Erosión y transporte de sedimentos durante eventos El Niño a lo largo de los Andes occidentales

Dr. Sergio B. Morera Julca
Investigador Científico del Instituto Geofísico del Perú

Doctor en Recursos Hídricos e Ingeniero de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Actualmente es investigador científico en el Instituto Geofísico del Perú (IGP), donde se desempeña como especialista en hidrología y transporte de sedimentos fluviales para el área de Investigación en Variabilidad y Cambio Climático. Recientemente sus estudios están enfocados en contribuir al entendimiento de la dinámica de las tasas de erosión a lo largo de los Andes centrales mediante el monitoreo in situ del flujo sólido total, así como el tratamiento de bases de datos fisiográficos y climáticos globales.

Caracterización del área de estudio

La vertiente del Pacífico peruano ocupa el 21.8% de la superficie del territorio nacional (ANA, 2009) y está situada entre los 2° y 18° de latitud sur (Figura 1). Sus cuencas montañosas sufren un intenso desgaste físico-químico de los suelos (proceso de desertificación). Además, son el origen y la principal fuente de recursos hídricos para el 65% de la población peruana. Por otra parte, los principales y más grandes proyectos hidráulicos del Perú se encuentran en esta región. En este sentido, el aprovechamiento del recurso hídrico (poblacional, hidro-electricidad, irrigación, etc.) es puesto en riesgo debido a las altas cargas del sedimento fluvial, las cuales afectan los ecosistemas acuáticos, disminuyen el tiempo de vida útil de las obras hidráulicas e incluso contribuyen a los conflictos debido a la disminución de la disponibilidad del agua (calidad del agua). La vertiente del Pacífico presenta un fuerte gradiente climático-altitudinal, que va desde un clima ecuatorial en el norte hasta la zona más desértica en el sur. A ello se suma una fuerte y compleja variabilidad espacio-temporal del ciclo hidrológico producida a nivel diario, estacional e interanual y muchos autores (Aceituno, 1988; Marengo et al., 1998; Soden, 2000; Garreaud y Aceituno, 2001; Rao et al., 2002) atribuyen la variabilidad climática interanual a El Niño, siendo esta influencia particularmente marcada en la costa norte (ver Lavado y Espinoza, 2014; Woodman y Takahashi, 2014). En resumen, esta región andina es un laboratorio natural ideal para estudiar el comportamiento regional de las tasas de erosión, así como los procesos que intervienen en sus cuencas.

Estrategias de muestreo para detectar el ciclo de la producción de sedimentos en cuencas de montaña

La incertidumbre es una característica inherente de las mediciones de los procesos en los sistemas de los recursos hídricos (ej: Raje y Mujumdar, 2010). Más aún cuando se producen fenómenos El Niño extraordinarios (1982-83 y 1997-98; ver Takahashi, 2014), donde las cuencas de montañas tropicales producen grandes cantidades de sedimentos, que varían ampliamente especialmente durante eventos de crecidas (e.g.; Dietrich y Dunne, 1978; Meybeck et al., 2003).

Basando el análisis en registros continuos de los niveles del agua, material en suspensión (MES), horario y aforos periódicos, se evalúo la incertidumbre durante la estimación anual y mensual de los flujos de sedimentos en cuatro cuencas de montaña (1757-10411 km^2). La información obtenida fue descompuesta en una base de datos numéricos con el fin de simular nuevas series de muestreo a diferentes frecuencias (diaria, pentadiaria, semanal, decadiaria, mensual, bimensual) a partir de las cuales se analizó la incertidumbre producida por

