transferència sedimentària a la conca amazònica brasilera, Laraque et al. [20] van establir una relació entre la concentració superficial i la concentració mitjana de sediments en suspensió per a diverses seccions transversals a cada estació de la xarxa SO HYBAM. Utilitzant el mateix conjunt de dades, però a partir de 1995, Guyot et al. [21] han destacat una marcada estacionalitat en el flux de sediments, que no corresponia a la variació del flux a Óbidos. En conjunt, aquests treballs van indicar valors de descàrrega de MES entre 600 i 900×10^6 t/any. Martinez et al. [22] van emprar un enfocament combinat de les dades anteriors i posteriors a la creació del SO HYBAM, en què també van introduir dades de sensors espacials MODIS obtingudes via satèl·lit. Van poder estimar la descàrrega de sediments en suspensió a Óbidos cap a l'oceà en uns 800×10^6 t/any. També van evidenciar un increment en la descàrrega de sediments en suspensió del riu Amazones entre 1996 i 2007. Mitjançant una aproximació innovadora basada en l'anàlisi de concentracions de ^{10}Be (isòtop del beril·li) produït per núclids cosmogènics, Wittmann et al. [23] van obtenir una estimació de la descàrrega total de sediments del riu Amazones d'aproximadament 610×10^6 t/any. Aquesta estimació integra escales temporals de diversos milers d'anys i, per tant, proporciona una avaluació a llarg termini de la càrrega sedimentària total. Posteriorment, Guyot et al. (2011) van indicar, mitjançant el conjunt de dades disponibles del SO HYBAM, un flux de sediments situat en la franja de 600 a $900 \times$

106 t/any.



Port de Manaus. En aquell moment, el Rio Negro es trobava uns 11 metres per sota del seu nivell habitual. Fotografia: Adelino Meireles

Armijos et al. [24] van dur a terme l'estimació més recent del flux de sediments cap a l'oceà, i van analitzar 3.069 mostres de sediments del SO HYBAM, recollides cada 10 dies entre 1995 i 2014 a cinc estacions de mesura localitzades als rius principals. Es van identificar dues fraccions diferenciades de sediments en suspensió: fins (argila i llim) i gruixuts (sorra), que van seguir patrons estacionals i de llarg termini contrastants. Tenint en compte aquesta dinàmica, els autors van estimar el flux de sediments en suspensió per separat, i van obtenir aproximadament un 60 % de sediments fins i un 40 % de sediments gruixuts. Van constatar una forta relació entre el flux de sediments fins en suspensió i les precipitacions, mentre que un flux més elevat de sediments gruixuts en suspensió està relacionat amb el cabal del riu. Van estimar que el flux total de l'Amazones cap a l'oceà era de l'ordre de 1.100×10^6 t/any. Avui, les principals estimacions de fluxos de MES es basen en l'ús de dades de satèl·lit, que són validades mitjançant la informació generada pel SO HYBAM. D'aquest total identificat per Armijos i col·laboradors, al voltant del 50 % prové probablement del riu Madeira.

El flux de sediments dels rius amazònics en el context dels canvis ambientals i climàtics

Els rius amazònics, les seves planes d'inundació i els paisatges circumdants canvien constantment. No obstant això, les últimes dècades d'aquest segle han provocat un ritme sense precedents d'aquestes transformacions, tant ambientals com climàtiques. Aquests canvis inclouen processos relacionats amb inundacions i sequeres extremes, com la

inundació de 2021 i les sequeres de 2023 i 2024; l'escalfament progressiu de l'aire i les aigües; la desforestació i degradació forestal; la contaminació de les aigües per mineria il·legal i la contaminació urbana (plàstics, matèria orgànica, contaminants emergents, etc.); i l'expansió d'hidroelèctriques, entre d'altres. Aquests processos també afecten i es veuen afectats pels fluxos de sediments dels rius amazònics.

Les últimes dècades han provocat un ritme sense precedents de transformacions ambientals i climàtiques, incloent inundacions i sequeres extremes

La mineria il·legal destrueix els paisatges fluvials amb les seves dragues, que bomben aigua i sediments del fons dels rius, a més de contaminar aigua i sediments amb mercuri. Les hidroelèctriques acumulen sediments, i les noves preses amazòniques podrien reduir la càrrega de sediments en més del 60 %. Durant sequeres extremes, es formen grans platges que aïllen comunitats. Les crescudes extremes poden alterar el llit dels rius i generar grans canvis en el paisatge fluvial, així com alterar els patrons de sedimentació a les planes d'inundació amazòniques i accelerar els processos d'erosió.

