



IMPACTO DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS EN EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS FLUVIALES HACIA LOS OCÉANOS: PERSPECTIVA DESDE EL RÍO
MAGDALENA

Impact of Human Activities on the Transport of Fluvial Sediments to the Oceans: A
Perspective from the Magdalena River

JULIANA VARGAS GÓMEZ

Trabajo de grado

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2024

Contenido

RESUMEN	
PALABRAS CLAVES	
ABSTRACT	
KEY WORDS	
1. INTRODUCCIÓN	1
2. DINÁMICA DE SEDIMENTOS: PRODUCCIÓN, TRANSPORTE Y DEPÓSITOS EN CUENCAS FLUVIALES	2
3. EL ANTROPOCENO: IMPACTO HUMANO EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FLUVIALES HACIA LOS OCÉANOS	4
3.1 CAMBIOS EN LA PRODUCCIÓN Y RETENCIÓN DE SEDIMENTOS	5
3.2 ESTIMACIÓN DE LAS CARGAS DE SEDIMENTOS FLUVIALES PREHUMANAS Y DEL ANTROPOCENO: MODELOS ART, QRT Y BQART	9
3.3 ACTIVIDADES HUMANAS QUE ALTERAN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FLUVIALES	13
3.3.1 Deforestación, agricultura y minería	13
3.3.2 Presas e ingeniería fluvial	16
3.3.3 Extracción de arena y grava	18
3.4 IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DINÁMICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FLUVIALES	18
4. CASO ESPECÍFICO: RIO MAGDALENA	20
5. CONCLUSIONES	27
6. REREFENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

Lista de figuras

Figura 1. Creciente impacto de la actividad humana sobre el transporte de sedimentos.....	9
Figura 2. Aumento de los sedimentos debido a actividades como la deforestación, agricultura y minería, provocando mayor erosión de suelo.....	15
Figura 3. Impactos de la construcción de embalses en el transporte natural de sedimentos.....	17
Figura 4. Cambio en la producción de sedimentos respecto a la temperatura media del aire de la cuenca.....	20
Figura 5. Ubicación de la cuenca de drenaje del río Magdalena, se muestra la sección superior, media e inferior de la cuenca.....	22
Figura 6. Impactos de las actividades humanas en la cuenca del río magdalena.....	26

Lista de tablas

Tabla 1. Resumen del balance de sedimentos para el Antropoceno, comparación de los valores de sedimentos para 1950 y 2010	6
Tabla 2. Valores de área, caudal, transporte de Q_s prehumanas (modelo ART) y en el Antropoceno (modelo QRT) para diferentes tipos de cuencas. Los valores de sedimentos son estimados en las costas.. ..	11

RESUMEN

Las actividades antropogénicas cada vez más tienen un mayor control sobre la producción, transporte y acumulación de sedimentos en cuencas fluviales. El propósito de esta investigación es hacer un análisis sobre el impacto de las actividades humanas en el transporte de sedimentos desde los ríos hacia los océanos, enfocándose en el río Magdalena, la cuenca fluvial más importante de Colombia. Las actividades humanas han incrementado el transporte de sedimentos, especialmente en regiones donde prima la deforestación y la agricultura, como sucede en el río Magdalena. A nivel global, mientras que los embalses retienen sedimentos y reducen el transporte hacia las costas en algunas regiones, en otras el impacto de la deforestación, la agricultura, y la minería aumenta la carga de sedimentos fluviales. El estudio de las variaciones en el transporte de sedimentos es importante en el Antropoceno, una época en la que la actividad humana es el principal agente de cambio ambiental. El uso de modelos como BQART permite estimar y prever cambios en el transporte de sedimentos, proporcionando datos para la gestión de recursos y conservación de la biodiversidad en áreas afectadas. En conclusión, los resultados de esta revisión resaltan la necesidad de políticas públicas que mitiguen el impacto humano en los sistemas fluviales, promoviendo prácticas sostenibles para proteger tanto los ecosistemas fluviales y costeros como la calidad del agua y los hábitats en riesgo.

PALABRAS CLAVES

Transporte de sedimentos, Antropoceno, Actividades humanas, Río Magdalena, Modelos.

ABSTRACT

Anthropogenic activities increasingly exert greater control over the production, transport, and accumulation of sediments in river basins. The purpose of this research is to analyze the impact of human activities on sediment transport from rivers to oceans, focusing on the Magdalena River, Colombia's most important river basin. Human activities have heightened sediment transport, especially in regions dominated by deforestation and agriculture, as seen in the Magdalena River. Globally, while reservoirs retain sediments and reduce transportation to coastal areas in some regions, in others, the impact of deforestation, agriculture, and mining increases the riverine sediment load. Studying variations in sediment transport is essential in the Anthropocene, an era in which human activity is the main agent of environmental change. The use of models like BQART enables estimation and prediction of changes in sediment transport, providing data for resource management and biodiversity conservation in affected areas. In conclusion, the results of this review highlight the need for public policies that mitigate human impact on river systems, promoting sustainable practices to protect both river and coastal ecosystems as well as water quality and at-risk habitats.

KEY WORDS

Sediment transport, Anthropocene, Human activities, Magdalena River, Models.

1. INTRODUCCIÓN

Los ríos desempeñan un papel crucial en la evolución del paisaje a través de la erosión y el transporte de sedimentos desde el continente hasta el océano, la suma de los procesos de erosión y deposición en la cuenca hidrográfica determina el transporte de sedimentos hacia los océanos (Restrepo, 2017). Los factores que controlan dicho transporte son: área de la cuenca de drenaje, clima, geología, topografía, hidrología, geomorfología, cobertura vegetal, y actividad humana (Milliman y Syvitski, 1992; Syvitski y Milliman, 2007; Restrepo, 2017). Las actividades humanas han alterado el transporte y secuestro de sedimentos a lo largo de las cuencas fluviales, llegando a dominar estos procesos casi por completo (Syvitski et al., 2022).

En el contexto mundial, Milliman y Meade (1983) estimaron el aporte global de los ríos con grandes cargas de sedimentos al océano, empleando los datos publicados por otros autores e informes de organizaciones como la UNESCO. Investigaciones más recientes, se han enfocado en desarrollar y usar herramientas analíticas y modelos que mejoran la estimación de la carga sedimentaria que descargan los ríos en los océanos, identificando el impacto humano en los cambios del transporte de sedimentos fluviales, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XX (Syvitski et al., 2003; Syvitski et al., 2005b; Syvitski y Milliman, 2007; Syvitski y Kettner, 2011).

Entre estas herramientas analíticas se incluyen el análisis de series de tiempo de sedimentos suspendidos (Q_s) (Restrepo y Kjerfve, 2000), la evaluación de variables antrópicas (Restrepo y Syvitski, 2006), el uso de modelos de regresión múltiple (Restrepo et al., 2006a) y la aplicación de modelos para estimar la carga de sedimentos en los ríos, como BQART (Syvitski y Kettner, 2011), QRT y ART (Syvitski et al., 2005b). A pesar de los avances, la identificación del impacto humano en el transporte de sedimentos de los ríos hacia los océanos sigue siendo un área de investigación activa.

En Colombia, este tipo de estudios se han centrado en el río Magdalena, debido a que es el más extenso del país, y el mayor aportante de sedimentos en el Mar Caribe (Restrepo y Kjerfve, 2000; Kettner et al., 2010). Con una carga de aproximadamente 184 MT año^{-1} , es uno de los diez ríos con mayor carga de sedimentos en el mundo, y el mayor productor de sedimentos en la costa Este de Suramérica, con $710 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (Restrepo y Kjerfve, 2000). En las últimas décadas, se han realizados investigaciones sobre el caudal, la producción, y la carga de sedimentos que transporta

el río Magdalena al Mar Caribe (Restrepo y Kjerfve 2000; 2002; Restrepo et al., 2006a). Este tipo de estudios han permitido identificar las actividades antrópicas, como la deforestación, la agricultura y la minería, que tienen un impacto significativo en el aumento de los sedimentos que son transportados por el Magdalena (Restrepo y Syvitski, 2006; Kettner et al., 2010; Restrepo et al., 2015). Igualmente, se ha comprobado cómo la variabilidad en el transporte de sedimentos está alterando los ecosistemas costeros, especialmente en términos de calidad del agua y estado del hábitat (Restrepo et al., 2006b; Restrepo, 2008; Restrepo et al., 2016a; Tosic y Restrepo, 2024).

El propósito de esta revisión es el de analizar el impacto de las actividades humanas en el transporte de sedimentos desde los ríos hacia los océanos a nivel global, con un enfoque particular en el río Magdalena. Este estudio identifica los principales factores que han alterado dicho transporte, proporcionando una comprensión más profunda de cómo las acciones antropogénicas interactúan con los sistemas fluviales. Asimismo, los resultados obtenidos serán fundamentales para investigaciones futuras, apoyando la mitigación de desastres naturales, una gestión más eficiente de los recursos y la preservación de la biodiversidad, tanto a nivel local como global.

2. DINÁMICA DE SEDIMENTOS: PRODUCCIÓN, TRANSPORTE Y DEPÓSITOS EN CUENCAS FLUVIALES

Los sedimentos originados por la meteorización física y bioquímica del material superficial terrestre varían en tamaño desde bloques de más de 3 metros de diámetro hasta diminutos granos de limo y arcilla con diámetros inferiores a 2×10^{-6} m (Syvitski et al., 2022). Estos sedimentos son erosionados, transportados y depositados constantemente antes de su almacenamiento geológico final, y se movilizan a través de diversos medios como el agua, el viento y el hielo glaciar e incluso mediante deslizamientos o flujos de escombros (Syvitski et al., 2022).

El balance global de sedimentos de la Tierra se refiere a la masa total de sedimentos transportados desde la tierra al océano a través de los diferentes medios, y se mide a lo largo de la línea de costa, esto implica que la masa de sedimentos erosionados en la fuente es igual a la masa transportada y finalmente depositada en los sumideros (Rosati, 2005; Syvitski et al., 2022).

La carga de sedimentos (M) se define como la masa de sedimentos que atraviesa una sección transversal por unidad de tiempo y se expresa habitualmente en megatoneladas por año ($Mt/año$); incluyendo tanto la carga disuelta (Q_D) como la carga detrítica (Q_T), que a su vez se divide en carga de fondo (Q_b) y carga suspendida (Q_s), y es transportada principalmente por agua y viento, aunque

en algunas regiones también puede ser movilizada por hielo (Syvitski, 2003a). Los valores de la carga suspendida (Q_s) suelen adoptarse como equivalentes a la "carga de sedimentos", ya que la carga de fondo representa menos del 10% del sedimento transportado en la mayoría de los ríos (Meade, 1996; Syvitski, 2003a; Syvitski et al., 2022).

Los ríos juegan un papel clave en el transporte de sedimentos ya que el 95% del transporte global de sedimentos al océano depende de estos (Syvitski, 2003a). Pese a ello, se estima que solamente el 10% de los sedimentos erosionados llegan al océano, la otra parte se encuentra en flujo o se almacena en sumideros al interior de la cuenca (Meade, 1996).

El transporte de sedimentos desde los ríos hasta el océano está controlado por varios factores naturales, como el área de la cuenca de drenaje, el clima (equilibrio hídrico entre la precipitación y evaporación), la geología de la cuenca (tipo de roca, tectónica y geomorfología), el relieve, la hidrología (escorrentía, velocidad de la corriente y descarga de agua en metros cúbicos por segundo) y la cobertura vegetal (Milliman y Syvitski, 1992; Syvitski, 2003a; Syvitski y Milliman, 2007; Restrepo, 2017).

La producción de sedimentos (Y) se refiere a la carga de sedimentos normalizada por área de cuenca de drenaje (A_{db}), mientras que la tasa de erosión (ER) mide la eliminación vertical de material y ambos son medidos en $t\ km^{-2}\ año^{-1}$ (Milliman y Syvitski, 1992; Syvitski, 2003a; Syvitski et al., 2022). Estos indicadores son fundamentales porque reflejan la evolución del paisaje, los cambios climáticos, el uso del suelo y la magnitud de la erosión continental, lo que los convierte en herramientas clave para el estudio de procesos geomorfológicos y ambientales (Restrepo, 2017).