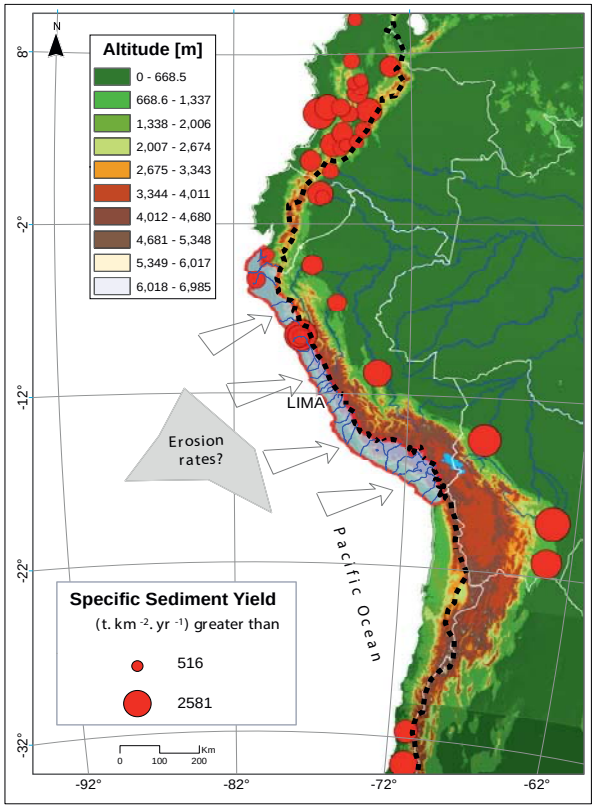


Figura 1. Recopilación de la distribución espacial de la producción de sedimentos a lo largo de los Andes hacia el piedemonte o la vertiente del Pacífico, Atlántico y Caribe. Los círculos en rojo están en proporción al caudal sólido específico; el centroide da la ubicación de la estación donde se monitorea la cuenca (Morera et al., 2013a). El área sombreada indica la ausencia del conocimiento de la transferencia de los sólidos a lo largo de los Andes occidentales.

una estrategia de muestreo a baja frecuencia. Mediante pruebas estadísticas comparamos los datos modelados y los observados al percentil de 25 y 75 y se observó una alta variabilidad temporal reflejada en un amplio rango de la desviación estándar que va desde 1.3 hasta 11.7 veces su magnitud. Los resultados indican que la estrategia de muestreo para las cuencas altoandinas estudiadas puede variar entre seis a doce días (moderado), lo cual produciría una subestimación del ~20% durante una estimación anual de la producción de sedimentos (SY). Por otro lado, para estimar la SY a nivel mensual y durante la época de lluvias (enero-abril) se requiere un intervalo de muestreo que va de uno a cinco días (intenso) y que incluiría un error de ± 40%. Sin embargo, para el periodo de estiaje (junio-setiembre) puede ser realizado una vez al mes, con un error del ± 45% y representa menos del 2% de la estimación de la SY a una escala anual. La caracterización de la estrategia de muestreo en época húmeda durante eventos El Niño extraordinarios (1982-83 y 1997-98), muestra que las frecuencias de muestreo antes mencionadas deben de reducirse a la mitad de tiempo (muestreo de intenso a automático), en el cual el error anual asciende a 300% (mayor información en Morera et al., 2013b).

Transporte de los flujos sólidos durante años normales

El presente año Morera (2014) cuantificó y caracterizó la señal de la magnitud y frecuencia del transporte de sedimentos desde los Andes hacia el Océano Pacífico. Las muestras de sedimentos fueron tomadas a la salida de veinte cuencas (638-16949 km^2), ubicadas entre los 2 y 18° de latitud sur. El análisis estadístico de las series diarias y subdiarias revela un fuerte gradiente latitudinal y longitudinal, con escorrentías que fluctúan entre 2.4 y 25.3 l.km^2.año^{-1}, así como un amplio rango de caudal sólido específico que va de 26 a 1948 t.km^2.año^{-1}. Los resultados señalan que hay una muy fuerte variación temporal de los flujos sólidos donde el material en suspensión muestra una respuesta inmediata a la escorrentía durante los picos de descarga. El análisis interanual entre la escorrentía y la producción de sedimentos indica una correlación que varía entre 0<r<9.0 (p<0.05) a lo largo del Pacífico.

Contribución de eventos El Niño extraordinarios a la erosión en cuencas de montaña

La transferencia de materiales sólidos desde las cabeceras de cuencas hacia las áreas costeras y/o mar refleja la denudación de los continentes y contribuye a nuevos depósitos ambientales.