La desforestació pot augmentar el flux de sediments als rius amazònics i generar canvis ràpids en els patrons hidrogeomorfològics en pocs anys. El desplaçament continu dels meandres dels rius amazònics, especialment els que presenten una elevada càrrega de sediments com els rius Solimoes, Purus i Juruá, fa que els intensos processos erosius locals (coneguts com a esllavissades) afectin directament les comunitats riberenques i causin danys materials i, fins i tot, morts. Es tracta d'un dels riscos socioambientals més rellevants i sovint negligits a la regió. Per tant, la comprensió de la dinàmica hidrosedimentària a la conca amazònica requereix una perspectiva holística i integrada dels processos socioambientals que es produeixen en diferents escales temporals i espacials, amb la finalitat d'anticipar escenaris i buscar solucions per reduir els impactes derivats dels canvis ambientals i climàtics vigents.

En aquest context, les noves eines han contribuït de manera important al coneixement dels fluxos de sediments dels rius amazònics. Per exemple, l'ús de teledetecció amb sensors espectrals òptics a bord de satèl·lits, entre altres tecnologies, ha suposat avenços importants en el mapatge regional de fluxos i concentracions de sediments, tant en entorns fluvials com lacustres. Cal destacar, d'altra banda, la necessitat contínua de buscar estratègies de monitoratge locals que permetin la validació constant de les dades de satèl·lit amb dades de camp. A més, l'aplicació de noves metodologies de tractament de dades de MES combinades amb dades del correntòmetre perfilador acústic Doppler (ADCP, per la sigla en anglès) per fer estimacions més sòlides pot contribuir significativament al fet que aquesta integració de dades de teledetecció i de camp sigui útil tant per permetre un monitoratge més efectiu d'aquest paràmetre com per indicar possibles regions d'embassament de sediments dels rius de l'Amazònia, [25] [26]alhora que es milloren les condicions de navegabilitat.

La navegabilitat als rius amazònics va esdevenir un tema molt important durant els anys de sequeres extremes de 2023 i 2024. Dos anys consecutius de sequeres van generar impactes en la comunicació entre localitats i el transport de mercaderies i passatgers dins l'Amazònia, amb conseqüències humanes i materials incalculables. Només el sector de transport de mercaderies cap a la zona franca de Manaus va registrar valors de l'ordre de milers de milions de reals. Les comunitats riberenques van quedar aïllades, sense accés adequat a aigua potable ni a serveis de salut i educació, entre d'altres.[27]

Els intensos processos erosius, fruit de l'alt flux de sediments, afecten directament les comunitats riberenques i poden causar danys materials i fins i tot morts

La presència de sediments a les aigües amazòniques també influeix en la salut pública. Diversos estudis de Fonseca et al. [28] indiquen que com més sediments hi ha a l'aigua, més gran és la tendència a un augment del nombre de casos de malària. Per tant, en rius d'aigües més clares i subjectes a fortes pressions antròpiques com la desforestació, un nombre elevat de persones de la regió pot estar exposat a malalties com la malària i, possiblement, a altres encara poc estudiades en relació amb el transport de sediments pels rius.

En síntesi

En aquest article, hem presentat un breu resum sobre la rellevància de l'estudi del flux de sediments als rius de l'Amazònia, la seva importància i l'impacte en diferents contextos. També xifres d'estimacions dutes a terme des dels anys 50 fins a les més recents, així com la possibilitat d'establir pràctiques de monitoratge utilitzant dades de teledetecció. No obstant això, no s'exclou la necessitat de validar aquestes dades indirectes amb les de camp (in situ), ja que la diversitat i la constància de les accions antròpiques tendeix a modificar cada cop més l'entorn. D'aquesta manera, creix la necessitat de verificació sobre el terreny per mantenir actualitzats els coneixements del món real. Això permet un millor ús de la informació per gestionar els ambients fluvials de manera adequada a les demandes de la societat, especialment en una regió en transició com és el cas de l'Amazònia.

Naziano Filizola

Naziano Filizola és investigador titular a l'Institut Mamirauá de l'Amazònia Central, on dirigeix el grup de recerca en Geociències i Dinàmiques Ambientals a l'Amazònia. Com a hidròleg interdisciplinari, les seves eines de recerca inclouen el monitoratge ambiental sobre el terreny i els enfocaments participatius, la teledetecció i la modelització hidrològica, amb l'objectiu d'entendre les dinàmiques ambientals al llarg dels rius i les zones humides tropicals, i els impactes dels canvis ambientals sobre els recursos hídrics i els sistemes socioecològics.

Ayan Fleischmann

Ayan Fleischmann és un investigador brasiler especialitzat en la hidrologia i la dinàmica dels rius amazònics. És professor de la Universitat Federal de l'Amazònia i coordinador del projecte Rios On Line. Va obtenir un doctorat en Hidrologia i Geologia a la Universitat Paul Sabatier de Tolosa, França. La seva recerca se centra en el seguiment dels rius amazònics, el transport de sediments i la conservació del medi ambient a l'Amazònia.