La relación entre el tamaño de la cuenca de drenaje y la producción de sedimentos es inversamente proporcional: a mayor distancia de transporte, mayor probabilidad de deposición de sedimentos (Walling y Webb, 1996). Las cuencas más grandes suelen contar con un mayor número de zonas de deposición en sus partes bajas (Latrubesse y Restrepo, 2014). En contraste, existe una relación directa entre el tamaño de la cuenca y la carga de sedimentos, así como con la escorrentía (Milliman y Syvitski, 1992).

La producción promedio global de sedimentos es de $154\ t\ km^{-2}\ año^{-1}$, con variaciones continentales entre 30 y $1,300\ t\ km^{-2}\ año^{-1}$ (Syvitski y Milliman, 2007). Las grandes cadenas montañosas tienen la producción de sedimentos más alta, como Taiwán ($7800\ t\ km^{-2}\ año^{-1}$), Himalayas ($4,800\ t\ km^{-2}$

año⁻¹) y los Andes (1,500–5,000 t km⁻² año⁻¹) (Latrubesse y Restrepo, 2014), mientras que las regiones polares y subpolares, debido a suelos congelados y menor transporte, presentan tasas más bajas (< 20 t km⁻² año⁻¹) (Syvitski et al., 2019b). Los terremotos también juegan un papel importante en el aumento de la producción de sedimentos en áreas montañosas y de límite de placa (Dadson et al., 2004).

La tasa de erosión es mayor en las cabeceras de drenaje, donde las pendientes y las características geográficas favorecen una mayor erosión fluvial (Summerfield y Hulton, 1994; Wilkinson y McElroy, 2007). Las áreas montañosas con elevaciones superiores a 3.25 km contribuyen con más del 73% de los sedimentos que llegan a los océanos (Wilkinson y McElroy, 2007).

La tasa de sedimentación (D_n), mide el flujo vertical de sedimentos hacia superficies de deposición (kg m⁻² año⁻¹), y varía en el tiempo, alternando entre períodos de sedimentación rápida y momentos de deposición lenta, y según la proximidad a la fuente de sedimento y a la producción de sedimentos (Syvitski 2003a). Los sedimentos son almacenados temporalmente en áreas que se inundan con frecuencia, incluidos lagos, abanicos aluviales, llanuras de inundación, zonas de avulsión y deltas costeros (Syvitski et al., 2022). Aunque gran parte de los sedimentos erosionados se depositan inmediatamente adyacentes a su fuente (Wilkinson y McElroy, 2007; Restrepo et al., 2015).

Generalmente las cargas de sedimentos suspendidos están relacionadas con el caudal (Morehead et al., 2003). El caudal de los ríos está fuertemente influenciado por oscilaciones climáticas como el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), prueba de esto en Sudamérica, los principales ríos muestran variaciones interanuales y estacionales significativas en el transporte de sedimentos y caudal (Probst y Tardy, 1989; Restrepo y Kjerfve 2000). Los ríos pequeños muestran una variabilidad interanual más alta, puesto que estos tienen mayores cambios en los flujos intra-
anuales (Morehead et al., 2003).

3. EL ANTROPOCENO: IMPACTO HUMANO EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FLUVIALES HACIA LOS OCÉANOS

El Antropoceno es una época geológica propuesta, que resalta el impacto humano en el planeta, especialmente desde la "Gran Aceleración" a mediados del siglo XX, cuando las emisiones y el uso de recursos aumentaron exponencialmente, y aunque no ha sido oficialmente reconocido como una unidad geológica por la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS), el término es ampliamente utilizado para describir los cambios ambientales derivados de las actividades humanas (Syvitski y

[Kettner, 2011](#); [Zalasiewicz et al., 2024](#)). Paul Crutzen introdujo este concepto en el año 2000, señalando que el Antropoceno marca una alteración irreversible del sistema terrestre, diferenciándose del Holoceno, que se caracterizó por una estabilidad atmosférica y oceánica ([Zalasiewicz et al., 2024](#)).

Las actividades humanas han transformado significativamente el transporte global de sedimentos, hasta el punto de que ahora se consideran uno de los principales factores que controla la llegada de los sedimentos a los océanos ([Milliman y Meade, 1983](#); [Syvitski et al., 2005b](#); [Syvitski y Kettner, 2011](#)).

3.1 CAMBIOS EN LA PRODUCCIÓN Y RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

Desde 1950, la movilización de sedimentos por procesos naturales aumentó a 22.4 Gt anuales, superando considerablemente el promedio del Cuaternario de 17.8 Gt anuales ([Syvitski et al., 2022](#)). Sin embargo, el transporte de sedimentos suspendidos disminuyó a 7.2 Gt anuales para 2010, principalmente debido a la retención de sedimentos en presas ([Vörösmarty et al., 2003](#); [Meybeck y Vörösmarty., 2005](#); [Syvitski et al., 2005b](#)) (**Tabla 1, Figura 1a**).

A nivel global, cerca de 1,100 ríos transportan el 90% del escurrimiento terrestre, mientras que 450 de ellos son responsables del 90% del transporte fluvial total ([Syvitski et al., 2022](#)). En 1950, los ríos transportaban alrededor de 15.7 ± 1.5 Gt año⁻¹ de carga detrítica (Q_T), cifra que se redujo a 7.7 ± 0.9 Gt año⁻¹ para 2010 ([Syvitski et al., 2022](#)) (**Tabla 1**). Esta carga Q_T además de incluir la carga suspendida (Q_s) y de fondo (Q_b), contiene un 1.5% de carbono orgánico particulado (POC, por sus siglas en inglés), debido a su estrecha relación con el Q_s ([Stallard, 1998](#)). Cada año, los ríos descargan al océano 0.24 Gt de POC, 0.21 Gt de carbono orgánico disuelto y 0.38 Gt de carbono inorgánico disuelto ([Lyons et al., 2002](#); [Huang et al., 2012](#)) (**Tabla 1**).

El lavado de rocas y suelos, medido por la carga disuelta en los ríos, también ha disminuido debido a la reducción en la escorrentía de agua dulce, pasando de 3.9 Gt anuales en 1950 a 3.6 Gt en 2010 ([Milliman y Farnsworth, 2011](#)) (**Tabla 1**). Este descenso se atribuye a actividades humanas como la explotación de acuíferos, desviación de aguas superficiales, deforestación, agricultura, minería y la construcción de presas ([Vörösmarty y Sahagian, 2000](#), [Restrepo et al., 2015](#)).

En 1950, la producción de sedimentos de origen humano se estimaba en 44.2 Gt anuales, casi el doble del transporte natural (22.4 Gt anuales) ([Syvitski et al., 2022](#)). La erosión del suelo provocada

por la deforestación y la agricultura representaba la mayor parte de esta producción, con 25 Gt anuales, seguida por la minería y la producción de desechos (10 Gt), y la construcción (7.5 Gt) (Syvitski et al., 2022) (Tabla 1, Figura 1b).

Para 2010, la minería y la producción de residuos se convirtieron en las principales fuentes de sedimentos, la producción se incrementó un 467%, alcanzando los 250.5 Gt anuales (Syvitski et al., 2022) (Tabla 1, Figura 1b). Este incremento fue impulsado por el aumento en la producción global de carbón y sus residuos asociados (74 Gt por año), la extracción de otros minerales, junto con la eliminación de residuos (28.5 Gt anuales) (Cooper et al., 2018), la producción de agregados (50 Gt anuales) (Waters y Zalasiewicz, 2018), y la extracción de arena, grava de ríos, y costas (2 Gt al año) (Syvitski et al., 2020) (Tabla 1, Figura 1b).

La cantidad de sedimentos retenidos por presas alcanzó los 65 Gt anuales en 2022, lo que ha reducido drásticamente el flujo de sedimentos hacia los océanos (Syvitski et al., 2022) (Tabla 1, Figura 1b). Sin las represas, los ríos transportarían una cantidad mucho mayor de sedimentos al mar. Durante el mismo período, el consumo de sedimentos para actividades humanas como la construcción de infraestructuras, edificios y la fabricación de concreto aumentó de 4.5 Gt en 1950 a 119.5 Gt en 2010, un incremento del 2,550% (Syvitski et al., 2022) (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen del balance de sedimentos para el Antropoceno, comparación de los valores de sedimentos para 1950 y 2010. Tomado y modificado de Syvitski et al. (2022)

Componente del ciclo de sedimentos	Sedimento (Gt por año)		Cambio (%)	Referencia
	1950	2010		
Tasas de producción terrestre en el Antropoceno				
1.Erosión global del suelo (Deforestación y agricultura)	25	75	200	Wilkinson y McElroy, 2007; Ibáñez et al., 2019
2.Construcción global	7.5	22.5	200	Wilkinson, 2005; Hooke, 2000
3.Minería y producción de residuos	10	101	910	Syvitski et al., 2020; Cooper et al., 2018

4.Producción global de agregados	1.6	50	3,025	Syvitski et al., 2020; Waters y Zalasiewicz, 2018
5.Minería de arena y grava de las costas y los ríos	0.1	2	1,9	Syvitski et al., 2020
6.Total (1+2+3+4+5)	44.2	250.5	467	
Tasas de consumo en el Antropoceno				
7.Sequestro global de sedimentos en embalses	2.8	65	2,221	Syvitski et al., 2020
8.Consumo global de sedimentos para carreteras	0.1	20	19,900	Syvitski et al., 2020
9.Consumo de carbón	0.7	5.6	700	Cooper et al., 2018
10.Consumo global de concreto	0.9	28.5	3,067	Waters y Zalasiewicz, 2018
11.Total	4.5	119.1	2,547	
Transporte de tierra a océano en el Antropoceno				
12.Carga fluvial suspendida global (Q _s)	14.5 ± 1.5	7.2 ± 0.9	-50	Syvitski y Kettner, 2011; Syvitski et al., 2022
13.Carga fluvial de lecho global (Q _b)	1 ± 0.4	0.3 ± 0.2	-70	Syvitski y Kettner, 2011; Syvitski et al., 2022
14.Carga fluvial disuelta global (Q _d)	3.9	3.6	-7.3	Milliman y Farnsworth, 2011
Carbón orgánico disuelto global	0.21	0.21	?	Huang et al., 2012
Carbón inorgánico disuelto global	0.38	0.38	?	Huang et al., 2012
15.Carbón orgánico particulado global	<0.24	<0.24	?	Lyons et al., 2002
16.Flujo eólico de tierra a mar (Q _a)	1.5	1.5	?	Syvitski et al., 2019b; Tanaka y Chiba, 2006; Maher et al., 2010

17.Flujos de erosión costera global (Q _c)	0.5	>0.5	?	Hay, 1994
18.Flujos de agua de deshielo glacial (Q _m)	0.2	1	400	Overeem et al., 2017; Bamber et al., 2018
19.Flujos globales de sedimentos de icebergs (Q _i)	0.6	3	400	Overeem et al., 2017; Bamber et al., 2018
20.Total (12+13+14+15+16+17+18+19)	22.4	17.3	-23	
Carga potencial de partículas fluviales				
21.Depósitos de embalses que probablemente han llegado al océano costero	2.1	48	2,186	Hay, 1994; Syvitski et al., 2022
22.Total (12+13+15+21)	17.8	55.7	212	
Alteración del Antropoceno en los sedimentos marinos				
23. Transporte global de re-suspensión por arrastre	2.9	22	659	Oberle et al., 2016; Rousseau et al., 2019
24.Dragado y recuperación de tierras	0.7	9.8	1,3	Cooper et al., 2018
25.Total (23+24)	3.6	31.8	783	
Carga total en el Antropoceno (6+20+25)	70.2	299.6	327	