Durante años normales la producción de sedimentos es influenciada por la presencia de montañas (pendiente y elevación), geología, cobertura vegetal, clima y actividad antrópica. Sin embargo, durante eventos El Niño, el movimiento de grandes volúmenes de sedimentos es frecuente y se presenta mediante un proceso de erosión rápido y dramático. Es así que, bajo estos escenarios se encuentran eventos catastróficos con mayor frecuencia (deslizamientos), debido al largo gradiente de energía potencial entre las partes altas y el piedemonte.

En el norte del Perú los caudales incrementan fuertemente durante los eventos El Niño. La resuspensión de los granos de sedimento finos del fondo del río con el aumento del caudal es la causa del mayor incremento de los sólidos suspendidos. Cuando esto sucede en series repetitivas el sedimento disponible en el lecho se irá agotando. Sin embargo, durante períodos de calma, los sedimentos del lecho se sustituyen por el depósito de sedimentos recién erosionados. Como resultado, una gran dispersión se observa a menudo en la relación a corto plazo entre la concentración de sedimento y la descarga del río. Este proceso causa en los datos una sucesión de curvas de histéresis en sentido horario, como se observa para la estación El Tigre (Figura 3). Para el caso específico de las cuencas en el norte y sur del Perú, lo antes mencionado se agrava considerando que los eventos de descarga críticos, muy frecuentes durante El Niño, removerán y transportarán el sedimento de la ladera de la cuenca y del lecho del río. Las arenas, limos y arcillas transportados por estos eventos intensos causarán la obstrucción de los poros del suelo afectando la permeabilidad del suelo e incrementando la escorrentía en toda la superficie de la cuenca. Otra característica de los El Niño extraordinarios es el incremento del área que participa en la SY, debido a la presencia de fuertes precipitaciones en la cuenca baja (zona árida y semiárida) que llegan a formar lagunas aluviales en la costa norte del Perú. En resumen, las tasas de erosión a lo largo de los Andes se incrementan en mayor orden debido a la alta frecuencia de los eventos de crecida extremos, los cuales, a la vez, activan la remoción del amplio *stock* de sedimentos disponibles en el lecho del río y las laderas.