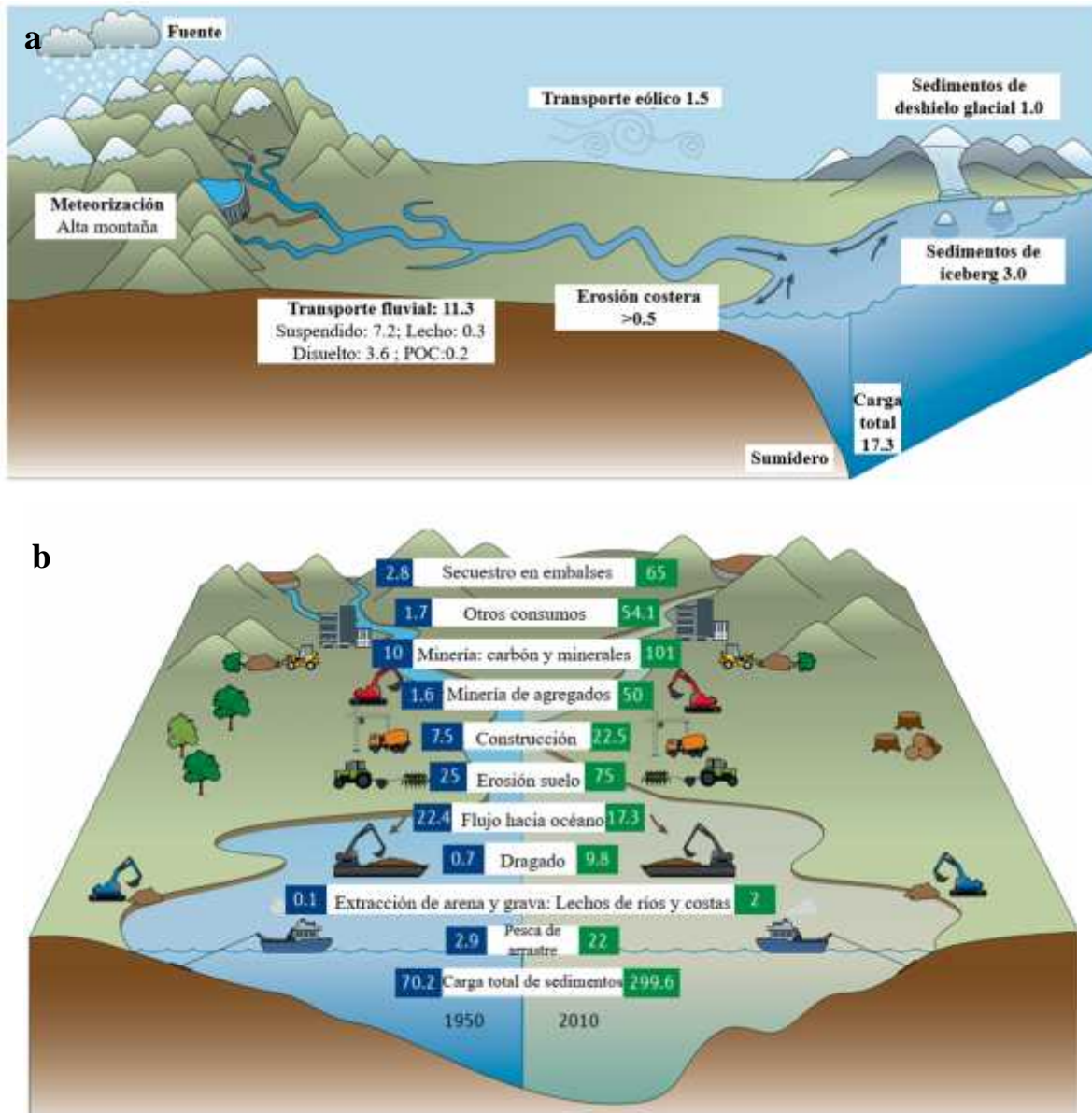


Figura 1. Creciente impacto de la actividad humana sobre el transporte de sedimentos. **a)** Transporte de sedimentos desde el continente al océano en Gt por año para 2010, para ver los valores de 1950 ver la **Tabla 1.** **b)** Comparación de las cargas de sedimentos para el Antropoceno (año 1950 y 2010). Ambas figuras fueron tomadas y modificadas de Syvitski et al. (2022).

3.2 ESTIMACIÓN DE LAS CARGAS DE SEDIMENTOS FLUVIALES PREHUMANAS Y DEL ANTROPOCENO: MODELOS ART, QRT Y BQART

Para estimar las cargas de sedimentos previas a la intervención humana, Syvitski et al. (2005b) emplearon los modelos de transporte de sedimentos “Área Relieve Temperatura” (ART) y “Caudal Relieve Temperatura” (QRT). El modelo ART, basado en datos de 340 ríos que cubren el 70% de las tierras activas hidrológicamente incluye ríos en condiciones prístinas o con datos de sedimentos

anteriores a la influencia humana (Syvitski et al., 2005b). El valor estimado de Q_s prehumano es de 14 Gt anuales, o incluyendo el valor de Q_b , es de 15.5 Gt año⁻¹, están resumidos en la **Tabla 2**. En esta tabla también se observan las variaciones por regiones, con Asia y América presentando los mayores valores de Q_s , mientras que Indonesia y Oceanía destacan por su alta producción de sedimentos debido a la elevada escorrentía. Las regiones templadas cálidas producen casi 2/3 de la carga global en condiciones prehumanas, mientras que las zonas polares aportan las menores cantidades (Syvitski et al., 2005b). Aproximadamente el 60% de los sedimentos que llegan a la costa provienen de cuencas en zonas montañosas altas (>3000 m) (Syvitski et al., 2005b).

Para modelar el impacto del Antropoceno, los autores utilizaron datos de 1960 a 1995 y el modelo QRT, similar al ART, pero considerando el caudal en lugar del área de cuenca, lo que incorpora cambios en la escorrentía causados por la actividad humana. El modelo incluye la retención de sedimentos en embalses, basándose en datos antes y después de su construcción (Syvitski et al., 2005b). La **Tabla 2** también muestra los valores estimados de la carga sedimentaria en el Antropoceno, con una Q_s de 12.6 Gt anuales, un 10% menos que en el periodo prehumano, debido principalmente a la retención de sedimentos en embalses. Estos embalses retienen el 26% de los sedimentos, y, según los datos presentados en la tabla, sin ellos los ríos transportarían entre 16.2 y 17.8 Gt anuales al océano, incluyendo Q_b (Syvitski et al., 2005b).

África y Asia experimentan la mayor disminución en la entrega de sedimentos hacia la costa, en ríos como el Nilo, Níger, Yangtsé, Indo y Amarillo (Syvitski et al., 2005b). Los mares Mediterráneo y Negro son los mares interiores más impactados por los embalses (Syvitski et al., 2005b).

En las zonas templadas frías, donde se encuentran países industrializados con un alto consumo energético, los embalses retienen el 47% de la carga de sedimentos regional (Syvitski et al., 2005b). Por el contrario, en los trópicos, donde ocurre el 85% de la deforestación global (Hansen et al., 2013), la carga de sedimentos ha aumentado (Syvitski et al., 2005b). Los ríos de montaña muestran una fuerte disminución en el flujo de sedimentos, mientras que en cuencas no montañosas el flujo ha aumentado (Syvitski et al., 2005b).

Tabla 2. Valores de área, caudal, transporte de Qs prehumanas (modelo ART) y en el Antropoceno (modelo QRT) para diferentes tipos de cuencas. Los valores de sedimentos son estimados en las costas. Tomado y modificado de Syvitski et al. (2005b).

	Área (Mkm ²)	Caudal (km ³ /año)	Carga Qs prehumano (Mt/año)	Carga de sedimentos Qs anual (Mt/año)	Carga retenida en reservorios
Masa terrestre					
África	20	3,800	1,310 ± 250	800 ± 100	25%
Asia	31	9,810	5,450 ± 1,300	4,740 ± 800	31%
Australasia	4	610	420 ± 100	390 ± 40	8%
Europa	10	2,680	920 ± 210	680 ± 90	12%
Indonesia	3	4,260	900 ± 340	1,630 ± 300	1%
Norte América	21	5,820	2,350 ± 610	1910 ± 250	13%
Islas oceánicas	0.01	20	4 ± 1	8 ± 3	0%
Sur América	17	11,540	2,680 ± 690	2,450 ± 310	13%
Cuenca oceánica					
Océano Ártico	17	3,570	580 ± 120	420 ± 60	5%
Océano Atlántico	42	18,480	3,850 ± 800	3,410 ± 420	14%
Océano Índico	15	5,060	3,810 ± 1,020	3,290 ± 410	15%
Mares interiores (Endorreicos)	5	400	470 ± 180	140 ± 30	30%
Mar Mediterráneo y Negro	8	710	890 ± 280	480 ± 60	30%
Océano Pacífico	18	10,320	4,430 ± 1,100	4,870 ± 910	26%
Zona climática					
Tropical (>25°C)	17	7,110	1,690 ± 480	2,220 ± 360	16%

Temperatura cálida (10–25°C)	47	21,110	9,070 ± 2,600	8,030 ± 1,250	15%
Temperatura fría (0–10°C)	17	4,760	1,949 ± 250	1,460 ± 160	47%
Polar (<0°C)	24	5,560	1,330 ± 170	900 ± 120	6%
Elevación					
Alta Montaña (>5000 m)	21	12,500	5,120 ± 1,600	4,100 ± 740	31%
Montaña (3000–5000 m)	30	6,420	2,970 ± 610	2,190 ± 340	22%
Baja Montaña (1000–3000 m)	36	12,790	4,670 ± 1,030	4,800 ± 630	12%
Tierras Altas (500–1000 m)	10	3,670	910 ± 180	1,060 ± 110	4%
Tierras bajas (100–500 m)	8	2,560	330 ± 70	360 ± 50	2%
Llanura costera (<100 m)	1	600	30 ± 10	100 ± 20	0%
Global	106	38,540	14,030	12,610	20%

Syvitski y Milliman (2007) desarrollaron el modelo BQART (**Ecuaciones 1, 2, 3**), que integra múltiples factores para estimar el transporte de sedimentos: caudal (Q), temperatura promedio de la cuenca (T), eficiencia de retención de embalses (T_E), erosión glaciaria (I), litología promedio de la cuenca (L), área de la cuenca (A), relieve (R), el ajuste del modelo (w), y la erosión del suelo por influencia humana (E_h). Syvitski y Kettner (2011), usando el modelo sin el factor E_h , estimaron que en condiciones prehumanas los sedimentos suspendidos que llegaban al océano costero eran de $15.1 \pm 0.5 \text{ Gt año}^{-1}$. Al incluir el factor E_h , basado en la densidad de población (PD) y el producto nacional bruto per cápita (PNB), obtuvieron una carga de sedimentos suspendidos en el Antropoceno de $12.8 \pm 0.5 \text{ Gt año}^{-1}$, lo cual representa una disminución del 15% en la cantidad de sedimentos alcanzando el océano.

Esta reducción es superior al 10% estimada por [Syvitski et al. \(2005b\)](#), y se considera más confiable, ya que el modelo BQART mejora la estimación en un 11% frente al modelo ART, el cual tiene una confiabilidad 57%, debido a su integración del término B y la separación entre caudal y área de la cuenca de drenaje ([Syvitski y Milliman, 2007](#)). Los valores reflejan los cambios inducidos por las distintas fases de desarrollo industrial a nivel continental y pueden llegar a variar hasta un orden de magnitud en cuencas específicas ([Syvitski y Kettner, 2011](#)).

$$Q = \omega Q^{0.3} A^{0.5} R^p \quad T \geq 2^\circ\text{C} \text{ (Ecuación 1)}$$

$$Q = 2\omega Q^{0.3} A^{0.5} R^p \quad T < 2^\circ\text{C} \text{ (Ecuación 2)}$$

$$B = I [(1 - T_E)E_n] \text{ (Ecuación 3)}$$

3.3 ACTIVIDADES HUMANAS QUE ALTERAN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FLUVIALES

El transporte de sedimentos en los ríos es altamente sensible a las intervenciones humanas, como lo han demostrado estudios a largo plazo ([Walling y Fang, 2003](#)). Actividades como la deforestación, la agricultura intensiva y la minería aumentan la carga de sedimentos, mientras que otras, como la construcción de presas y la extracción de arena, reducen su transporte ([Walling y Fang, 2003](#); [Walling, 2006](#)). Dependiendo del tipo de intervención y su ubicación, los efectos pueden variar, alterando el equilibrio del transporte de sedimentos a nivel global ([Walling, 2006](#)).