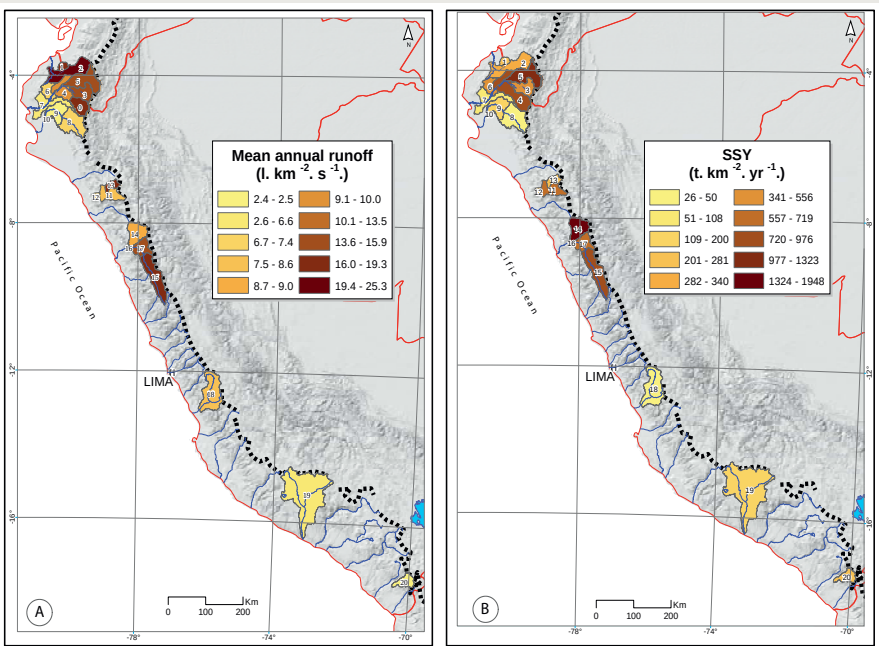


Figura 2. a) Fuerte gradiente latitudinal y longitudinal de la escorrentía en los Andes occidentales. b) Variabilidad espacial los flujos sólidos a lo largo de la costa del Perú; no guarda una clara relación espacial con la escorrentía. Se observa un fuerte gradiente longitudinal, con las mayores tasas de erosión en el norte y centro. Las tasas de erosión más bajas se encuentran en el sur durante años hidrológicos normales.

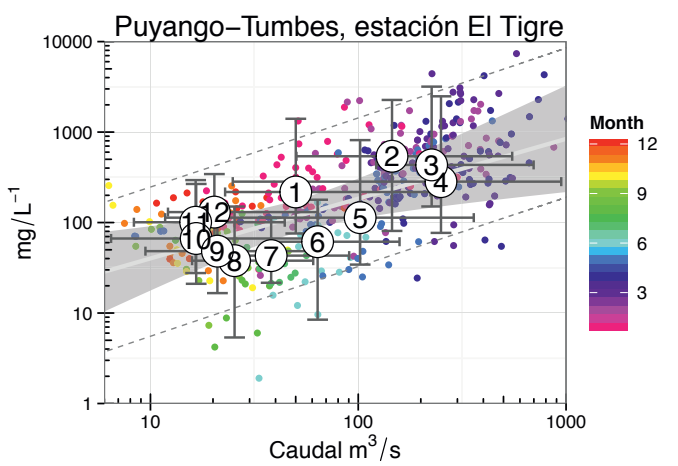
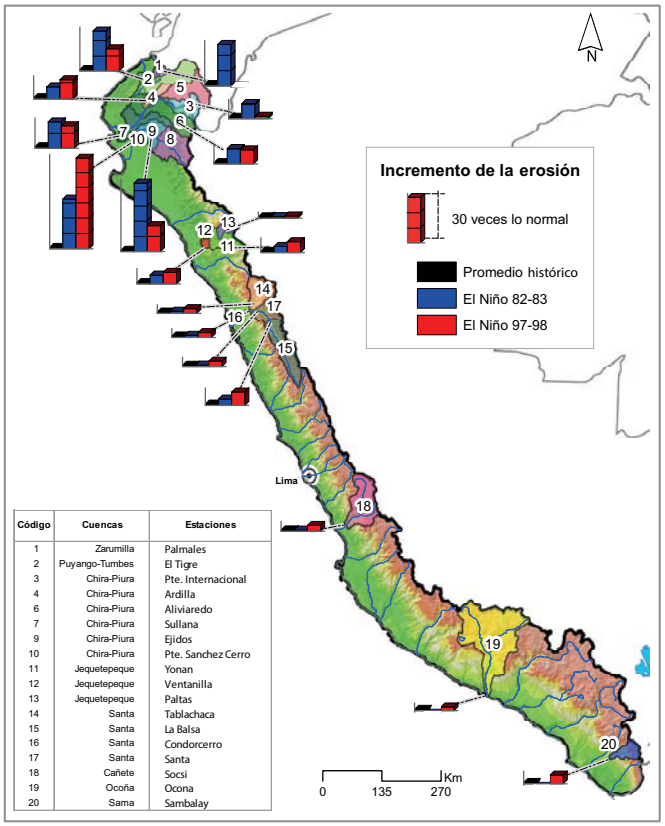


Figura 3. Correlación log-log entre los registros históricos del caudal líquido y la materia en suspensión de la cuenca Puyango-Tumbes a la altura de la estación hidrosedimentológica El Tigre. El color de los puntos indica el mes de registro. La numeración en los círculos blancos representa el promedio mensual de los registros. Las barras de error están calculadas en base al cuantil 5 y 95 de los datos mensuales. La línea central representa la relación entre el caudal y la materia en suspensión para el periodo (2004-2013) y las líneas punteadas representan las tendencias a un 10 y 90 percentil.