3.3.1 Deforestación, agricultura y minería

La actividad humana ha incrementado el transporte de sedimentos en los ríos del mundo debido a la erosión del suelo, con un aumento estimado en 2.3 ± 0.6 Gt anuales ([Syvitski et al., 2005b](#)). Aunque las tierras agrícolas cubren solo el 11% de la superficie terrestre, estas generan el 50% de la erosión del suelo ([Wilkinson y McElroy, 2007](#)). Las prácticas de agricultura tradicional en campos agrícolas han resultado en tasas de erosión de 10 a 100 veces superiores a las tasas de formación de suelo y a las observadas en suelos con vegetación nativa, llevando la erosión a niveles insostenibles ([Montgomery, 2007](#)). En contraste, la agricultura sin labranza mantiene tasas de erosión más alineadas con la formación de suelo, siendo una opción más sostenible a largo plazo ([Montgomery, 2007](#)).

Desde la década de 1960, la tasa de deforestación se aceleró, coincidiendo con el crecimiento poblacional, especialmente en las regiones tropicales ([Etter et al., 2006](#)). La conversión de bosques

a tierras de cultivo ha incrementado la erosión del suelo y, consecuentemente, la carga de sedimentos en los ríos ([Walling y Fang 2003](#)) (**Figura 2a**). Durante el siglo XIX, el área de bosques tropicales se redujo un 7%, descendiendo al 86% para 1950 y a menos del 70% en la actualidad ([Walling, 2006](#)).

Algunos ríos experimentaron un incremento en las cargas sedimentarias a lo largo del siglo XX, como resultado de la deforestación en el Dniéster y el Amazonas, y la minería en el Kolimá (**Figura 2b**). La situación del bioma del río Araguaia, Brasil, es un claro ejemplo del impacto de la deforestación, entre 1970 y 2000 perdió gran parte de sus bosques de Cerrado debido a la expansión agrícola, siendo el único bioma en el mundo que ha sufrido una destrucción tan rápida en la historia humana, generando unos 232 millones de toneladas de sedimentos almacenados en su canal principal y planicie aluvial, y un incremento del 31% en el transporte de sedimentos de lecho ([Latrubesse et al., 2009](#)).

La minería también ha aumentado significativamente las tasas de erosión y la carga de sedimentos en varios ríos, además de producir relaves que contaminan el agua y afectan los ecosistemas fluviales ([Owens et al., 2005](#)). En el distrito minero de Coeur d'Alene, EE. UU., la minería generó cerca de 115 millones de toneladas de relaves, de las cuales más de 70 millones se depositaron en las llanuras de inundación y el lecho del río ([Owens et al., 2005](#)). En el río Kolimá, en Siberia, la minería de oro intensiva también ha incrementado notablemente la carga de sedimentos ([Walling, 2006](#)).

Ríos como el Amarillo en China (por agricultura intensiva en suelos del “loess” erosivo) ([Wang et al., 2007](#)), el Po en Italia (deforestación y agricultura) ([Syvitski y Kettner, 2007](#)) y el Misisipi en EE. UU. (agricultura intensiva) ([Meade, 1996](#)), registraron un aumento temprano en la carga de sedimentos debido a la actividad humana, pero desde entonces han disminuido la cantidad de sedimentos que son transportados por la proliferación de presas y obras ingenieriles de desviación ([Syvitski y Kettner, 2011](#)) (**Figura 2b**).

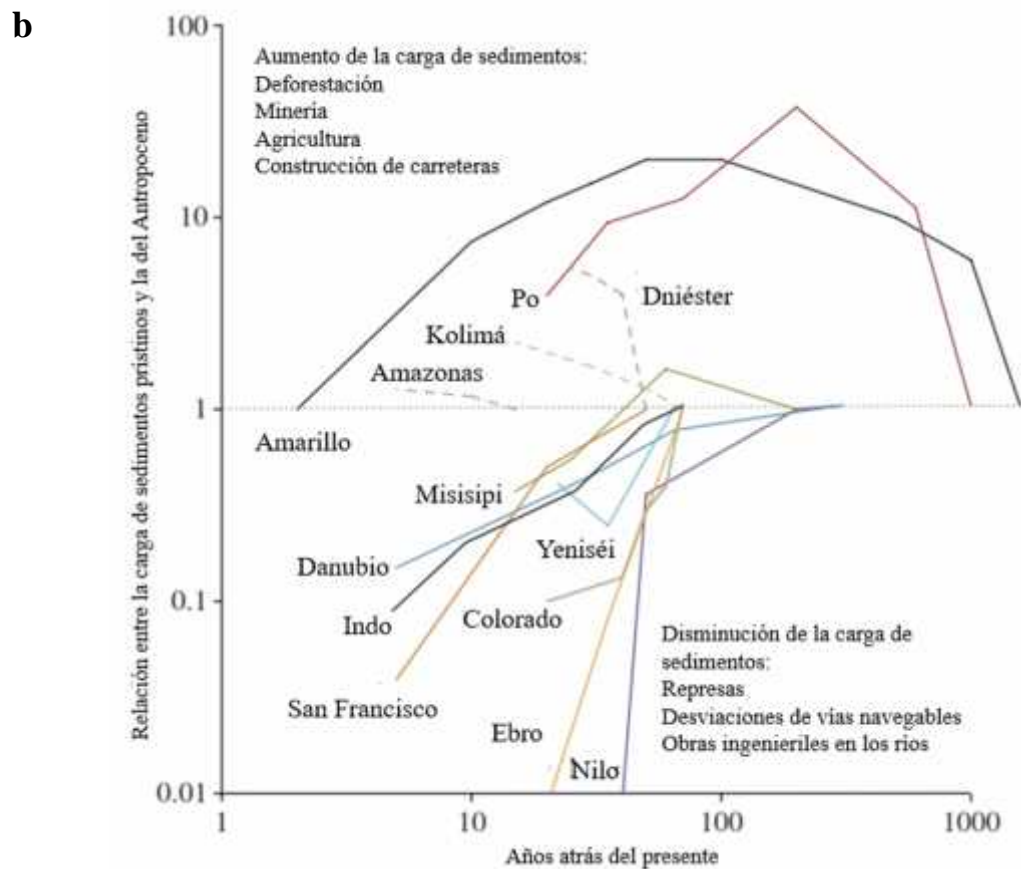


Figura 266. Aumento de los sedimentos debido a actividades como la deforestación, agricultura y minería, provocando mayor erosión de suelo. **a)** Relación de aumento y disminución de la erosión del suelo respecto a actividades humanas. Tomado y modificado de Maaß et al. (2021). **b)** Cambios relativos en la carga de sedimentos transportados por algunos casos de ríos en el mundo sin tener en cuenta la variabilidad climática, Tomado y modificado de Syvitski y Kettner (2011).

3.3.2 Presas e ingeniería fluvial

Cada represa y obra fluvial contribuye a reducir el transporte de sedimentos al retener una porción del material que los ríos transportan (Syvitski et al., 2005). A diferencia de las antiguas represas, ubicadas en áreas elevadas principalmente para generar energía hidroeléctrica, las modernas se construyen frecuentemente en llanuras de inundación para controlar desbordamientos, crear áreas recreativas y desviar agua para el riego (Syvitski y Milliman, 2007). Este atrapamiento de sedimentos tiene un impacto significativo en el flujo global de sedimentos desde tierra hasta el mar, con diferencias en la magnitud del efecto entre continentes debido a la distribución de los embalses y a las cargas de sedimentos de los ríos represados (Walling, 2006).

Después de 1950, se construyó el 95.7% de la capacidad mundial de embalses (>15,000 km³) (Syvitski et al., 2022), lo que ha derivado en que más del 40% del flujo fluvial esté actualmente controlado. Se estima que estas represas han retenido alrededor de 3,200 Gt de sedimentos, impidiendo que aproximadamente el 74% de estos lleguen los océanos (Hay, 1994). Por lo general, las represas logran una eficiencia de retención del 100% para la grava (Maab et al., 2021) (Figura 3a).

La carga potencial de sedimentos fluviales, que combina los transportados con los que habrían sido desplazados sin embalses, era de unos 17.8 Gt anuales en 1950, similar a los niveles del Cuaternario; sin embargo, en 2010 esta carga aumentó a 55.5 Gt año⁻¹ (Syvitski et al., 2022) (Tabla 1). De no existir las presas, una mayor cantidad de estos sedimentos alcanzaría los deltas costeros (Syvitski et al., 2022) (Figura 3a, b).

Excepto en Indonesia, partes de Sudamérica y regiones polares no afectadas por represas, el aporte de sedimentos al océano costero ha estado disminuyendo a nivel global (Syvitski y Kettner, 2011). Ríos como el Danubio y el Yeniseí han visto una significativa reducción en sus cargas sedimentarias, mientras que otros, como el Nilo, Colorado, Ebro, Sao Francisco e Indo, prácticamente no transportan sedimentos (Syvitski y Kettner, 2011) (Figura 2b). La Figura 3b ilustra el impacto humano en la carga sedimentaria de 217 ríos, mostrando que, sin las represas, estos ríos transportarían más sedimentos hacia la costa. Por ejemplo, el río Amarillo tenía una carga de 1.6 Gt año⁻¹ entre 1950 y 1977, pero desde la década de 1980 esta se redujo en más del 50% debido a variaciones climáticas y mejoras en el control de sedimentos (Syvitski et al., 2005b).

Además de las represas, los desvíos de agua también afectan el transporte de sedimentos. Entre ellos, destaca el Proyecto de Transferencia de Agua Sur-Norte en China, que busca incrementar la producción agrícola y mitigar la escasez de agua, así como el Proyecto Nacional de Enlace de Ríos en India (NRLP), que conectará 44 ríos mediante 9,600 km de canales (Syvitski et al., 2022).

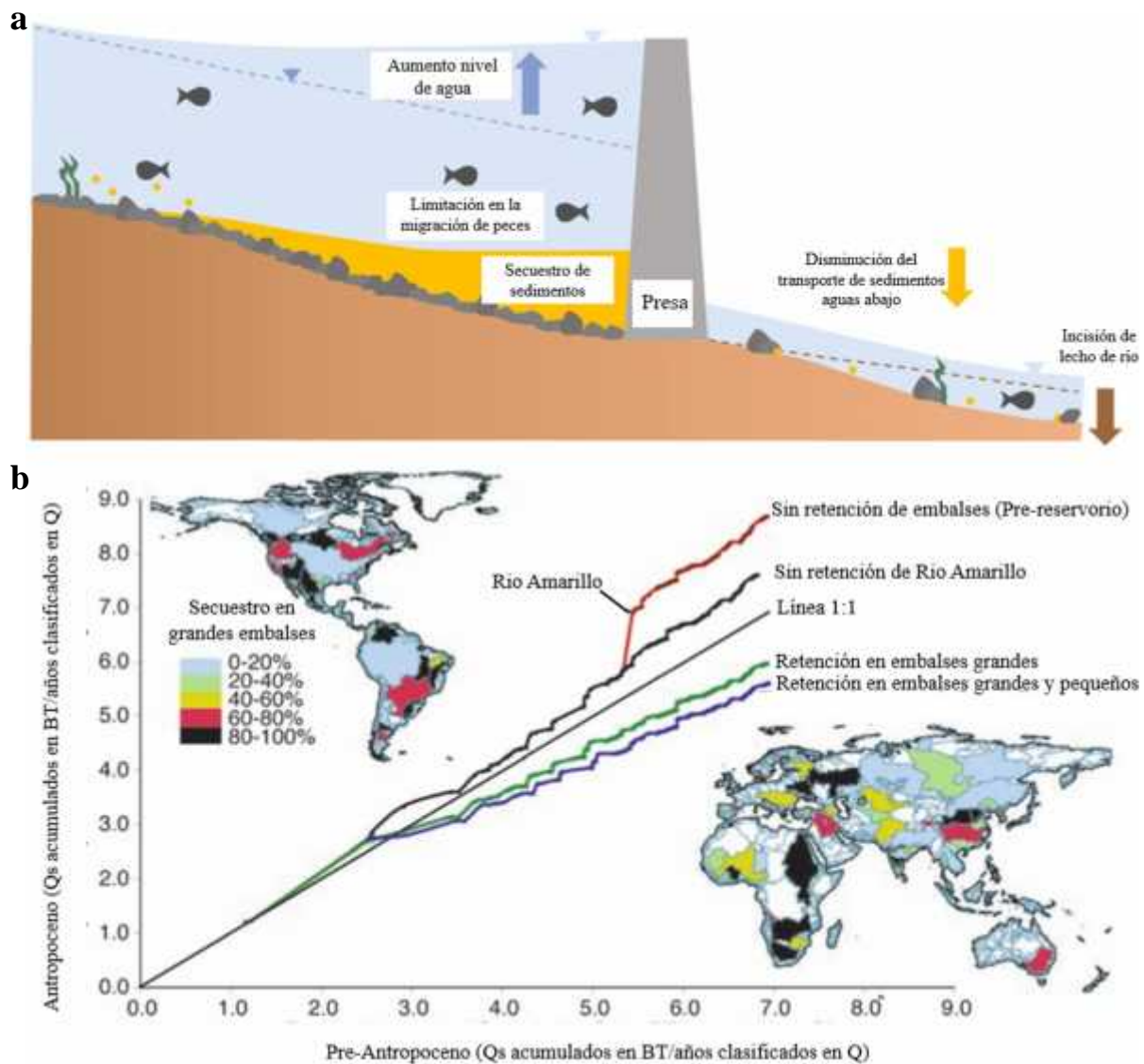


Figura 531. Impactos de la construcción de embalses en el transporte natural de sedimentos. **a)** Consecuencias de la construcción de presas sobre la morfodinámica de un río, tomado y modificado de Maaß et al. (2021). **b)** Comparación de los valores de la carga de sedimentos para el pre-Anthropoceno y el Anthropoceno. La línea 1:1 representa la ausencia de influencia humana, tomado y modificado de Syvitski et al. (2005b).

3.3.3 Extracción de arena y grava

La demanda de arena y grava para proyectos de ingeniería costera, construcción de carreteras y desarrollo de megaciudades (más de 10 millones de habitantes) ha superado la oferta natural disponible (Syvitski et al., 2022). Grandes consumidores de estos recursos son la construcción de autopistas y la producción de concreto: en los 64 millones de kilómetros de carreteras actuales se han utilizado cerca de 200 Gt de arena y grava (Syvitski et al., 2020). En 1950, la producción de concreto consumía aproximadamente 0.9 Gt anuales, pero hoy supera las 27-30 Gt año⁻¹ (Syvitski et al., 2020) (Tabla 1).

La mejor estimación global de la tasa de extracción de arena y grava era de 0.1 Gt por año en 1950 y aumentó a 2 Gt por año en 2010 (Syvitski et al., 2022) (Tabla 1). La extracción de sedimentos en lechos de ríos reduce notablemente el transporte de material fluvial, por ejemplo, los aproximadamente 100 Mt de agregados que se extraen anualmente en el río Mekong son mucho mayores que los 6.2 Mt de arena que se transportan hacia la desembocadura, generando erosión en riberas y costas (Hackney et al., 2020,2021).

3.4 IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DINÁMICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FLUVIALES

Impulsado por la acelerada quema de combustibles fósiles, las temperaturas atmosféricas han aumentado 1.1 °C desde 1900 (Gistemp Team, 2020) como resultado del incremento en gases de efecto invernadero (H₂O, CO₂, CH₄ y N₂O) (Schmidt et al., 2010). Las respuestas globales al calentamiento incluyen el aumento de temperaturas en océanos y continentes, el deshielo del permafrost, la pérdida de masa de los glaciares, la aceleración del aumento del nivel del mar y la intensificación del ciclo hidrológico global (Syvitski et al., 2022).

La temperatura de las cuencas de drenaje influye en la formación del suelo, los procesos de erosión del suelo y las retroalimentaciones climáticas (Syvitski et al., 2022). En las cuencas más cálidas, se generan mayores cantidades de sedimentos que aumentan las cargas fluviales (Syvitski y Milliman, 2007) (Figura 4a). Con el cambio climático, las regiones polares, subpolares y alpinas se convierten en áreas críticas, pues el deshielo del permafrost aporta nuevas fuentes de sedimentos a los sistemas fluviales (Syvitski et al., 2022) (Figura 4b). Por cada incremento de 2 °C en la temperatura media anual de las cuencas del Ártico, se estima que las cargas de sedimentos fluviales podrían aumentar aproximadamente un 30% (Syvitski, 2002). Desde 1950 hasta 2010, el aporte de

las capas de hielo y glaciares pasó de 0.8 Gt anuales a unos 4 Gt anuales (**Tabla 1, Figura 1a**), de los cuales el 25% proviene del derretimiento subglacial y el 75% de desprendimiento de icebergs y deshielos ([Overeem et al., 2017](#)).

Los factores que influyen en la temperatura de los ríos incluyen la temperatura del aire, el punto de rocío, la velocidad del viento, la radiación solar y el flujo térmico de aguas de escorrentía ([Syvitski et al., 2019a](#)). En aguas frías y viscosas, los granos encuentran mayor resistencia para asentarse, mientras que en aguas cálidas la menor viscosidad acelera el asentamiento, lo que reduce el transporte de sedimentos, aunque el aumento de temperatura también eleva la producción de sedimentos en los ríos ([Syvitski et al., 2022](#)).

Si el caudal global aumenta con la intensificación del ciclo hidrológico, los ríos podrían tener mayor capacidad de transporte ([Madakumbura et al., 2019](#)). Sin embargo, los procesos hidrológicos son complejos, ya que dependen de la interacción entre precipitación, evaporación y la variabilidad espacial de la cobertura terrestre ([Syvitski et al., 2022](#)). No se espera que la intensificación del ciclo del agua sea homogénea; los mayores impactos sobre el transporte de sedimentos vendrán de la redistribución de la lluvia ([Syvitski et al., 2022](#)). Solo el 33% de los grandes ríos muestra una correlación significativa entre el transporte de sedimentos y la precipitación ([Li et al., 2019](#)). En áreas de alto relieve y litología suave, un incremento en la precipitación intensificará la producción de sedimentos más que el aumento en el caudal ([Cohen et al., 2014](#)).

La erosión costera, impulsada por olas y mareas, genera unos 0.5 Gt al año ([Wilkinson y McElroy, 2007](#)), y esta cifra ha aumentado debido al ascenso del nivel del mar inducido por el cambio climático, la pérdida de humedales y manglares, y la reducción en el aporte de sedimentos ([Saito et al., 2007](#)).

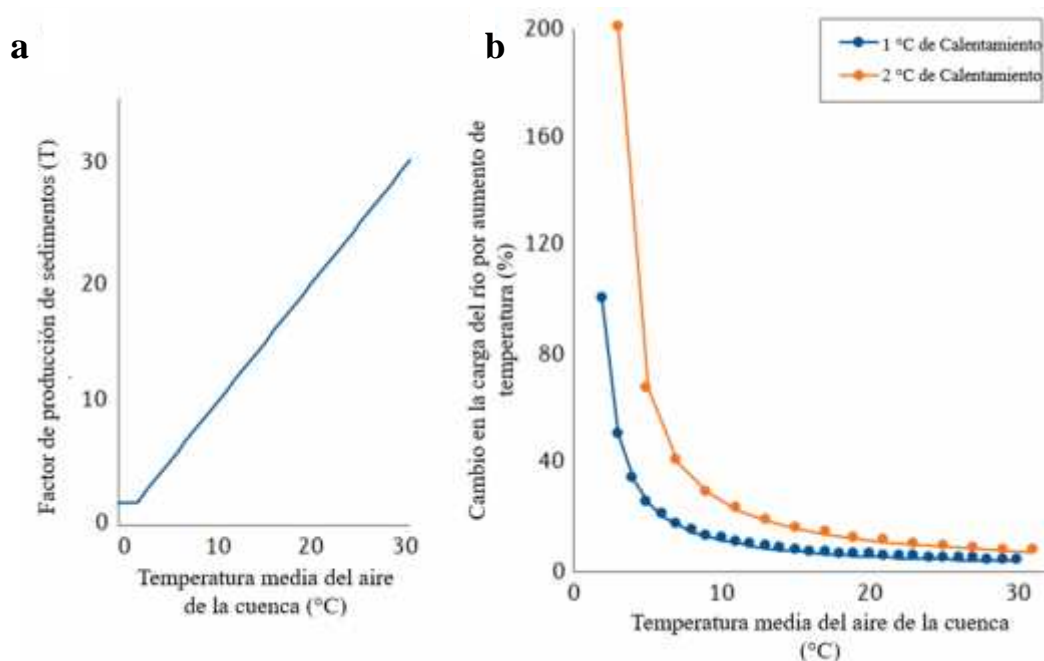


Figura 797. a) Cambio en la producción de sedimentos respecto a la temperatura media del aire de la cuenca. **b)** Cambios en el transporte de sedimentos respecto a la temperatura media del aire de la cuenca. Ambas figuras fueron tomadas y modificadas de Syvitski et al. (2022).

4. CASO ESPECÍFICO: RÍO MAGDALENA

En Colombia, el río Magdalena es el sistema fluvial más grande del país, con una longitud de 1612 km y una cuenca de 257,438 km², abarcando el 24% del territorio nacional (Restrepo y Kjerfve, 2000; Restrepo et al., 2006a) (Figura 5). Nace a 3685 m de altitud en los Andes del norte, una región caracterizada por su alto relieve y frecuente actividad sísmica e ígnea (Kettner et al., 2010). Los depósitos del Mioceno Tardío en el Valle del Magdalena indican que el río comenzó a formarse en esa época, cuando tanto el paleo-Magdalena como el paleo-Cauca se desarrollaron en depresiones tectónicas debido al levantamiento de las Cordilleras Oriental y Central; este control tectónico ha generado laderas de más de 45°, y afluentes de alto relieve (Potter, 1997). Entre sus principales afluentes destacan los ríos Cauca, Sogamoso, San Jorge y Cesar, siendo el Cauca el principal tributario, aporta el 31% de la carga total de sedimentos (Restrepo y Kjerfve, 2000). La cuenca recibe una precipitación promedio anual de 2050 mm, con períodos de baja lluvia de diciembre a marzo y de junio a septiembre, y picos de alta precipitación entre marzo y mayo, y octubre y noviembre (Restrepo y Kjerfve, 2000).

El Magdalena desemboca en el Caribe occidental, formando un delta triangular de 1690 km² (Coleman, 1975). La llanura deltaica, compuesta por planicies aluviales, sistemas lagunares y cordones litorales, ha migrado progresivamente (Vernette, 1985; Vernet et al., 1992). Este río, es el más grande que desemboca directamente en el Mar Caribe, descarga un promedio de 7232 m³s⁻¹ de agua, caudal basado en datos diarios de 21 años (1975-1995) del estudio de Restrepo y Kjerfve (2000). Este estudio confirmó que el río Magdalena es un sistema fluvial de relevancia mundial, ya que presenta una carga de sedimentos suspendidos de 144 Mt año⁻¹ y una producción de sedimentos de 560 t km⁻² año⁻¹. Estos valores lo posicionan como el mayor productor de sedimentos de Suramérica superando incluso a los ríos Amazonas, Orinoco y Paraná, y contribuyendo con aproximadamente el 9% de la carga total de sedimentos descargados en la costa este de América del Sur (Restrepo y Kjerfve, 2000; 2002).

Restrepo y Kjerfve (2000) también identificaron una notable variabilidad interanual en el caudal del río Magdalena, mediante análisis de series temporales confirmaron que los eventos de La Niña se asocian con anomalías positivas tanto en el caudal como en la carga de sedimentos, superando el impacto de El Niño. El análisis de regresión reveló que las variaciones en el Índice de Oscilación del Sur (SOI) explican el 54 % de la variabilidad en la carga de sedimentos y el 69 % en el caudal. Los periodos de mayor descarga de sedimentos hacia el mar ocurren entre noviembre y diciembre, así como entre junio y julio (Restrepo y Kjerfve, 2000).