Código	Cuencas	Estaciones
1	Zarumilla	Palmales
2	Puyango-Tumbes	El Tigre
3	Chira-Piura	Pte. Internacional
4	Chira-Piura	Ardilla
6	Chira-Piura	Aliviaredo
7	Chira-Piura	Sullana
9	Chira-Piura	Ejidos
10	Chira-Piura	Pte. Sanchez Cerro
11	Jequetepeque	Yonan
12	Jequetepeque	Ventanilla
13	Jequetepeque	Paltas
14	Santa	Tablachaca
15	Santa	La Balsa
16	Santa	Condorcerro
17	Santa	Santa
18	Cañete	Socsi
19	Ocoña	Ocona
20	Sama	Sambalay

Figura 4. Variación espacial de la transferencia de los flujos sólidos normalizada en los Andes occidentales durante años normales y durante El Niño extraordinarios 1982-83 y 1997-98. Para el área en estudio se puede observar un fuerte gradiente longitudinal, con las mayores tasas en el norte y las menores tasas en el sur durante años hidrológicos normales.*

La Figura 4 muestra las tasas de erosión estimadas para el El Niño extraordinario 1982-1983 y 1997-1998 que fueron calculadas a partir de datos observados y estimadas a partir de la curva de gasto sólido. A pesar de la incertidumbre que genera, esta curva da un estimado de las masas de caudal sólido durante dichos eventos. La cuantificación de la producción de sedimentos durante los eventos El Niño extraordinarios muestra que las variaciones temporales son decisivas para el transporte de sedimentos a lo largo de la costa peruana. Las tasas actuales de erosión cambiarían fuertemente de 1 a 65 veces el promedio histórico**, encontrando las mayores tasas en el norte el Perú. Las tasas de erosión observadas en la Figura 4 para este evento marcan cifras críticas a nivel mundial. Finalmente, la variabilidad espacial es mucho más marcada en el norte del Perú.

Nuevo estado del arte de la sedimentología en el Perú

Documentar las tasas de erosión, sus patrones y procesos es crucial para la caracterización de su evolución en una región montañosa. Sin embargo, el principal reto para el estudio de los sedimentos es el registro y la disponibilidad de la información hidro-sedimentológica.

Recientes investigaciones corroboraron la importancia del aporte de las cuencas de montaña en el balance anual global del transporte de sedimentos fluviales (ej: Farnsworth y Milliman, 2003). En América del Sur la mayor producción de sedimentos (SY) proviene de los Andes (Gibbs, 1967; Guyot et al., 2007; Meade, 2007; Laraque et al., 2009), sin embargo, estudios del caudal sólido específico (SSY)*** a lo largo de los Andes muestran un gran vacío en el monitoreo y cuantificación del SSY en cuencas de los Andes occidentales (Figura 1). Por ejemplo, Pepin et al. (2013) cuantificaron los caudales específicos más elevados en los Andes orientales de Bolivia (río Beni) con un promedio de 3000 $t.km^2.año^{-1}$; Restrepo et al. (2006) para Colombia cuantificaron las tasas más elevadas en el río andino de Carare 2200 $t.km^2.año^{-1}$; Pépin et al., (2010) en los Andes chilenos en el río Maipo un máximo de 1780 $t.km^2.año^{-1}$ y Laraque et al. (2009) para el río Napo, en los Andes de Ecuador, 1577 $t.km^2.año^{-1}$; para el Perú, Morera et al. (2011) reportaron 2204 $t.km^2.año^{-1}$ para la cuenca del Tablachaca. Esta última estimación hace de la vertiente del Pacífico una zona interesante para la cuantificación de las tasas de erosión. No obstante dichos avances, en el Perú lo alcanzado en el transporte de sedimentos ha sido limitado en comparación con otras ramas de la hidrología. Recientemente una nueva e inédita base de datos de sedimentos a corto y largo alcance (1948-2012) fue puesta a disposición (Morera, 2014) con registros continuos de los niveles del río, aforos periódicos, registros de turbidez y material en suspensión (MES) horario. El monitoreo del área en estudio se realiza desde veinte estaciones de piedemonte (638-16949 km^2). Los resultados mostraron una alta variación temporal de los flujos de sedimentos donde el MES responde inmediatamente a la escorrentía durante las descargas pico. El análisis estadístico