La erosión en la cuenca del Magdalena está explicada en un 58% por factores naturales, como la escorrentía y el caudal máximo (Restrepo y Syvitski, 2006; Restrepo et al., 2006a). Para simular la influencia de las actividades humanas en el transporte de sedimentos en el Magdalena, se ha utilizado el modelo BQART (Kettner et al., 2010, Restrepo et al., 2015), incorporando un índice de erosión de la vegetación adimensional que es equivalente al factor antropogénico (E_h) utilizado por Kettner y Syvitski (2007). El factor (E_h) tiene en cuenta el efecto que tienen los cambios en la cobertura vegetal sobre las tasas de erosión y producción de sedimentos (Restrepo et al., 2015). Este modelo explica el 82% del transporte de sedimentos en simulaciones realizadas dentro de la cuenca, siempre que se incluyan todos los parámetros del término B (Kettner et al., 2010) (**Ecuación 3**). El modelo mejora su capacidad predictiva cuando se tiene en cuenta la retención de sedimentos en las llanuras aluviales (Kettner et al., 2010). Un ejemplo es el ajuste del 14 % de la carga de sedimentos transportada por los ríos Cauca y Cesar, retenida en la llanura de inundación

de Mompox (Restrepo et al., 2006b). Este análisis sugiere que el modelo BQART debería incorporar un factor específico de almacenamiento en llanuras aluviales para aumentar su precisión (Kettner et al., 2010).

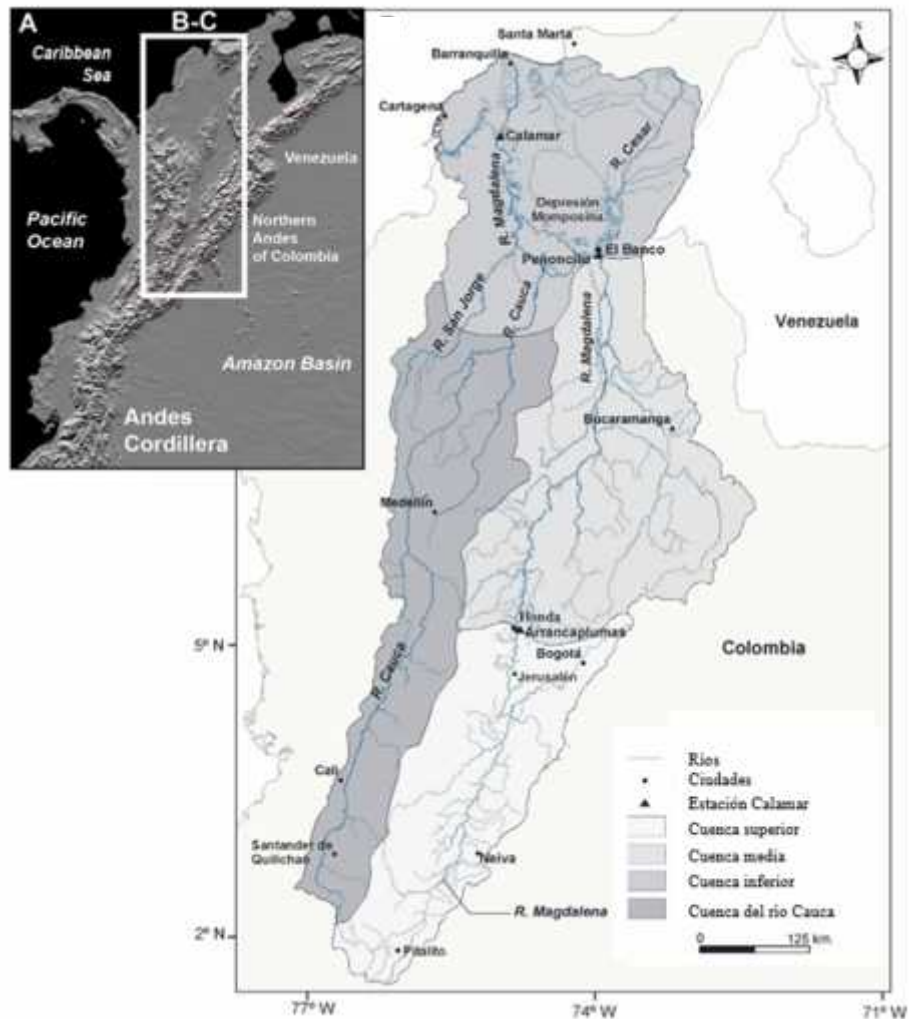


Figura 798. Ubicación de la cuenca de drenaje del río Magdalena, se muestra la sección superior, media e inferior de la cuenca. Tomado y modificado de Restrepo y Escobar (2018).

La deforestación en la cuenca del río Magdalena, que redujo en más del 70 % la cobertura forestal natural entre 1980 y 2010, ha provocado que el 79 % la cuenca se encuentre en un estado erosión severa, produciendo 482 Mt de sedimentos en las últimas tres décadas (Restrepo et al., 2015). Este proceso de deforestación es responsable del 9 % de la carga total de sedimentos del río (Restrepo

et al., 2015). Entre el 2000 y el 2010, la carga sedimentaria anual aumentó un 33% (44 Mt por año), elevando el transporte de sedimentos a 184 Mt año^{-1} , y la producción a $710 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (Restrepo et al., 2015; Restrepo y Escobar, 2018). Estas cifras de aumento de la carga de sedimentos coinciden con el aumento de las tasas de deforestación entre el año 2005 y 2010 (Restrepo y Escobar, 2018) (**Figura 6b**). Antes de la intervención humana, la carga anual de sedimentos del Magdalena oscilaba entre 34 y 84 Mt año^{-1} (Restrepo y Escobar, 2018). Por otro lado, el caudal medio del río Magdalena también experimentó un aumento del 24% entre el 2005 y 2011, alcanzando los 8833 m^3/s (Restrepo et al., 2016a).

A diferencia de muchos grandes ríos del mundo, cuya carga de sedimentos está disminuyendo (Syvitski, 2003b), la del río Magdalena está en aumento debido al impacto de diversas actividades humanas, como la deforestación, la conversión de tierras para agricultura (que ha aumentado en un 65 %), la minería, el crecimiento poblacional y las tasas de urbanización en la cuenca (Restrepo y Syvitski, 2006). Los cultivos de coca, vinculados a dinámicas de conflicto e ilegalidad en el país, han sido responsables de una notable reducción en las áreas de bosque (Dávalos et al., 2011; Quiroga Ángel et al., 2022).

Las fluctuaciones en la carga de sedimentos concuerdan con los aumentos detectados en la deforestación y en las actividades económicas que promueven la producción de sedimentos, sobre todo durante las décadas de mayor intervención humana, como 1980-1990 y 2000-2010 (Restrepo et al., 2015) (**Figura 6a**). Además, en el periodo de 1980-2000, las tasas de erosión aumentaron el 68% de la cuenca, disminuyeron en el 31% y el 1% del área no mostró una tendencia de cambio (Restrepo et al., 2015).

En la cuenca del río Magdalena hay más de 20 represas hidroeléctricas, incluidas Betania y El Quimbo, que operan desde 1987 y 2015, respectivamente (Liedel et al., 2024). Los registros de carga de sedimentos suspendidos en el Valle Alto del Magdalena, entre 1971 y 2014, muestran una disminución notable del flujo de sedimentos tras la construcción de la represa de Betania en 1987 (Liedel et al., 2024). Un análisis simulado con BQART indica que la construcción de esta represa causó una reducción del 30 % en el flujo de sedimentos suspendidos (Liedel et al., 2024). En contraste, en el Valle Alto del Magdalena, la deforestación no se considera un factor significativo en el flujo de sedimentos (Liedel et al., 2024) (**Figura 6d**).

Aunque la reducción de sedimentos en el canal principal del Magdalena en Colombia no causa gran preocupación comparado con casos globales como por ejemplo el Nilo (Walling y Fang, 2003), el estudio de Liedel et al. (2024) demuestra que la construcción de una sola represa puede reducir drásticamente el transporte de sedimentos, subrayando el riesgo de edificar más represas. Además, las variaciones en el transporte de sedimentos y el caudal afectan la evolución y sostenibilidad de los deltas (Syvitski y Saito, 2007; Li et al., 2019; Maab et al., 2021). La retención excesiva de sedimentos en represas no solo impacta los ecosistemas fluviales, sino que también puede tener repercusiones económicas al disminuir la capacidad operativa de las infraestructuras (Maab et al., 2021).

En el delta del Magdalena, la construcción de estructuras ingenieriles, como espigones y diques, altera la dinámica natural del transporte de sedimentos (Restrepo et al., 2016b; Restrepo et al., 2018). Naturalmente, los canales distributarios migran a través de la llanura deltaica o cambian episódicamente de posición, facilitando una gradación y sedimentación generalizada (Syvitski et al., 2009). Syvitski y Saito (2007) y Syvitski et al. (2009), señalan que en el delta del Magdalena se ha reducido el número de canales distributarios debido a estas construcciones, lo que afecta la deposición de sedimentos en llanuras aluviales y ecosistemas asociados, como la Ciénaga de Marroquí, la cual prácticamente perdió su conexión con el canal principal del río por la construcción de espigones a lo largo del canal que desemboca en Bocas de Ceniza (Restrepo et al., 2016b).

En años recientes, se ha identificado la subsidencia en los deltas como un nuevo impacto humano, resultado de la compactación acelerada por la minería subterránea de petróleo, gas y agua subterránea, así como por el drenaje y la oxidación acelerada del suelo, superando las tasas de aumento global del nivel del mar (Syvitski et al., 2009). En el delta del Magdalena aún no se han realizado estudios sobre la subsidencia ni sobre sus causas e implicaciones, lo cual sería relevante abordar en investigaciones futuras.

Los deltas y estuarios son áreas de gran importancia ecológica y económica, además de ser núcleos claves para la población y la actividad agrícola (Pont et al., 2002; Ericson et al., 2006). La protección de los deltas es crucial, ya que ofrecen defensa natural contra la intrusión de mareas ciclónicas y evitan la reducción excesiva en el suministro de sedimentos, lo que protege la línea de costa frente a la erosión (Syvitski et al., 2005a).

Las zonas prioritarias para la gestión de sedimentos incluyen las áreas altas de las cuencas, donde la alta escorrentía en pendientes pronunciadas, junto con la actividad tectónica, incrementa la erosión, así como las cuencas de los ríos Sogamoso y Cauca, que están significativamente afectadas por actividades humanas (Restrepo et al., 2006a).

La implementación de políticas ambientales, la planificación urbana y la gestión de recursos deben considerar las variaciones que ocurren a lo largo de la cuenca del río Magdalena, especialmente debido a que el 80 % de la población colombiana reside en esta cuenca, la cual aporta el 86 % del PIB del país (Restrepo y Escobar, 2018).

Estimar la carga de sedimentos y el caudal del río Magdalena es esencial para la gestión de las zonas costeras y sus recursos (Syvitski, 2003). Un ejemplo claro de su relevancia es la comprensión de cómo las grandes descargas de sedimentos y agua desde el Canal del Dique hacia la Bahía de Cartagena han contribuido de manera significativa a la degradación de la calidad del agua y a la desaparición parcial de ecosistemas vitales, como las formaciones de coral y los pastos marinos, tanto en la bahía como en sus áreas adyacentes (Restrepo et al., 2006b; Restrepo, 2008; Restrepo et al., 2016a) (**Figura 6c**).

Un ejemplo de ciencia para evaluar la conectividad hídrica río Magdalena-zona costera es el proyecto BASIC, el cual realiza monitoreos hidrológicos y oceanográficos en la Bahía de Cartagena, el Canal del Dique y la cuenca del Río Magdalena (Tosic et al., 2024). Este proyecto es una muestra de cómo se pueden cambiar políticas públicas con ciencia, y de cómo la ciencia es una herramienta para la toma de decisiones. Tiene por objetivo proveer material científico para el manejo integrado de los recursos hídricos en la zona costera de Cartagena, queriendo lograr una reducción de riesgos de contaminación, la conservación de servicios ecosistémicos y la adaptación al cambio climático (Restrepo et al., 2014). Gracias a los datos obtenidos para el desarrollo de este proyecto se comprobó que el área de influencia del Río Magdalena llegaba hasta las Islas del Rosario, y con esto se logró que las autoridades ambientales incluyeran los ecosistemas del Archipiélago del Rosario, en los planes nacionales de restauración y protección del Canal del Dique (Restrepo et al., 2014).

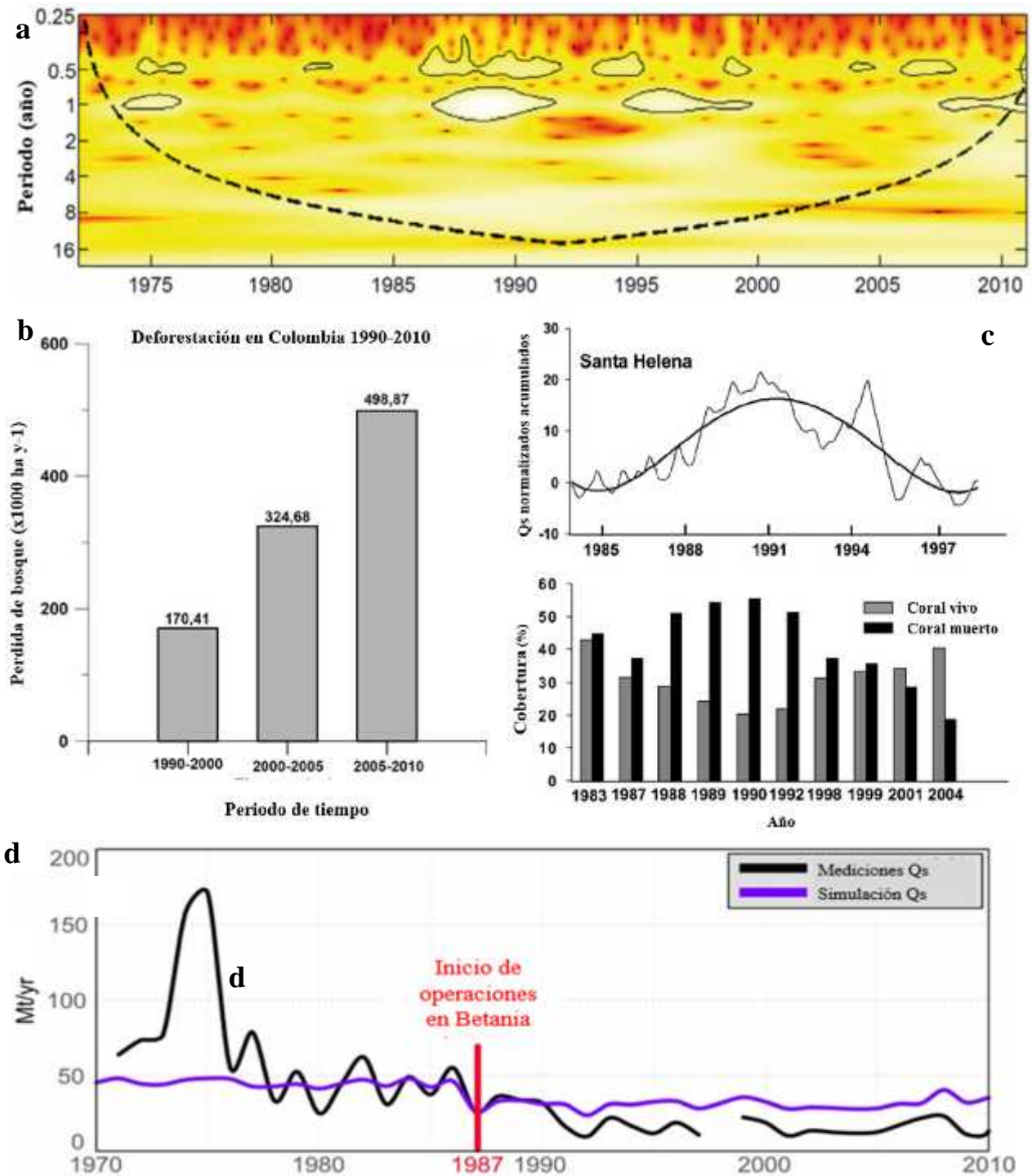


Figura 6. Impactos de las actividades humanas en la cuenca del río Magdalena. **a)** Pulsos de la descarga de sedimentos suspendidos del río Magdalena, se evidencia grandes picos en las décadas de 1980 a 1990 y 2000 a 2010, que coinciden con las décadas de mayor actividad humana dentro del río Magdalena. **b)** Periodos de deforestación desde 1990 a 2010. Figuras **a** y **b** tomadas y modificadas de Restrepo et al. (2015). **c)** Relación entre la alta descarga de sedimentos y la muerte de corales en las Islas del Rosario. Tomado y modificado de Restrepo et al. (2006b). **d)** Cambios en el transporte de sedimentos desde el inicio de operación de la represa Betania. Tomado y modificado de Liedel et al. (2024).

5. CONCLUSIONES

Actividades humanas, como la deforestación, la agricultura, la minería y la construcción de represas, han alterado significativamente la producción, el transporte y la acumulación de sedimentos en las cuencas fluviales.

Durante el Antropoceno, se ha observado una disminución en la carga global de sedimentos, estimándose en 12.8 ± 0.5 Gt por año, lo que representa un 15% menos en comparación con el periodo prehumano, a pesar al aumento de 2.3 Gt por año debido a la erosión del suelo. Esta disminución se le atribuye a la retención de cerca del 26% sedimentos en los embalses, los cuales, sin el efecto de las presas llegarían al océano. La disminución en el transporte de sedimentos hacia la costa es más marcada en ciertas áreas continentales, como en los países industrializados con grandes embalses, por ejemplo, ríos como el Nilo y el Yangtsé. Por otro lado, en regiones donde la presencia de embalses es limitada y se han intensificado la deforestación, la agricultura y la minería, la carga de sedimentos ha aumentado, como es el caso del río Magdalena. Los procesos de transporte natural juegan un papel cada vez menor en el movimiento de sedimentos en la Tierra.

Se han creado y optimizado modelos numéricos para estimar la carga de sedimentos fluviales, como el modelo BQART, que proporciona estimaciones más precisas al incluir variables como el factor humano (E_h), eficiencia de retención de embalses (T_E), y el caudal (Q). Esto es esencial en el contexto actual del Antropoceno, donde la actividad humana altera el transporte de sedimentos.

Ahora bien, los análisis del transporte de sedimentos y el balance global tienen dos grandes limitantes que impiden avances científicos en este campo, y son la falta de monitoreo de la mayoría de los ríos a nivel global, es decir, no cumplen con el requisito de 30 años de monitoreo, y la dependencia de los modelos, porque, aunque dan buenas estimaciones, es necesario mejorarlos para reconocer tendencias históricas y futuras de las acciones humanas.

La alteración en el flujo de sedimentos tiene importantes consecuencias para los ecosistemas acuáticos y costeros, afectando la biodiversidad y el equilibrio ambiental de las áreas que dependen de estos recursos hídricos. Es fundamental que las políticas públicas y la gestión de los recursos naturales se adapten a los cambios observados en el transporte de sedimentos, impulsando prácticas sostenibles que tomen en cuenta el impacto de las actividades humanas en los ecosistemas de Colombia y de cada país del mundo.

6. REREFENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bamber, J. L., Westaway, R. M., Marzeion, B., & Wouters, B. (2018). The land ice contribution to sea level during the satellite era. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063008.
- Cohen, S., Kettner, A. J., & Syvitski, J. P. (2014). Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: Continental trends and intra-basin sensitivity. *Global and Planetary Change*, 115, 44-58.
- Coleman, J. M., & Wright, L. D. (1975). Modern river deltas: Variability of processes and sand bodies. In M. L. Broussard (Ed.), *Deltas: Models for exploration* (pp. 99–149). Houston Geological Society.
- Cooper, A. H., Brown, T. J., Price, S. J., Ford, J. R., & Waters, C. N. (2018). Humans are the most significant global geomorphological driving force of the 21st century. *The Anthropocene Review*, 5(3), 222-229.
- Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W. B., Lin, J. C., Hsu, M. L., ... & Stark, C. P. (2004). Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt. *Geology*, 32(8), 733-736.
- Dávalos, L. M., Bejarano, A. C., Hall, M. A., Correa, H. L., Corthals, A., & Espejo, O. J. (2011). Forests and drugs: Coca-driven deforestation in tropical biodiversity hotspots. *Environmental Science & Technology*, 45(4), 1219-1227.
- Ericson, J. P., Vörösmarty, C. J., Dingman, S. L., Ward, L. G., & Meybeck, M. (2006). Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change*, 50(1-2), 63-82.
- Etter, A., McAlpine, C., Phinn, S., Pullar, D., & Possingham, H. (2006). Unplanned land clearing of Colombian rainforests: Spreading like disease? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 240-254.
- Gistemp Team. (2020). GISS surface temperature analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies. Dataset accessed, 17.
- Hackney, C. R., Darby, S. E., Parsons, D. R., Leyland, J., Best, J. L., Aalto, R., ... & Houseago, R. C. (2020). Riverbank instability from unsustainable sand mining in the lower Mekong River. *Nature Sustainability*, 3(3), 217-225.
- Hackney, C., Vasilopoulos, G., Heng, S., Darbari, V., Walker, S., & Parsons, D. (2021). Sand mining far outpaces natural supply in a large alluvial river. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 2021, 1-20.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., & Loveland, T. R. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853.

- Hay, W. W. (1994). Pleistocene-Holocene fluxes are not the Earth's norm. En *Material fluxes on the surface of the Earth* (pp. 15-27).
- Hooke, R. L. (2000). On the history of humans as geomorphic agents. *Geology*, 28(9), 843-846
- Huang, T. H., Fu, Y. H., Pan, P. Y., & Chen, C. T. A. (2012). Fluvial carbon fluxes in tropical rivers. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(2), 162-169.
- Ibáñez, C., Alcaraz, C., Caiola, N., Prado, P., Trobajo, R., Benito, X., ... & Syvitski, J. P. M. (2019). Basin-scale land use impacts on world deltas: Human vs natural forcings. *Global and Planetary Change*, 173, 24-32.
- Kettner, A. J., Gomez, B., & Syvitski, J. P. M. (2007). Modeling suspended sediment discharge from the Waipaoa River system, New Zealand: The last 3000 years. *Water Resources Research*, 43(7).
- Kettner, A. J., Restrepo, J. D., & Syvitski, J. P. M. (2010). A spatial simulation experiment to replicate fluvial sediment fluxes within the Magdalena River Basin, Colombia. *The Journal of Geology*, 118(4), 363-379.
- Latrubesse, E. M., Amsler, M. L., de Morais, R. P., & Aquino, S. (2009). The geomorphologic response of a large pristine alluvial river to tremendous deforestation in the South American tropics: The case of the Araguaia River. *Geomorphology*, 113(3-4), 239-252.
- Latrubesse, E. M., & Restrepo, J. D. (2014). Sediment yield along the Andes: Continental budget, regional variations, and comparisons with other basins from orogenic mountain belts. *Geomorphology*, 216, 225-233.
- Li, L., Ni, J., Chang, F., Yue, Y., Frolova, N., Magritsky, D., ... & Walling, D. E. (2020). Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers. *Science Bulletin*, 65(1), 62-69.
- Liedel, S., Caracciolo, L., Restrepo, J. C., Weltje, G. J., Lucà, F., Beltrán-Triviño, A., & Restrepo Ángel, J. D. (2024). A quantitative provenance analysis (QPA) approach to quantify controls on sediment generation and sediment flux in the upper reaches of the Magdalena River (Colombia): 1. Natural and anthropic controls on the sand fraction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129(5).
- Lyons, W. B., Nezat, C. A., Carey, A. E., & Hicks, D. M. (2002). Organic carbon fluxes to the ocean from high-standing islands. *Geology*, 30(5), 443-446.
- Maaß, A. L., Schüttrumpf, H., & Lehmkuhl, F. (2021). Human impact on fluvial systems in Europe with special regard to today's river restorations. *Environmental Sciences Europe*, 33(1), 119.