**Normalizada en base al promedio histórico del caudal sólido específico.*

***El promedio histórico no incluye los años El Niño 82-83 y 97-98.*

****SSY: el caudal sólido específico es la producción de sedimentos normalizada por el área de la cuenca.*

de las series diarias y subdiarias indica un fuerte gradiente latitudinal y longitudinal, cuyos rangos de escorrentía varían de 2.4 a 25.3 $l.km^2.s^{-1}$; mientras que el caudal sólido específico presenta rangos mucho más críticos (26 a 1948 $t.km^2.año^{-1}$). Un análisis inter-anual entre la escorrentía y los caudales específicos sólidos (SSY) muestran un amplio rango de correlación $0<r<0.9$ ($p<0.05$) a lo largo de la vertiente del Pacífico. Por otra parte, la variación temporal y espacial de los flujos sólidos en el Perú se incrementa dramáticamente durante eventos extremos (ej. El Niño 1982-83 y 1997-98). Como consecuencia los caudales específicos sólidos se incrementan de 1 a 65 veces el promedio histórico anual, estas muestran un amplio rango de sensibilidad de erosión frente a eventos extremos a lo largo de los Andes occidentales.

Referencias

Aceituno, P., 1988: On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate, Monthly Weather Review, 116: 505-524, doi: 10.1175/1520-0493(1988)116<0505:OTFOTS>2.0.CO;2.

ANA, 2009: Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos del Perú, Comisión técnica multisectorial.

de Vente, J., J. Poesen, G. Verstraeten, G. Govers, M. Vanmaercke, A. Van Rompaey, M. Arabkhedri, and C. Boix-Fayos, 2013: Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand?, Earth-Science Reviews, 127 (0): 16-29, doi: 10.1016/j.earscirev.2013.08.014.

Dietrich, W. E., and T. Dunne, 1978: Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain, Zeits, Geomorphology, 29, 191-206.

Farnsworth, K. L., and J. D. Milliman, 2003: Effects of climatic and anthropogenic change on small mountainous rivers: The Salinas River example, Global and Planetary Change, 39, 53-64, doi: 10.1016/S0921-8181(03)00017-1.

Garreaud, R., and P. Aceituno, 2001: Interannual rainfall variability over the South American Altiplano, Journal of Climate, 14, 2779-2789.

Gibbs, R. J., 1967: The geochemistry of the Amazon River system: Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the Suspended Solids, Geological Society of America Bulletin, 78, 1203-1232.

Gupta, A., 2007: Large Rivers Geomorphology and Management, England: John Wiley & Sons, LTd, 659.

Guyot, J. L., J. M. Jouanneau, L. Soares, G. R. Boaventura, N. Maillet, and C. Lagane, 2007: Clay mineral composition of river sediments in the Amazon Basin, Catena, 71, 340-356.

Lagos, P., Y. Silva, E. Nickl, and K. Mosquera, 2008: El Niño - related precipitation variability in Peru, Advances in Geosciences, 14, 231-237, doi: 10.5194/adgeo-14-231-2008.

Laraque, A., C. Bernal, L. Bourrel, J. Darrozes, F. Christophoul, E. Armijos, P. Fraizy, R. Pombosa, and J. L. Guyot, 2009: Sediment budget of the Napo River, Amazon basin, Ecuador and Peru, Hydrological Processes, 23, 3509-3524, doi: 10.1002/hyp.7463.

Lavado, W., y J. C. Espinoza, 2014: Entendiendo los impactos de diferentes tipos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, N°3, Marzo, Instituto Geofísico del Perú.

Marengo, J. A., J. Tomasella, and C. R. Uvo, 1998: Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru, Journal of Geophysical Research, 103 (D2), 1775-1783, doi: 10.1029/97JD02551.