- Madakumbura, G. D., Kim, H., Utsumi, N., Shiogama, H., Fischer, E. M., Seland, Ø., ... & Oki, T. (2019). Event-to-event intensification of the hydrologic cycle from 1.5°C to a 2°C warmer world. *Scientific Reports*, 9(1), 3483.
- Maher, B. A., Prospero, J. M., Mackie, D., Gaiero, D., Hesse, P. P., & Balkanski, Y. (2010). Global connections between aeolian dust, climate, and ocean biogeochemistry at the present day and at the last glacial maximum. *Earth-Science Reviews*, 99(1-2), 61-97.
- Meade, R. H. (1996). River-sediment inputs to major deltas. In *Sea-level rise and coastal subsidence: Causes, consequences, and strategies* (pp. 63-85). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Meybeck, M., & Vörösmarty, C. (2005). Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes: From natural Holocene variations to Anthropocene. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1-2), 107-123. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.09.016>
- Milliman, J. D., & Meade, R. H. (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, 91(1), 1-21.
- Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharges to the ocean: The importance of small mountainous rivers. *The Journal of Geology*, 100(5), 525-544.
- Milliman, J. D., & Farnsworth, K. L. (2011). Runoff, erosion, and delivery to the coastal ocean. In *River discharge to the coastal ocean: A global synthesis* (pp. 13-69). Cambridge University Press.
- Morehead, M. D., Syvitski, J. P., Hutton, E. W., & Peckham, S. D. (2003). Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 95-110.
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(33), 13268-13272.
- Oberle, F. K., Storlazzi, C. D., & Hanebuth, T. J. (2016). What a drag: Quantifying the global impact of chronic bottom trawling on continental shelf sediment. *Journal of Marine Systems*, 159, 109-119.
- Overeem, I., Hudson, B. D., Syvitski, J. P., Mikkelsen, A. B., Hasholt, B., Van Den Broeke, M. R., ... & Morlighem, M. J. N. G. (2017). Substantial export of suspended sediment to the global oceans from glacial erosion in Greenland. *Nature Geoscience*, 10(11), 859-863.
- Owens, P. N., Batalla, R. J., Collins, A. J., Gomez, B., Hicks, D. M., Horowitz, A. J., ... & Trustrum, N. A. (2005). Fine-grained sediment in river systems: Environmental significance and management issues. *River Research and Applications*, 21(7), 693-717.

- Pont, D., Day, J. W., Hensel, P., Franquet, E., Torre, F., Rioual, P., ... & Coulet, E. (2002). Response scenarios for the deltaic plain of the Rhone in the face of an acceleration in the rate of sea-level rise with special attention to Salicornia-type environments. *Estuaries*, *25*, 337-358.
- Potter, P. E. (1997). The Mesozoic and Cenozoic paleodrainage of South America: A natural history. *Journal of South American Earth Sciences*, *10*(5-6), 331-344.
- Probst, J. L., & Tardy, Y. (1989). Global runoff fluctuations during the last 80 years in relation to world temperature change. *American Journal of Science*, *289*(3), 267-285.
- Quiroga Angel, V., Pablo, S., & Wagner, H. H. (2022). The effect of illicit crops on forest cover in Colombia. *Journal of Land Use Science*, *17*(1), 47-59.
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Magdalena River: Interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, *235*(1-2), 137-149.
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2002). River discharge, sediment load, and sediment yield estimates for the Magdalena River and other Caribbean rivers of Colombia: Environmental implications. In B. Kjerfve, H. Kremer, W. Salomons, & J. M. Crossland (Eds.), *CariBas — Activities in River Catchments and their Impacts on Coastal Systems in the Caribbean* (LOICZ-IGBP Report, vol. 23).
- Restrepo, J. D., Kjerfve, B., Hermelin, M., & Restrepo, J. C. (2006a). Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: The Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology*, *316*(1-4), 213-232.
- Restrepo, J. D., & Syvitski, J. P. (2006). Assessing the effect of natural controls and land use change on sediment yield in a major Andean River: The Magdalena drainage basin, Colombia. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, *35*(2), 65-74.
- Restrepo, J. D., Zapata, P., Díaz, J. M., Garzón-Ferreira, J., & García, C. B. (2006b). Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Global and Planetary Change*, *50*(1-2), 33-49.
- Restrepo, J. D. (2008). Applicability of LOICZ catchment–coast continuum in a major Caribbean basin: The Magdalena River, Colombia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *77*(2), 214-229.
- Restrepo, J., Tosic, M., Cárdenas, J., Caballero, S., & Gómez, D. (2014). *Basin Sea Interaction with Communities*. BASIC Cartagena. <https://www.basic-cartagena.org/investigadores.html>
- Restrepo, J. D., Kettner, A. J., & Syvitski, J. P. (2015). Recent deforestation causes rapid increase in river sediment load in the Colombian Andes. *Anthropocene*, *10*, 13-28.

- Restrepo, J. D., Park, E., Aquino, S., & Latrubesse, E. M. (2016a). Coral reefs chronically exposed to river sediment plumes in the southwestern Caribbean: Rosario Islands, Colombia. *Science of the Total Environment*, 553, 316-329.
- Restrepo, J. C., Schrottke, K., Traini, C., Ortíz, J. C., Orejarena, A., Otero, L., ... & Marriaga, L. (2016b). Sediment transport and geomorphological change in a high-discharge tropical delta (Magdalena River, Colombia): Insights from a period of intense change and human intervention (1990–2010). *Journal of Coastal Research*, 32(3), 575-589.
- Restrepo, J. D. (2017). Arrastrando la montaña hacia el mar: Hacia dónde van nuestros océanos. *Agenda del Mar*.
- Restrepo, J. D., & Escobar, H. A. (2018). Sediment load trends in the Magdalena River basin (1980–2010): Anthropogenic and climate-induced causes. *Geomorphology*, 302, 76-91.
- Restrepo, J. D., Escobar, R., & Totic, M. (2018). Fluvial fluxes from the Magdalena River into Cartagena Bay, Caribbean Colombia: Trends, future scenarios, and connections with upstream human impacts. *Geomorphology*, 302, 92-105.
- Rosati, J. D. (2005). Concepts in sediment budgets. *Journal of Coastal Research*, 21(2), 307-322.
- Rousseau, Y., Watson, R. A., Blanchard, J. L., & Fulton, E. A. (2019). Evolution of global marine fishing fleets and the response of fished resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(25), 12238-12243.
- Saito, Y., Chaimanee, N., Jarupongsakul, T., & Syvitski, J. P. (2007). Shrinking megadeltas in Asia: Sea-level rise and sediment reduction impacts from case study of the Chao Phraya Delta. *Inprint Newsletter of the IGBP/IHDP Land Ocean Interaction in the Coastal Zone*, 2(39).
- Schmidt, G. A., Ruedy, R. A., Miller, R. L., & Lacis, A. A. (2010). Attribution of the present day total greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D20).
- Stallard, R. F. (1998). Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(2), 231-257.
- Summerfield, M. A., & Hulton, N. J. (1994). Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B7), 13871-13883.
- Syvitski, J. P. (2002). Sediment discharge variability in Arctic rivers: Implications for a warmer future. *Polar Research*, 21(2), 323-330.
- Syvitski, J. P. (2003a). Sediment fluxes and rates of sedimentation. En *Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks* (pp. 600-606). Kluwer Academic Publishers.

- Syvitski, J. P. (2003b). Supply and flux of sediment along hydrological pathways: Research for the 21st century. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 1-11.
- Syvitski, J. P., Peckham, S. D., Hilberman, R., & Mulder, T. (2003). Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: A planetary perspective. *Sedimentary Geology*, 162(1-2), 5-24.
- Syvitski, J. P., Harvey, N., Wolanski, E., Burnett, W. C., Perillo, G. M., Gornitz, V., ... & Yim, W. W. S. (2005a). Dynamics of the coastal zone. In *Coastal Fluxes in the Anthropocene: The Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Project of the International Geosphere-Biosphere Programme* (pp. 39-94). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Syvitski, J. P., Vörösmarty, C. J., Kettner, A. J., & Green, P. (2005b). Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 308(5720), 376-380.
- Syvitski, J. P., & Kettner, A. J. (2007). On the flux of water and sediment into the Northern Adriatic Sea. *Continental Shelf Research*, 27(3-4), 296-308.
- Syvitski, J. P., & Milliman, J. D. (2007). Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *The Journal of Geology*, 115(1), 1-19.
- Syvitski, J. P., & Saito, Y. (2007). Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change*, 57(3-4), 261-282.
- Syvitski, J. P., Kettner, A. J., Overeem, I., Hutton, E. W., Hannon, M. T., Brakenridge, G. R., ... & Nicholls, R. J. (2009). Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2(10), 681-686.
- Syvitski, J. P., & Kettner, A. (2011). Sediment flux and the Anthropocene. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1938), 957-975.
- Syvitski, J., Cohen, S., Miara, A., & Best, J. (2019a). River temperature and the thermal-dynamic transport of sediment. *Global and Planetary Change*, 178, 168-183.
- Syvitski, J. P. M., Kettner, A. J., Overeem, I., Brakenridge, G. R., & Cohen, S. (2019b). Latitudinal controls on siliciclastic sediment production and transport. En *Latitudinal controls on stratigraphic models and sedimentary concepts* (pp. 14-28). Geological Society Special Publication.
- Syvitski, J., Waters, C. N., Day, J., Milliman, J. D., Summerhayes, C., Steffen, W., ... & Williams, M. (2020). Extraordinary human energy consumption and resultant geological impacts beginning around 1950 CE initiated the proposed Anthropocene Epoch. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 32.

- Syvitski, J., Restrepo, J. D., Saito, Y., Overeem, I., Vörösmarty, C. J., Wang, H., & Olago, D. (2022). Earth's sediment cycle during the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(3), 179-196.
- Tanaka, T. Y., & Chiba, M. (2006). A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget. *Global and Planetary Change*, 52(1-4), 88-104.
- Tosic, M., & Restrepo, J. D. (2024). Sustainability impacts of sediments on the estuary, ports, and fishing communities of Cartagena Bay, Colombian Caribbean. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 11(3), e1709.
- Vernette, G. (1985). *La plateforme continentale caraibe de Colombie (du de' bouche' du Magdalena au Golfe de Morrosquillo). Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la se'dimenattion* [Tesis de doctorado, Université Bordeaux I, Bordeaux, Francia].
- Vernette, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceño, L., & Gayet, J. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian margin. *Tectonophysics*, 202, 335-349.
- Vörösmarty, C. J., & Sahagian, D. (2000). Anthropogenic disturbance of the terrestrial water cycle. *Bioscience*, 50(9), 753-765.
- Vörösmarty, C. J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., & Syvitski, J. P. (2003). Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 169-190.
- Wang, H., Yang, Z., Saito, Y., Liu, J. P., Sun, X., & Wang, Y. (2007). Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): Impacts of climate change and human activities. *Global and Planetary Change*, 57(3-4), 331-354.
- Waters, C. N., & Zalasiewicz, J. (2018). Concrete: The most abundant novel rock type of the Anthropocene. En *Encyclopedia of the Anthropocene* (pp. 75-85).
- Walling, D. E., & Webb, B. W. (1996). Erosion and sediment yield: A global overview. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-International Association of Hydrological Sciences*, 236, 3-20.
- Walling, D. E., & Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 111-126.
- Walling, D. E. (2006). Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 79(3-4), 192-216.
- Wilkinson, B. H. (2005). Humans as geologic agents: A deep-time perspective. *Geology*, 33(3), 161-164.

Wilkinson, B. H., & McElroy, B. J. (2007). The impact of humans on continental erosion and sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 119(1-2), 140-156.

Zalasiewicz, J., Adeney Thomas, J., Waters, C. N., Turner, S., & Head, M. J. (2024). The meaning of the Anthropocene: Why it matters even without a formal geological definition. *Nature*, 632(8027), 980-984.