Meade, R., 2007: Large Rivers Geomorphology and Management, England: John Wiley & Sons, LTd, 45-64.

Meybeck, M., L. Laroche, H. H. Durr, and J.P.M. Syvistski, 2003: Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers, Global and Planetary Change, 39, 65-93.

Montecinos, A., and P. Aceituno, 2003: Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies, Journal of Climate, 16 (2), 281-296, doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2.

Morera, S. B., 2014: Magnitud, frecuencia y factores que controlan los flujos sedimentarios desde los Andes centrales occidentales hacia el océano Pacífico peruano, Doctoris Philosophiae, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru, 176.

Morera, S. B., T. Condom, A. Crave, P. Vauchel, and C. Galvez, 2011: Erosion rates and dynamics flow of sediments over the Santa River Basin in Peru, Revista Peruana geo-atmosférica, Geo-Armosférica, 3, 25-37.

Morera, S. B., T. Condom, P. Vauchel, J. L. Guyot, C. Galvez, and A. Crave, 2013a: Pertinent spatio-temporal scale of observation to understand suspended sediment yield control factors in the Andean Region: the case of the Santa River (Peru), Hydrology and Earth System Sciences, 17, 4641-4657, doi: 10.5194/hess-17-4641-2013.

Morera, S. B., A. Mejia-Marcacuzco, J. L. Guyot, C. Gálvez, F. Salinas, M. Collas, and E. Ingol-Blanco, 2013b: Uncertainty in Suspended Sediment Load Estimates for Mountain Rivers. Case of Study of Central Andes in Peru, Paper presented at the World Environmental and Water Resources Congress, Cincinnati, Ohio. 3216-3225, doi: 10.1061/9780784412947.318.

Pépin, E., S. Carretier, J. L. Guyot, and F. Escobar, 2010: Specific suspended sediment yields of the Andean rivers of Chile and their relationship to climate, slope and vegetation, Hydrological Sciences Journal, 57 (7), 1190-1205.

Pépin, E., J. L. Guyot, E. Armijos, H. Bazan, P. Fraizy, J. S. Moquet, L. Noriega, W. Lavado, R. Pombosa, and P. Vauchel, 2013: Climatic control on eastern Andean denudation rates (Central Cordillera from Ecuador to Bolivia), Journal of South American Earth Sciences, 44, 85-93, doi: j.jsames.2012.12.010.

Raje, D., and P. P. Mujumdar, 2010: Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change, Advances in Water Resources, 33, 312-326, doi: 10.1016/j.advwatres.2009.12.008.

Rao, B., C. Santo, and S. Franchito, 2002: A Diagnosis of Rainfall over South America during the 1997/98 El Nino Event. Part I: Validation of NCEP NCAR Reanalysis Rainfall Data, Journal of Climate, 15, 502-511.

Restrepo, J. D., P. Zapata, J. M. Díaz, J. Garzón-Ferreira, and C. García, 2006: Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia, Global and Planetary Change, 50, 33-49, doi: 10.1016/j.gloplacha.2005.09.002.

Soden, B., 2000: The Sensitivity of the Tropical Hydrological Cycle to ENSO, Journal of Climate, 13, 538-549.

Takahashi, K., 2014: Variedades de El Niño, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, N°2, Febrero, Instituto Geofísico del Perú.

Thomas, R., and M. Meybeck, 2003: The use of particulate material Water Quality Assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring, London and New York: UNESCO, WHO & UNEP, 626.

Tote, C., G. Govers, S. Van Kerckhoven, I. Filiberto, G. Verstraeten, and H. Eerens, 2011: Effect of ENSO events on sediment production in a large coastal basin in northern Peru, Earth Surface Processes and Landforms, 36, 1776–1788, doi: 10.1002/esp.2200.

Woodman, R., y K. Takahashi, 2014: ¿Por qué no llueve en la costa del Perú (salvo durante El Niño)?, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, N°6, Junio, Instituto Geofísico del Perú.